

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, A NIVEL
ESTÁTICO Y DINÁMICO, DEL SUBSUELO PRESENTE EN LA FINCA "LA
SANTA MARÍA" KM 25 - AUTOPISTA NORTE.**

**JORGE LEONARDO GARZÓN MESA
ANA CRISTINA PÉREZ ARAQUE
KAREN YISELA RIVERA BUITRAGO**

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

**I.C Diego Armando Olaya
Asesor Disciplinar**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C.**

2015

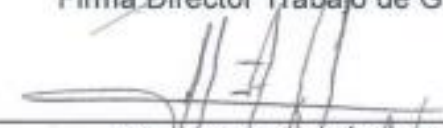
NOTA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

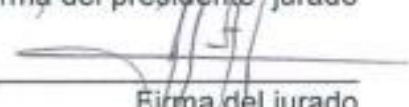
Observaciones



Firma Director Trabajo de Grado



Firma del presidente jurado



Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Junio 2015

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios por brindarnos las capacidades y oportunidades para desarrollar este trabajo de grado y fortalecernos ante las dificultades que tuvimos que sobrepasar.

El más sincero y profundo agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo de grado, en especial al Ingeniero Diego Armando Olaya, director de esta tesis de grado, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma; así mismo a Martin Viatela por su colaboración y apoyo durante la realización de los diferentes ensayos.

A nuestros familiares por el amor y apoyo constante e incondicional, que fueron de gran importancia para llevar a cabo la satisfactoria realización del trabajo necesario para finalizar el presente documento.

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
2. ANTECEDENTES.....	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	18
4. OBJETIVOS.....	19
4.1. GENERAL	19
4.2. ESPECÍFICOS	19
5. HIPÓTESIS.....	20
6. MARCOS REFERENCIALES	21
6.1. MARCO CONCEPTUAL	21
6.1.1. Ensayos de campo	21
6.1.2. Ensayos de caracterización física.....	22
6.1.3. Ensayos de caracterización mecánica.....	24
6.1.4. Ensayos de caracterización dinámica.....	27
6.1.5. Parámetros de diseño.....	28
6.2. MARCO GEOGRÁFICO.....	31
6.2.1. Descripción del predio	31
6.2.2. Geomorfología.....	33
6.2.3. Geología	35
6.3. MARCO LEGAL	39
6.3.1. Especificaciones IDU.....	39
6.3.2. American Society for Testing and Materials (ASTM)	39
6.3.3. NSR-10.....	40
6.3.4. INVE 2007	41
7. DISEÑO METODOLÓGICO	46
7.1. ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	46
7.2. FASES DE INVESTIGACIÓN	46
7.2.1. Fase I. Información previa y reconocimiento	46
7.2.2. Fase II. Ensayos en campo y laboratorio.....	47
7.2.3. Fase III. Realización cálculos y obtención de resultados.....	47

7.2.4.	Fase IV. Discusión de los resultados y conclusiones	48
7.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	48
7.3.1.	Determinación del límite líquido de los suelos	48
7.3.2.	Determinación del límite plástico de los suelos	49
7.3.3.	Determinación del contenido de agua en laboratorio.....	49
7.3.4.	Granulometría por Hidrómetro	50
7.3.5.	Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral	52
7.3.6.	Determinación del contenido orgánico en suelos	53
7.3.7.	Peso unitario parafinado.....	54
7.3.8.	Corte directo	54
7.3.9.	Consolidación y curvas de consolidación	55
7.3.10.	Compresión Inconfinada.....	57
7.3.11.	Triaxial estático y dinámico	57
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
8.2.	EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO	60
8.3.	Ensayos de campo.....	64
8.3.1.	Obtención del ángulo de fricción a partir del SPT.....	71
8.4.	Ensayos de laboratorio.....	79
8.5.	ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	80
8.5.1.	Identificación de los suelos expansivos a partir del Límite Líquido e Índice de Plasticidad	104
8.6.	PERFIL TÍPICO.....	111
8.7.	ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	112
8.7.1.	Compresión Inconfinada.....	115
8.7.2.	Consolidación Unidimensional.....	117
8.7.3.	Corte Directo.....	122
8.7.4.	Triaxial Estático	125
8.8.	ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA	128
8.8.1.	Sondeo 5, Muestra 4 (Profundidad media 2.30 m)	130
8.9.	CURVAS TÍPICAS DE SUELOS FINOS DE BOGOTÁ.....	136
9.	CONCLUSIONES	140
10.	RECOMENDACIONES	146

11. BIBLIOGRAFÍA.....	148
-----------------------	-----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Normas ASTM.	39
Tabla 2 Descripción capítulo H de la NSR-10.	40
Tabla 3 Especificaciones Invías.....	41
Tabla 4 Profundidad y Nivel Freático de los sondeos realizados.....	61
Tabla 5 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 1. .	65
Tabla 6 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 2. .	66
Tabla 7 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 3. .	67
Tabla 8 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 4. .	68
Tabla 9 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 5. .	69
Tabla 10 Propuestas de autores para el factor de corrección por confinamiento.....	72
Tabla 11 Cálculo de correcciones para el N de Campo.	73
Tabla 12 Propuestas para el cálculo del ángulo de fricción.....	75
Tabla 13 Resultados Ángulo de Fricción.	75
Tabla 14 Resultados ángulo de fricción por medio de correlaciones con SPT.	79
Tabla 15 Relación de ensayos realizados.	79
Tabla 16 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 1.	81
Tabla 17 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 2.	83
Tabla 18 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 3.	85
Tabla 19 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 4.	87
Tabla 20 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 5.	89
Tabla 21 Índice de Consistencia.	96
Tabla 22 Índice de Consistencia, Sondeo 1 al 5.	96
Tabla 23 Índice de Plasticidad.....	98
Tabla 24 Índice de Plasticidad, Sondeo 1 al 5.....	98
Tabla 25 Contenido de materia orgánica.....	102
Tabla 26 Valores típicos de gravedad específica para minerales del suelo. .	102
Tabla 27 Valores típicos de la gravedad específica de las partículas de suelo.	103
Tabla 28 Gravedad Específica.....	104
Tabla 29 Clasificación del Potencial de Expansión en función del LL y IP. .	105
Tabla 30 Potencial de Expansión, Sondeo 1.....	106
Tabla 31 Potencial de Expansión, Sondeo 2.....	107
Tabla 32 Potencial de Expansión, Sondeo 3.....	108
Tabla 33 Potencial de expansión, Sondeo 4.	109

Tabla 34	Potencial de expansión, Sondeo 5.	110
Tabla 35	Tabla de descripción del perfil de típico.	111
Tabla 36	Resumen Resultados Clasificación Mecánica, Sondeos 1 al 5.	114
Tabla 37	Resumen de los resultados ensayo Compresión Inconfinada.	115
Tabla 38	Consistencia del suelo en función de la carga última.	116
Tabla 39	Resultados Consolidación Unidimensional.	119
Tabla 40	Resultado Calculo del OCR (Over Consolidation Ratio).	122
Tabla 41	Tabla parámetros de resistencia del suelo mediante ensayo de corte directo.	124
Tabla 42	Resultados de ensayo triaxial estático.	127
Tabla 43	Cálculo Propiedades Dinámicas, Sondeo 5 Muestra 4.	131
Tabla 46	Tabla del perfil de típico encontrado en la zona de estudio.	141
Tabla 45	Tabla de parámetros típicos para el suelo de la Finca La Santa María.	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Referentes conceptuales.	21
Figura 2 Gráfica del comportamiento de un suelo causado por esfuerzos y deformaciones dinámicas.	30
Figura 3 Gráfica para el cálculo del amortiguamiento de un suelo ante respuestas cíclicas.	31
Figura 4 Ubicación geográfica finca “La Santa María”.	32
Figura 5 Plano topográfico finca “La Santa María”.	32
Figura 6 Panorámica desde la Finca “La Santa María”, se aprecia la ladera ubicada al oriente.	33
Figura 7 Zona de acumulación de agua.	34
Figura 8 Ondulaciones del terreno.	34
Figura 9 Cartografía Geológica Municipio de Chía.	35
Figura 10 Geología Local.	37
Figura 11 Cazuela Casagrande e instrumentos de laboratorio.	48
Figura 12 Límite plástico.	49
Figura 13 Balanza de laboratorio.	49
Figura 14 Horno de laboratorio.	50
Figura 15 Hidrómetro 152H.	51
Figura 16 Tubo Sedimentador.	52
Figura 17 Picnómetros de laboratorio.	52
Figura 18 Mufla.	53
Figura 19 Balanza Hidrostática.	54
Figura 20 Caja de Corte de laboratorio.	54
Figura 21 Máquina de Corte.	55
Figura 22 Máquina de consolidación.	56
Figura 23 Máquina de Corte Directo.	57
Figura 24 Máquina triaxial y dispositivos complementarios.	59
Figura 25 Plano de Ubicación de Sondeos.	60
Figura 26 Perfil Estratigráfico Finca "La Santa María", Sondeo 1 y 4.	63
Figura 27 Perfil Estratigráfico Finca "La Santa María", Sondeo 1, 2 y 3.	63
Figura 28 Condiciones de esfuerzo de una muestra de suelo sometida a un ensayo Triaxial estático.	125
Figura 29 Proceso cíclico (carga y descarga).	129
Figura 30 Ciclos de Histéresis para distintas deformaciones angulares (γ).	130
Figura 31 Correlación entre $G/G_{\max}$ vs γ y el IP - Suelos Normalmente Consolidados y Sobre consolidados	133
Figura 32 Correlación entre λ vs γ y el IP – Suelos Normalmente Consolidados y Sobre consolidados	134
Figura 33 Pruebas de Laboratorio para la caracterización dinámica.	144

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A PLANO TOPOGRÁFICO FINCA “LA SANTA MARÍA”	151
ANEXO B PLANO UBICACIÓN DE EXPLORACIÓN	151
ANEXO C REGISTROS DE PERFORACIÓN.....	151
ANEXO D RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO	151
ANEXO E ESTIMATIVO DE PARÁMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT	151
ANEXO F RESULTADOS DE ENSAYO DE LÍMITES.....	151
ANEXO G RESULTADOS DE ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO	151
ANEXO H RESULTADOS DE ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL	151
ANEXO I RESULTADOS DE ENSAYO DE CONTENIDO ORGÁNICO	151
ANEXO J RESULTADOS DE ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA	151
ANEXO K RESULTADOS DE ENSAYO DE PESOS UNITARIOS	151
ANEXO L RESULTADOS DE ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN	151
ANEXO M RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA... 	151
ANEXO N RESULTADOS DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO	151
ANEXO O RESULTADOS DE ENSAYO DE TRIAXIAL ESTÁTICO	151
ANEXO P RESULTADOS DE ENSAYO DE TRIAXIAL DINÁMICO	151

INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene la información obtenida a partir de diferentes ensayos de laboratorio con los cuales se busca realizar la respectiva caracterización física, estática y dinámica del subsuelo presente en la Finca “La Santa María”, con estos ensayos se obtienen parámetros de diseño que permiten establecer el comportamiento que tendrá el suelo frente a las diferentes cargas a las que podría someterse de acuerdo a la obra civil que se desee realizar en el lugar; también se busca hacer una comparación con la literatura técnica, específicamente con el artículo realizado por Vucetic & Dobry denominado Efecto de la plasticidad en la respuesta cíclica, con la cual se logró identificar la similitud del comportamiento del material encontrado con las curvas de amortiguamiento y degradación del módulo de rigidez que presentan los autores anteriormente mencionados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las catástrofes que generan los eventos sísmicos y su afectación directa sobre los seres humanos (pérdidas humanas, económicas, daños en terrenos y en viviendas), es un tema de importancia para la ingeniería civil. “En los últimos años, en Colombia se han visto afectadas al año 4.650 viviendas y se afectan otras 25.911, lo que significa que es uno de los sectores que registra mayores impactos, tanto por la ocurrencia de fenómenos naturales afectando con un 73% por inundaciones, el 7% por sismos, el 5% por deslizamientos y el 15% por otros fenómenos como por eventos antrópicos”¹. Es por ello que durante los últimos años se ha incrementado el interés en el estudio del comportamiento dinámico de los suelos, y la respuesta de las edificaciones ante la ocurrencia de movimientos telúricos, lo que fomenta la búsqueda de información de los suelos como criterio básico para el diseño y construcción de proyectos de infraestructura.

En promedio se pierden

Así por ejemplo, la Finca "La Santa María", terreno que pertenece a la Universidad La Gran Colombia, la cual ha sido destinada para usos recreativos, culturales y de esparcimiento por la comunidad universitaria Grancolombiana, podría a futuro servir para la construcción de infraestructura; sin embargo en la actualidad carece de estudios que permitan conocer las características geotécnicas del subsuelo y los usos que a los mismos se les podría dar. Sumado a lo anterior, los datos de microzonificación sísmica para el Municipio de Chía donde se encuentra ubicada la Finca "La Santa María" son inexistentes, y la correspondiente a la Ciudad de Bogotá no cubre la zona de estudio. Por tales razones, se hace necesario elaborar una caracterización geotécnica que permita determinar diferentes propiedades físicas, mecánicas y dinámicas del subsuelo de este predio, ofreciendo así una base para posteriores estudios de la propiedad.

¹ BANCO MUNDIAL COLOMBIA; GLOBAL FACILITY FOR DISASTER REDUCTION AND RECOVERY (GFDRR). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, un aporte para la construcción de políticas públicas. Bogotá, Colombia. Marzo 2012. 413 págs.

A partir de lo expuesto anteriormente, el presente proyecto busca aportar información acerca del comportamiento del subsuelo presente en el lugar de estudio mediante la formulación de la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las características geotécnicas, a nivel estático y dinámico, del subsuelo en la finca "La Santa María", Km 25 Autopista Norte, Chía (Cundinamarca)?

2. ANTECEDENTES

El artículo realizado por Cabrera y Beira², cuyo proyecto consistió en la caracterización geotécnica del campo experimental de ingeniería civil de la Universidad de Oriente (Cuba), aporta la siguiente información: en el predio de la Universidad de Oriente, sede Mella en Santiago de Cuba se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) en 3 sondeos hasta una profundidad promedio de 10 m y 3 apiques a 1,5 m de profundidad; así como ensayos geofísicos con el objetivo de caracterizar geotécnicamente el predio de la Universidad de Oriente. A partir de los sondeos se obtuvieron muestras alteradas, las cuales fueron sometidas a ensayos físicos y por otro lado se obtuvieron muestras inalteradas cuyos ensayos estuvieron dados por sus características mecánicas de resistencia al corte y compresión edométrica. En cuanto a los apiques se efectuaron ensayos de compactación Proctor Estándar y el índice de CBR para la energía del Proctor estándar; de esta forma se adquirieron muestras de tipo alterada e inalterada, con base en la normatividad vigente en Cuba, estableciéndose que los estratos que conforman el perfil presentan características muy similares, encontrando arcillas de alta y baja plasticidad de diferentes colores según su profundidad. Los resultados resaltan el predominio de un suelo arcilloso acompañado de lutita calcárea después de los 9 m de profundidad con varios cambios de tonalidad, con valores índice de compresión (C_c) entre 0,14 – 0,22, índice de expansión (C_s) del orden de 0,06, módulo edométrico entre 500 – 12000 kPa, valores de cohesión entre 60-80 KPa y ángulos de fricción bajos, en función de la profundidad del estrato de estudio. El resultado de CBR resalta que el suelo de estudio presenta una baja capacidad de soporte o esfuerzo en condiciones de saturación.

² CABRERA CASTRO, P. M.; BEIRA FONTAINE, E. Caracterización Geotécnica del campo experimental de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente. En: Ingeniería Revista Académica. Vol. 11. No. 002 (May-Ago. 2007); p. 57-66.

De otra parte, en el artículo realizado por González y Schmitz³ se expone que el pueblo de Cariaco (ubicado en el noreste de Venezuela, en cercanía a la Falla El Pilar) sufrió severos daños durante el terremoto de Cariaco de 1997. Posterior al sismo se realizaron evaluaciones geotécnicas del subsuelo y mediciones sísmicas de refracción con las cuales se adquirieron un total de 7 líneas de refracción de longitud variable entre 360 y 1080 m, de las cuales se obtuvieron velocidades de ondas de corte (Vs) para la roca equivalente. Con base en la información geotécnica obtenida de 14 sondeos realizados en la zona y las velocidades de ondas de corte (Vs) determinadas mediante el modelado sísmico se definieron dos tipos de perfiles geotécnicos como modelos de entrada para el modelado dinámico, se analizaron los espectros de respuesta de estos perfiles en la superficie para sismos cercanos y sismos lejanos comparando la respuesta con los espectros elásticos normativos S2 y S3. Finalmente se pudo concluir que la población de Cariaco puede zonificarse globalmente según los resultados obtenidos como un perfil S2, de acuerdo con la Norma Covenin 1756-2001, para sismos cercanos y sismos lejanos hasta 1.2 s de período fundamental; para períodos mayores, los valores de aceleración del espectro de respuesta son mayores y superan al perfil S2.

Así mismo; Alfaro y Monroy⁴ plantean una investigación sobre la caracterización dinámica de arcillas sobre la formación de Bogotá, cuyo principal objetivo consistió en la caracterización dinámica de arcillas sobre arcillolitas de piedemonte oriental de la formación de Bogotá. Para ello se utilizaron métodos de modelación numérica unidimensional que determinaron la respuesta del terreno ante un evento sísmico (1D) y bidimensional que hace énfasis en los efectos geométricos en el sitio. Se generaron perfiles estratigráficos que brindaron la información geológica, geofísica y geotécnica donde se incluye la velocidad de ondas de

³ GONZALEZ, Jorge; SCHMITZ, Michael. Caracterización Dinámica de Perfiles Geotécnicos de Cariaco (Estado Sucre, Venezuela), partiendo de datos de refracción sísmica. En: Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. Vol. 23. No. 2 (2008); p. 83-93.

⁴ ALFARO CASTILLO, Andrés José; MONROY PEDROZA, Lucia del Pilar. Caracterización Dinámica de Arcillas sobre la Formación de Bogotá. En: Revista de investigación. Vol. 4. (Dic 2004); p. 173-180.

compresión (V_p) y ensayos triaxiales. “Se obtuvieron datos de humedad natural, límites de Atterberg, peso unitario, gravedad específica, granulometría, hidrometría, compresión inconfiada, corte directo y triaxial cíclico”; por medio de los ensayos de triaxial cíclico se establecieron parámetros de la degradación del módulo de corte y el amortiguamiento con la deformación angular entre el orden de 0.04% hasta 6.5%. En la parte geofísica se utilizaron líneas de refracción sísmica y de ensayos Down Hole, partiendo de la base que en el oriente de la sabana de Bogotá existe una de las estructuras geológicas más importantes en la ciudad llamada La Formación de Bogotá, que está constituida por una serie de suelos arcillosos, en su mayoría ubicados en el piedemonte de los cerros orientales de la ciudad.

La caracterización sísmica de los suelos logra determinar los períodos dominantes del subsuelo y sus amplificaciones correspondientes con el fin de evitar los problemas de resonancia en las edificaciones; existen zonas de este piedemonte donde se caracteriza por tener bajos espesores de suelo, generando el fenómeno de resonancia, lo que significa la amplificación de los desplazamientos y con ello el aumento de las fuerzas sísmicas causantes de los daños estructurales en las edificaciones de este sector y finalizaron con los resultados obtenidos que muestran el comportamiento dinámico de los suelos del piedemonte oriental de Bogotá, a partir de los métodos unidimensional y bidimensional, señala que este último muestra una reducción de amplificaciones, el cual sugiere ser positivo para las construcciones, aunque tuvo un leve aumento de los períodos de aceleración en el espectro sísmico para el diseño estructural. Se obtuvieron velocidades de onda de corte V_s entre 110 y 1150 m/s y velocidades de onda de compresión V_p entre el orden de 250 y 4220 m/s según su profundidad, generando curvas de degradación del cortante y dichas velocidades permitiendo así, estimar los períodos de dominio y amplificaciones dicho suelo.

Por otro lado, Higuera *et al.*⁵, propone un método para tratar los suelos susceptibles (arcillas); ya que estos en presencia de estructuras tales como los pavimentos, generan grandes problemas como deformaciones, agrietamientos, estabilidad volumétrica, pérdida de la banca, baja resistencia, entre otros; es por ello que los autores plantean la estabilización con el hidróxido de calcio, ya que esto le aporta resistencia y estabilidad a largo plazo, permeabilidad, compresibilidad, trabajabilidad, reducción de la plasticidad y permanencia de las propiedades adquiridas al suelo tratado.

El objetivo de este estudio es el mejoramiento de las características físicas, mecánicas y químicas del suelo al incorporarle hidróxido de calcio, y para llevar a cabo esto se desarrolló la siguiente metodología: primero se realizó una revisión del estado del arte, seguido de ello se hace la consecución del suelo y del hidróxido de calcio, después se hace la caracterización del suelo sin tratar y del hidróxido de calcio a través de ensayos químicos (Análisis químico, pH y Micrografía), físicos (Humedad, Granulometría, Peso Específico y Límites de Consistencia) y mecánicos (Compactación, CBR del suelo fino, Compresión Inconfinada, Ensayo de absorción, Ensayo de Ascensión y Estabilidad Hídrica), luego se realizaron los mismos ensayos anteriormente nombrados al suelo ya tratado. Los diferentes ensayos fueron ejecutados en los laboratorios de Suelos y Pavimentos, Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Laboratorio de Física del grupo de investigación GSEC en las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). A partir de los resultados, se concluye que es posible obtener una mezcla que optimiza el comportamiento del suelo original en cuanto a sus propiedades de plasticidad, resistencia y estabilidad, transformando un suelo pobre en uno adecuado para estructuras de pavimentos; y aportándole gran capacidad cementante al suelo original permitiendo un aumento en la estabilidad del mismo.

⁵ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando; GOMEZ CRISTANCHO, Jenny Carolina; PARDO NARANJO, Oscar Eduardo. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. En: Revista de Facultad de Ingeniería UPTC. Vol. 21. No. 32 (Ene-Jun 2012); p. 21-40.

Finalmente el informe de Montaña⁶, documenta el levantamiento topográfico altimétrico y planimétrico detallado y amarrado a las coordenadas planas Gauss Kruger en el sistema MAGNA SIRGAS, representando en un plano georreferenciado y a escala adecuada, paramentos de construcción, vías de acceso y demás accidentes relevantes de la zona del predio denominado “La Santa María”, ubicado en la Vereda Yerbabuena del municipio de Chía, Cundinamarca, propiedad de la Universidad La Gran Colombia, de donde sale como producto las coordenadas georreferenciadas del sitio ilustradas en un plano topográfico⁷ en donde se puede identificar los límites del terreno, los diferentes elementos que aparecen en la planta y las zonas inundadas a causa del río Bogotá que delimita el predio.

⁶ MONTAÑA, William. Informe Topográfico en la Finca “La Santa María”. Universidad La Gran Colombia, (Marzo 2013).

⁷

Ver

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se desarrolla a partir de la búsqueda de información relacionada con la Finca “La Santa María”, en donde se pudo observar la ausencia de estudios geotécnicos relacionados al sector perteneciente a la propiedad, por lo cual se busca aportar un análisis general a nivel geotécnico que caracterice la zona en cuanto a propiedades y usos de los materiales que se puedan requerir al momento de efectuar diseños geotécnicos de cimentaciones y excavaciones, entre otros. A través de la caracterización geotécnica se aportarán datos claves para la posibilidad de realizar la construcción de infraestructura, en la cual hay que tener en cuenta, la geología, topografía y nivel freático del terreno, con el objetivo de ejecutar un proyecto que aporte estabilidad, durabilidad y confiabilidad, por lo cual esta investigación contribuirá como base para futuros estudios.

Para llevar a cabo lo anterior, se realizarán pruebas en el laboratorio al material obtenido de las perforaciones geotécnicas que permitan establecer las características físicas, parámetros estáticos y dinámicos del suelo, y se efectuará el análisis de los resultados comparando los mismos con los existentes en la literatura técnica para materiales de características similares, beneficiando a la comunidad Grancolombiana con la disminución de riesgos ocasionados por procesos naturales y climáticos como sismos, inestabilidad de materiales e inundaciones, factores que deben ser interpretados adecuadamente.

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Determinar las características geotécnicas, a nivel estático y dinámico, del subsuelo presente en la Finca “La Santa María”, que pertenece a la Universidad La Gran Colombia, Km 25 Autopista Norte, Chía (Cundinamarca).

4.2. ESPECÍFICOS

- Recopilar información técnica previa existente de la finca “La Santa María”, en cuanto a topográfica, geomorfológica y geológica.
- Identificar las características geotécnicas del subsuelo del predio en estudio.
- Comparar los resultados obtenidos con los existentes en la literatura técnica para materiales de características similares.

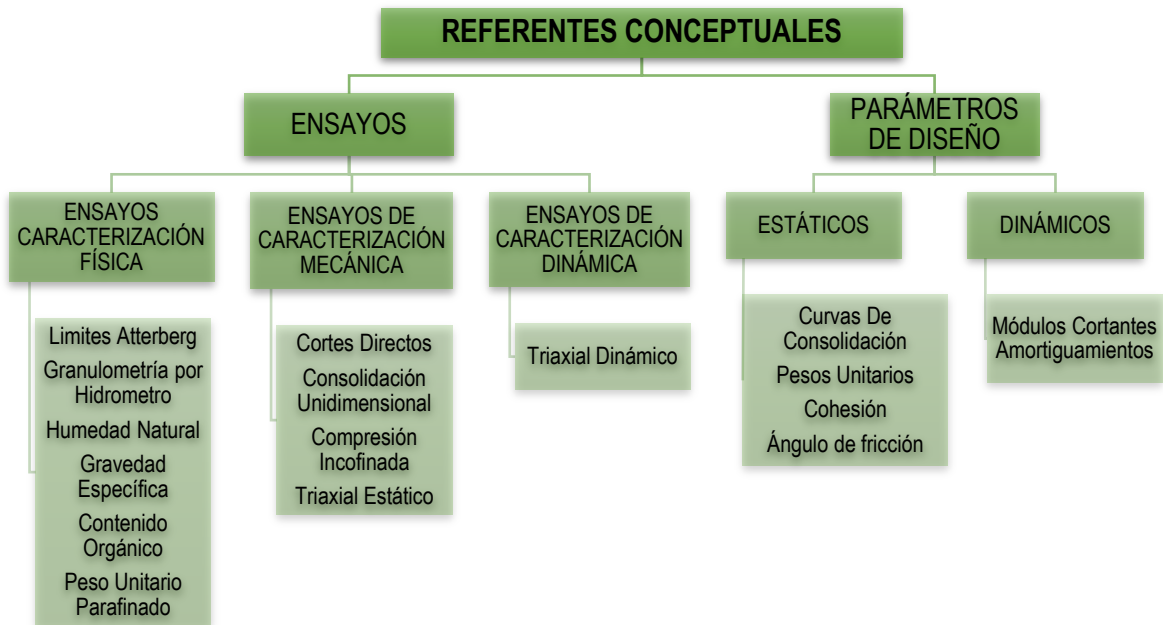
5. HIPÓTESIS

De acuerdo a la información que se investigó para la Finca “La Santa María”, predio perteneciente a la Universidad La Gran Colombia ubicada en el Km 25 Vía Autopista Norte, Chía (Cundinamarca), se encontró con que esta solamente cuenta con un levantamiento topográfico realizado por parte del departamento de Planta Física de la Universidad mencionada, sin embargo se halló que esta zona no cuenta con un análisis geotécnico que permita efectuar el diseño de estructuras a futuro.

6. MARCOS REFERENCIALES

La Figura 1 presenta las referencias conceptuales empleadas para la elaboración del presente trabajo de grado:

Figura 1 Referentes conceptuales.



Fuente: Elaboración propia.

6.1. MARCO CONCEPTUAL

6.1.1. Ensayos de campo

6.1.1.1. Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con el tubo split spoon.

Es el más común para perforaciones, consiste en hincar en el fondo de la perforación mediante golpes con una masa de 63 kg (140 lbs) que se deja caer desde una altura de 75 cm, un muestreador de barril hendido o cuchara de 5 cm (2 pulg) de diámetro externo. Se registra el número de golpes necesarios para incrustar 30 cm (12 pulg) la cuchara, y esa

cifra recibe el nombre de valor N de campo en golpes/pie, que es un indicador de la densidad y puede reflejar la resistencia de los materiales.

6.1.2. Ensayos de caracterización física

6.1.2.1. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica que contiene el suelo procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos que contiene; la presencia de grandes cantidades de cationes metálicos en el suelo, tales como hierro o calcio, insolubiliza los ácidos húmicos y fálcos e impide su migración formando lo que se llama suelos pardos.

6.1.2.2. Límites de Atterberg⁸

Los suelos que poseen un grado de cohesión, según su naturaleza y cantidad de agua, pueden presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semasólido, plástico o semalíquido. El contenido de agua o humedad límite es producido por el cambio de estado, que varía de un suelo a otro; es por ello que el método usado para medir estos límites se conoce como método de Atterberg y los contenidos de agua o humedad con los cuales se producen los cambios de estados se denominan límites de Atterberg. Los límites están definidos de la siguiente manera:

- Límite líquido (LL). Humedad de un suelo remodelado, límite entre los estados líquido y plástico, expresado en porcentaje.
- Límite plástico (LP). Humedad de un suelo remodelado, límite entre los estados plástico y semasólido, expresado en porcentaje.

⁸ UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO. Determinación de los Límites de Atterberg. Valparaíso (Chile). p. 21. 2010.

- Límite de contracción (LC). Humedad máxima de un suelo para la cual una reducción de la humedad no causa una variación del volumen del suelo, expresado en porcentaje.

6.1.2.3. Consistencia⁹

Es la propiedad que determina la capacidad de resistencia del material ante fuerzas que puedan deformarlo debido a la fortaleza con la que sus partículas se mantienen unidas; la consistencia se ve afectada de acuerdo al contenido de humedad natural del material ya que influye en el modo en las fuerzas físicas de adhesión y cohesión, la textura, materia orgánica, etc. El índice de consistencia se determina por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 1 Índice de Consistencia.

$$CR = \frac{LL - Wn}{IP}$$

Donde LL es el Límite Líquido, Wn es la humedad natural, IP es el Índice de Plasticidad.

6.1.2.4. Granulometría por hidrómetro

Es el proceso que se lleva a cabo para determinar la “distribución de los tamaños de las partículas de un suelo”¹⁰ a partir del análisis hidrométrico, el cual “se basa en la Ley de Stokes que relaciona la velocidad de una esfera cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera; por lo cual se asume que puede ser aplicada a

⁹ HOLTZ & KOVACS. Índice de consistencia, An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall. 1981. p 747.

¹⁰ UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. Determinación del Análisis Granulométrico. Nicaragua. P. 14. 2009.

una masa de suelo dispersado con partículas de varias formas y tamaños.”¹¹

6.1.2.5. Humedad natural

El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica; la importancia de este contenido es que representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de los materiales ante cambios de volumen, cohesión y estabilidad mecánica.

6.1.2.6. Gravedad específica¹²

Es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura. El valor de la gravedad específica difiere según del tipo de suelo a analizar y el tamaño de sus partículas, esto define el método que se debe utilizar (normas INVE 222 y 223). El valor de la gravedad específica es utilizado en las relaciones de fase del suelo y para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor.

6.1.3. Ensayos de caracterización mecánica

6.1.3.1. Corte directo¹³

Es el ensayo más utilizado para obtener la resistencia de los suelos en los estudios de deslizamiento debido a la simplicidad y la economía que ofrece al desarrollarlos, la fácil ejecución y la realización de una gran

¹¹ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro. I.N.V.E – 124 – 07. El Instituto. Bogotá D.C. 2007. p. 12.

¹² INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral. El Instituto. I.N.V.E 128 – 07 Bogotá D.C. 2007. p. 11.

¹³ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. Ensayo de Corte Directo. Medellín, Colombia. p. 13. 2014.

cantidad de pruebas en poco tiempo. Este ensayo permite la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo y las componentes del esfuerzo de corte de un suelo, es decir la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

6.1.3.2. Consolidación

El proceso de consolidación consiste en la disminución de volumen, provocado por un aumento de las cargas sobre el suelo que tenga lugar en un lapso de tiempo, éste se puede dividir en tres etapas¹⁴ que son:

- **Consolidación inicial:** Reducción casi instantánea en el volumen de la masa de un suelo bajo una carga aplicada, que precede a la consolidación primaria, debida principalmente a la expulsión y compresión del aire contenido en los vacíos del suelo.
- **Consolidación primaria:** Reducción en el volumen de la masa de un suelo originada por la aplicación de una carga permanente y la expulsión del agua de los vacíos, acompañada por una transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo, debido a la disipación de la presión de poros.
- **Consolidación secundaria:** Reducción en el volumen de la masa del suelo, causada por la aplicación de una carga permanente y el acomodo de la estructura interna de su masa, luego de que la mayor parte de la carga ha sido transferida a las partículas sólidas del suelo.

Los datos que resultan del ensayo de consolidación pueden usarse para hacer un estimativo de la magnitud del asentamiento diferencial y/o total, de una estructura o de un relleno que son apreciaciones que suelen tener una importancia decisiva para elegir el tipo de fundación y

¹⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Consolidación unidimensional de los suelos. I.N.V.E – 151 – 07. El Instituto. Bogotá D.C. 2007. p. 17.

evaluar su conveniencia.

6.1.3.3. Compresión inconfínada¹⁵

Consiste en una prueba de compresión simple realizada generalmente a especímenes cohesivos tales como las arcillas, limos y suelos que posean confinamiento lateral. La muestra se trabaja no consolidada y no drenada; en este caso la presión de confinamiento (σ_3) es igual a cero y solo se aplica una carga axial llamada esfuerzo principal mayor (σ_1) al espécimen hasta generar la falla, de allí se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 2 Compresión Inconfínada.

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{qu}{2} = Cu$$

Dónde Cu es la resistencia al corte no consolidado-no drenado y qu es la resistencia a compresión simple.

6.1.3.4. Triaxial estático¹⁶

La prueba de ensayo triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al cortante, el esfuerzo cortante de un suelo se ha definido como la última o máxima resistencia que el suelo puede soportar. Específicamente se ha expresado como la resistencia interna que ofrece la masa de suelo por área unitaria para resistir la falla al deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él.

¹⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Compresión inconfínada en muestras de suelos. El Instituto. I.N.V.E 152 – 07 Bogotá D.C. 2007. p. 11.

¹⁶ SALAS, Oscar. Lanamme UCR. Ensayos triaxiales para suelos. p. 11. 2011.

6.1.4. Ensayos de caracterización dinámica

6.1.4.1. Triaxial dinámico¹⁷

El ensayo de Triaxial Dinámico tiene como fin determinar el comportamiento esfuerzo – deformación de una muestra de suelo sometido a cargas axiales cíclicas, esto con el fin de obtener la variación de los parámetros de módulo de rigidez (G) y amortiguamiento (λ) en función del aumento a determinadas deformaciones angulares (γ), de igual manera el cálculo del potencial de licuación ante los excesos de la presión de poros simulado en las condiciones de carga sísmica.

6.1.4.2. Columna resonante¹⁸

Este ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de vibración forzada a una muestra en función de una determinada frecuencia de excitación hasta llegar a la resonancia de la muestra, dichas vibraciones pueden ser aplicadas de manera longitudinal, transversal o de torsión. Esta prueba de laboratorio se calcula los mismos parámetros que arroja el ensayo de Triaxial dinámico, la diferencia consiste en el rango de deformaciones pequeñas a las que se puede llevar el espécimen.

6.1.4.3. Bender Element¹⁹

El Bender Element tiene como finalidad la medición de la velocidad de la propagación de las ondas de corte (Vs) a muy bajas deformaciones

¹⁷ BRAN J., GONZÁLEZ R. Y ORTÍZ H. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el salvador. San Salvador, 2009. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad de el Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Civil. Pág. 140.

¹⁸ Ibid., p. 225

¹⁹ RODRIGUEZ, Jorge. Hacia la integralidad de la enseñanza y la práctica profesional en geotecnia, (Artículo), Bogotá, pág. 167.

para muestras de suelo o roca; esta permite calcular los módulos de rigidez antes los escenarios dinámicos.

6.1.5. Parámetros de diseño

6.1.5.1. Curvas de consolidación²⁰

Para cada escalón de carga se realizan mediciones de la deformación para diversos tiempos y luego se traza, con los datos obtenidos, la gráfica deformación vs logaritmo del tiempo o la gráfica deformación vs raíz del tiempo, las cuales son llamadas curvas de consolidación. Al finalizar el ensayo se tienen tantas curvas de consolidación como escalones de carga aplicados.

Antes de aplicar un nuevo escalón de carga se registra el valor final de la deformación; con este dato, la altura inicial y el peso seco de la muestra puede determinarse el valor de la relación de vacíos correspondiente al escalón de carga en cuestión. Este proceso se repite para cada incremento de carga y al finalizar el ensayo se tiene, para cada uno de ellos, un valor de relación de vacíos y con estos datos se puede trazar una gráfica, en la cual se ubican en el eje de las abscisas los valores de presiones (carga sobre el área de la muestra) correspondientes a cada escalón de carga en escala logarítmica, y en el eje de las ordenadas se ubican las relaciones de vacíos correspondientes; esta curva es llamada la curva de compresibilidad.

Con las curvas de consolidación y de compresibilidad se determinan los parámetros necesarios para realizar cálculos de tiempos de consolidación C_v y asentamientos C_c y C_r .

²⁰ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Consolidación Unidimensional De Los Suelos. I.N.V.E – 151 – 07. El Instituto. Bogotá D.C. 2007. p. 8.

6.1.5.2. Pesos unitarios²¹

El peso unitario es definido como la masa por unidad de volumen; éste varía de acuerdo al contenido de agua que tenga el suelo, que suele clasificarse como: húmedo (no saturado), saturado y seco. El peso unitario húmedo es definido como el peso de la masa de suelo en estado no saturado por unidad de volumen, donde los vacíos del suelo contienen tanto agua como aire.

6.1.5.3. Módulo de rigidez del suelo (G)

Es un parámetro directo y representativo en el cálculo de esfuerzos y deformaciones dinámicas que experimenta un suelo; debido a que el suelo no presenta un comportamiento lineal entre esfuerzos y deformaciones, sino un comportamiento curvilíneo llamado “ciclo de histéresis esfuerzo-deformación del material”, por este motivo se define el módulo de rigidez como la pendiente de la secante que une los puntos extremos de un ciclo.

Para deformaciones muy pequeñas recibe el nombre de “módulo de rigidez inicial o máximo” ($G_{m\acute{a}x}$), este valor se obtiene por la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo deformación del origen del primer ciclo.

El módulo rigidez usualmente es usado en la predicción de desplazamientos causados por las vibraciones sujetas a cargas cíclicas producidas generalmente por un sismo y se utiliza para un rango de amplitud de la deformación de 10^{-5} a 10^{-1} y mayores para sismos.

Está definido por la ecuación:

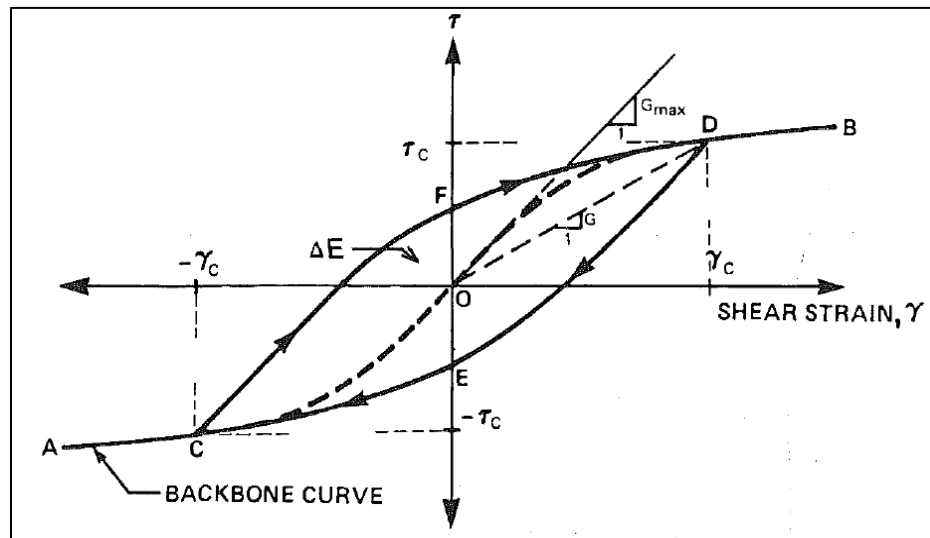
²¹ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Densidad Bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos. El Instituto. I.N.V.E 217 – 07 Bogotá D.C. 2007. p. 8.

Ecuación 3 Módulo de rigidez.

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante unitario y γ a la deformación angular o de corte.

Figura 2 Gráfica del comportamiento de un suelo causado por esfuerzos y deformaciones dinámicas.

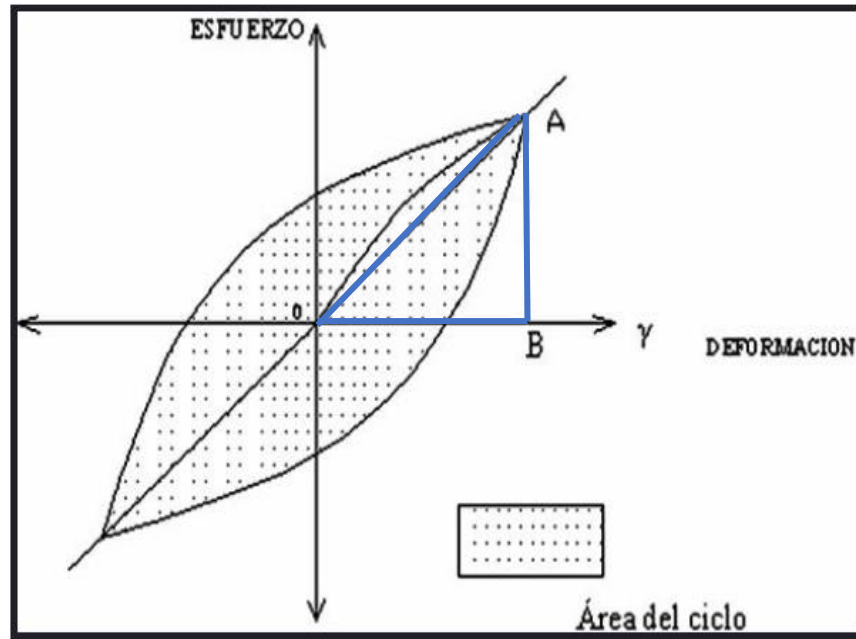


Fuente: VUCETIC M. and DOBRY R., "Effect of soil plasticity on cyclic response", ASCE, 1991. Pág. 90.

6.1.5.4. Amortiguamiento del suelo

Se define como la propiedad que representa la capacidad de disipación de energía del suelo; un material tiene amortiguamiento desde el punto de vista del ciclo de histéresis, cuando la energía disipada por un ciclo es independiente de la frecuencia de vibración. A partir del gráfico esfuerzo-deformación o ciclo de histéresis, se puede obtener el valor de amortiguamiento, el cual es igual al área de cada ciclo.

Figura 3 Gráfica para el cálculo del amortiguamiento de un suelo ante respuestas cíclicas.



Fuente: BRAN J., GONZÁLEZ R. Y ORTÍZ H. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el salvador. (Trabajo de grado), 2009. Pág. 87.

6.2. MARCO GEOGRÁFICO

6.2.1. Descripción del predio

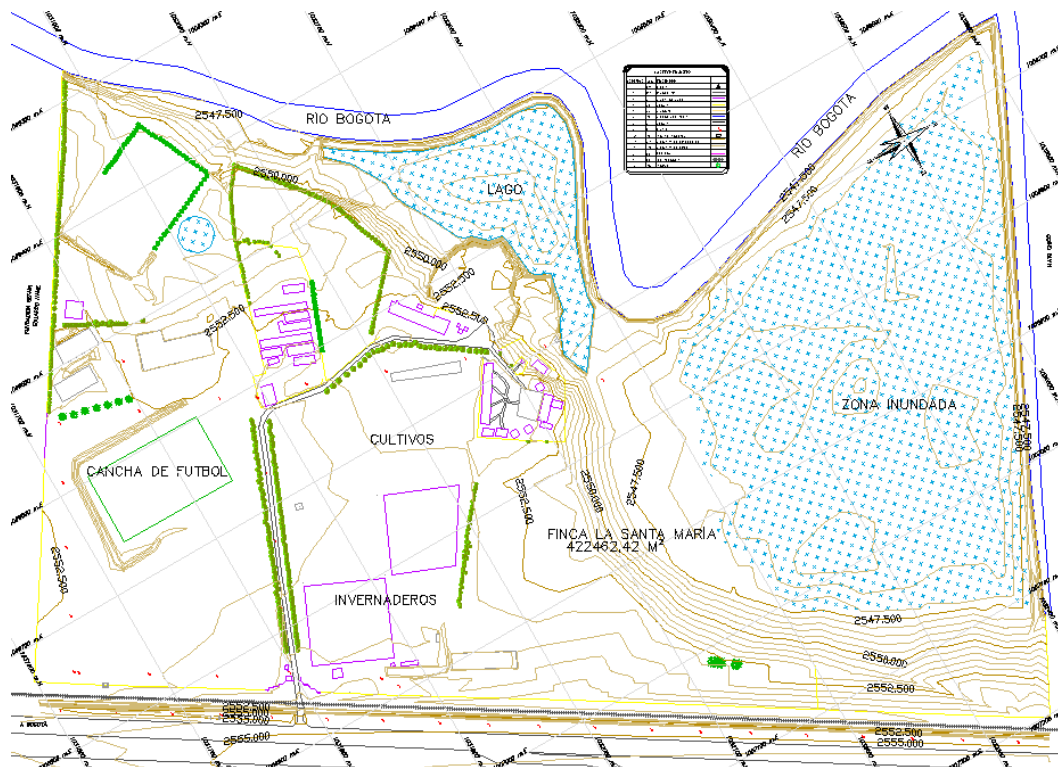
La Finca “La Santa María” se encuentra ubicada en la vereda de Yerbabuena, municipio de Chía, sobre el Km 25 vía Autopista Norte (Figura 4). En la Figura 5 se muestra el plano de la finca que se realizó por un grupo de topógrafos contratados por parte del departamento de Planta Física de la Universidad La Gran Colombia.

Figura 4 Ubicación geográfica finca “La Santa María”.



Fuente: Google Earth.

Figura 5 Plano topográfico finca “La Santa María”.



Fuente: Informe Topográfico, Archivo UGC.

6.2.2. Geomorfología

La finca “La Santa María” ubicada en la vereda de Yerbabuena, municipio de Chía, sobre el Km 25 vía Autopista Norte, se encuentra situada en la base de la Sabana de Bogotá muy cerca del corredor central establecido por el trazo meándrico del río Bogotá, presentando una topografía bastante plana, con leves ondulaciones que se hacen más empinadas hacia el Este cuyo origen está asociado con la evolución en el eje de la Sabana del río Bogotá; sin embargo el cuerpo de la estructura remonta sobre una morfología suave y ondulada que desciende con dirección NW, esta topografía está desarrollada sobre antiguos materiales lacustres y aluviales recubiertos hacia el Este por depósitos de vertiente del tipo flujo de escombros y/o lodos que descienden desde la ladera adyacente; 500 m a 1000 m más al oriente de la finca la morfología cambia suavemente²² hasta convertirse en una ladera moderada localmente empinada (Figura 6), desarrollada en su totalidad sobre rocas sedimentarias de la Formación Guaduas.

Figura 6 Panorámica desde la Finca “La Santa María”, se aprecia la ladera ubicada al oriente.



Fuente: Elaboración propia.

²² DEVINORTE. Estudio Geotécnico Ampliación Puente Vehicular La Caro, GEO² S.A.S, Chía (Cundinamarca). 2014.

Se ejecutó un levantamiento detallado de la zona donde se analizó la morfodinámica²³, elemento importante para el diagnóstico de las problemáticas de estabilidad, donde no se identificaron procesos activos o cicatrices del terreno pero si se ven algunas zonas húmedas y líneas de escorrentía.

Figura 7 Zona de acumulación de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Ondulaciones del terreno.



Fuente: Elaboración propia.

²³ Rama de la geomorfología que estudia el origen y características de los procesos superficiales que esculpen el paisaje.

En el predio de la Finca La Santa María se encuentran zonas bajas cercanas al meandro del río Bogotá, donde se observan las líneas por donde transita el agua superficial formando ondulaciones en el terreno, estas sinuosidades se pueden observar en la Figura 7 y en la Figura 8, tomadas en la visita de reconocimiento realizada; la escorrentía superficial es una de las causas de erosión del terreno y el desbordamiento del río es causa de algunos problemas de drenaje superficial, pero es posible manejarlo con control de cuencas.

6.2.3. Geología

Los estudios adelantados en el área de investigación estuvieron orientados a conocer en detalle las características de las unidades geológicas que constituyen esta zona, así que para adelantar los estudios de geología se realizó la recopilación de la información secundaria cartográfica y bibliográfica²⁴ realizada en el INGEOMINAS, como se muestra en la

Figura 9:

Figura 9 Cartografía Geológica Municipio de Chía.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Fragmento Mapa geológico generalizado del departamento de Cundinamarca, 2001.

²⁴ DEVINORTE. Estudio Geotécnico Ampliación Puente Vehicular La Caro, GEO² S.A.S, Chía (Cundinamarca). 2014.

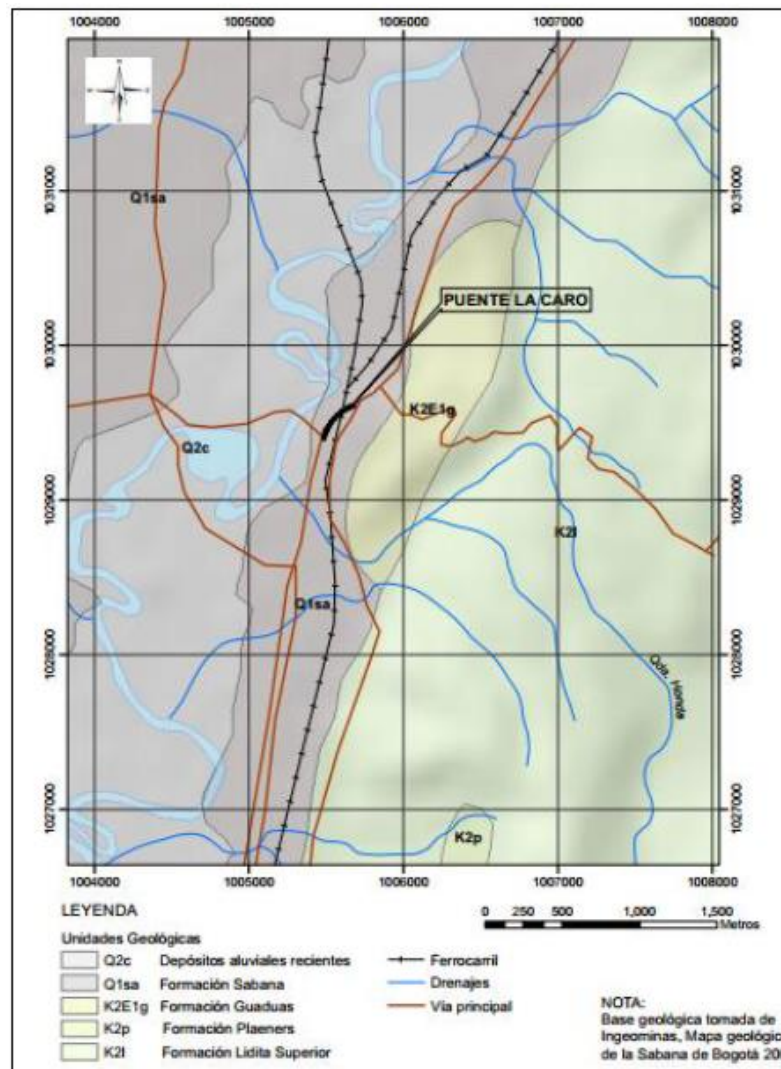
La totalidad de área de trabajo se constituye por depósitos no litificados, los cuales son materiales generados por la dinámica fluvial del río Bogotá y sus afluentes, así como la sedimentación de antiguos lagos; estos materiales están compuestos por una compleja intercalación de materiales como arcillas, turbas, limos y localmente arenas finas.

Desde el punto de vista geológico regional, “el basamento de la Sabana de Bogotá corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias marinas profundas hasta de ambientes someros, terminando en secuencias continentales fluviales de edad variable desde el Cretácico Superior hasta el Terciario inferior, estas secuencias litológicas continuas durante el Mioceno (levantamiento de la Cordillera Oriental) fueron afectadas por un importante evento de compresión (E-W) que las plegó y falló, estableciendo un tren estructural en sentido NS a NE, con anticlinales y sinclinales amplios, sub-paralelos y de flancos poco buzantes (entre 15 y 40°); así como fallas inversas de plano curvo-lístrico (tales como las Fallas Chital, El Porvenir, Teusacá, etc.).”²⁵

Al formarse la cuenca de la Sabana de Bogotá, que desde el Terciario Superior y principalmente durante el Cuaternario se rellenó con sedimentos finos, lacustres y algunos materiales de vertiente. En la Figura 10 se observa la reconstrucción de la geología local a partir de donde se describen las unidades relacionadas a la zona estudiada.

²⁵ DEVINORTE. Estudio Geotécnico Ampliación Puente Vehicular La Caro, GEO² S.A.S, Chía (Cundinamarca). 2014.

Figura 10 Geología Local.



Fuente: Estudio Geotécnico Ampliación Puente Vehicular La Caro, DEVINORTE.

6.2.3.1. Formación Guaduas

Aflora ampliamente en la región del Sinclinal de Río Frío, cerca al casco urbano de Chía, la formación se observa como una intercalación de limolitas, lutitas, arcillolitas (lodolitas) y areniscas finas con tonalidades grises a beiges, en paquetes de espesor considerable (más de 25 a 30 m cada uno, pero de gran variabilidad interna). Se reportan también cintas de carbón, indicando el ambiente transicional de su depositación interdigitados con lutitas carbonosas, de manera general la Formación Guaduas se hace más superficial hacia el NE, y la meteorización

química ha deteriorado mecánicamente las rocas (ahora son suelos blandos).

6.2.3.2. Formación Sabana

Dentro de este grupo se presentan depósitos relacionados con el relleno de la Sabana de Bogotá mediante la acumulación de sedimentos aportados por los ríos y lagunas, se encuentra constituida principalmente por arcillas y suelos orgánicos hacia las márgenes de la cuenca. Específicamente se denomina Formación Sabana a los depósitos lacustricos, que afloran en toda la zona plana del fondo de la Sabana, adyacentes al corredor de los ríos y afluentes. Estos depósitos según INGEOMINAS son el resultado de un antiguo lago o sistema palustre que dejó planicies y deltas laterales, los cuales son muy extensos, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada, suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por pequeños escarpes erosivos.

Como conjunto la Formación Sabana está constituida por paquetes o lentes de poca continuidad lateral y gran variación horizontal, existe un predominio de arcillas lacustres, depósitos aluviales finos, turbas y depósitos aluviales medios (arenas finas).

6.2.3.3. Llenos antrópicos

El área de estudio está caracterizada por haber sido intervenida con construcciones, las evidencias de dicha intervención se dan en la conformación de llenos antrópicos en las partes aledañas a la casa, corrales y en las zonas de pastoreo por desechos de construcción, existe un espesor de llenos variable, llegando incluso a los 2 m, donde se obtiene un material heterogéneo limoso a limo arenoso con bloques de roca de color gris y negro, humedad media y consistencia baja.

6.3. MARCO LEGAL

6.3.1. Especificaciones IDU

Estas especificaciones generales de construcción forman parte de los contratos realizados por el Instituto de Desarrollo Urbano para la construcción, rehabilitación, mejoramiento y conservación de la infraestructura vial y espacio público de Bogotá D.C.; en el contenido de estas especificaciones se encuentran los siguientes capítulos: 1.Aspectos Generales, 2.Materiales Básicos, 3.Excavaciones y Rellenos,4.Subbases y bases, 5.Revestimientos Asfálticos, 6.Concreto y 7.Espacio Público, los cuales dan la base para trabajos que no estén avalados por especificaciones particulares o especificaciones propias del contrato.

6.3.2. American Society for Testing and Materials (ASTM)

American Society for Testing and Materials (ASTM) es uno de los editores técnicos de normas, artículos y documentos técnicos e información relacionada más reconocido del mundo, cuenta con más de 13000 normas, que pueden ser utilizadas en todo el mundo y aproximadamente 60 países utilizan las normas ASTM como base para sus reglamentos técnicos, y más del 40% de las normas de ASTM se venden fuera de los Estados Unidos; en el caso de Colombia las Normas vigentes del Instituto de Desarrollo Urbano para la construcción y las especificaciones del Instituto Nacional de Vías toman como base las Normas ASTM para realizar las suyas con los cambios y modificaciones al contexto Colombiano.

Tabla 1 Normas ASTM.

NORMA	DESCRIPCIÓN
ASTM D5311/D5311M – 13 Método de prueba	Este ensayo consiste en someter un espécimen de suelo a un esfuerzo de confinamiento, para luego aplicarle un esfuerzo axial cíclico de magnitud y frecuencia determinada, esta es una

estándar para el ensayo de triaxial cíclico	prueba de fuerza triaxial cíclica que se utiliza para evaluar la capacidad de resistencia de un suelo ante las tensiones de cizallamiento inducidas en el mismo debido a un terremoto u otra carga cíclica.
---	---

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3. NSR-10

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) es una norma técnica colombiana comisionada para reglamentar las condiciones con las que deben contar las construcciones civiles de modo que la respuesta estructural a un sismo sea favorable; en su título H ésta norma relaciona los temas sobre las excavaciones y estabilidad de taludes, con especificaciones en estructuras de contención, evaluación geotécnica, sistema constructivo de cimentaciones, excavaciones y muros de contención, amenazas por sismo las cuales recomiendan reforzamiento geotécnico y de edificaciones. En resumen, el reglamento actualiza diversos aspectos con el fin de que el diseño y construcción de las obras civiles permita que éstas sean más duraderas competitivas y seguras al implementar la aplicación de tecnología durante el análisis de las mismas.

Tabla 2 Descripción capítulo H de la NSR-10.

CAPÍTULO DE NSR-10	DESCRIPCIÓN
H.9.1-1 IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS	En este capítulo se presentan los criterios de laboratorio más aceptados para la identificación de los suelos expansivos basados en los valores de límite líquido e índice de plasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4. INVE 2007

La Tabla 3 presenta la descripción de los ensayos efectuados sobre las muestras recuperadas en la exploración del subsuelo efectuada en la Finca La Santamaría, según las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del Instituto Nacional de Vías, INVIAS²⁶, las cuales fueron tomadas como referencia para el presente Trabajo de Grado.

Tabla 3 Especificaciones Invías.

NORMA	DESCRIPCIÓN
I.N.V. E – 111 – 07 Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido	Este método describe el procedimiento para penetrar un muestreador de tubo partido con el fin de obtener una muestra representativa del suelo y una medida de la resistencia de dicho suelo a la penetración del muestreador. Este método permite obtener una muestra de suelo para investigación y ensayos de laboratorio a partir de un muestreador, el cual puede producir gran alteración en la muestra debido a deformación por corte. El método es ampliamente usado, por lo cual pueden existir correlaciones locales de la cuenta de golpes N con el comportamiento en ingeniería de obras de tierra y fundaciones.
I.N.V. E – 121 – 07 Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición	Este método sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en los materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico.

²⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras.

I.N.V.E 122-07 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado	Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) en el suelo, roca y mezclas de suelo-agregado por peso; la aplicación práctica de este método es conocer la masa del agua removida al secar el espécimen de prueba cuando está húmedo hasta peso constante en un horno controlado a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$; después de esto se determina el valor de la masa de agua del material permanente después del secado en el horno, el cual corresponde a la masa de las partículas sólidas. El contenido de agua se calcula relacionando la masa del agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.
I.N.V. E – 124 – 07 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro	Este cubre las determinaciones cuantitativas de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos, con el fin de identificar el porcentaje de limos y arcillas. Este método se basa en la sedimentación de un material en suspensión en un líquido, por lo que el hidrómetro determina la variación de la densidad de la suspensión con el transcurso del tiempo y mide la altura de caída del gramo de tamaño más grande correspondiente a la densidad media.
I.N.V.E 125 – 07 Determinación del límite líquido de los suelos	Para la determinación del límite líquido existen dos métodos: Método A: se toma una muestra con una

	masa de aprox. 100 g de material que pase por el tamiz No 4, se coloca el material húmedo en una cazuela de cobre y se procede a abrir una ranura por la mitad, se generan un número de golpes inferior a 25 hasta que el material vuelva a unirse. Método B: se toma una muestra con una masa de aprox. 50 g y se hace el mismo procedimiento del método A, el número de golpes que se aceptan está entre 22 y 28 golpes.
I.N.V.E 126 – 07 Límite e índice de plasticidad de suelos	La finalidad de este método es conocer el contenido más bajo de agua en el cual el suelo permanece en estado plástico, que es llamado límite plástico; así mismo se puede definir el índice de plasticidad, que permite establecer el tamaño del intervalo de contenido de agua dentro del cual el material está en un estado plástico.
I.N.V.E 128 – 07 Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral	Este método de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos por medio de un picnómetro. Cuando el valor de gravedad específica sea utilizado en cálculos relacionados con la porción hidrométrica de Análisis Granulométrico de suelos, la gravedad específica se debe determinar de la porción de suelo que pasa el tamiz No 10 (2,00 mm).
I.N.V.E 151 – 07	Este método se refiere al procedimiento

Consolidación Unidimensional De Los Suelos	para determinar la rata y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se drenan axialmente mientras se someten a incrementos controlados de esfuerzo vertical. Dos procedimientos como alternativa a la realización del ensayo son presentados: Método A: Este procedimiento es desarrollado con incremento de carga constante durante veinticuatro (24) horas o un múltiplo de este. Método B: En este procedimiento las lecturas de tiempo deformación son requeridas para todos los incrementos de carga. Una vez alcanzado el 100% de la consolidación primaria, se aplican incrementos sucesivos de carga o en incrementos constantes de tiempo como se describe en el método A.
I.N.V.E 152 – 07 Compresión Inconfinada de muestras de suelo	El objeto de esta norma es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfinada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remoldeadas aplicando carga axial, para ello se usa cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada. Este ensayo se emplea únicamente para suelos cohesivos, ya que en un suelo carente de cohesión no puede formarse una proveta sin

	confinamiento lateral.
I.N.V.E 153 – 7 Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión Triaxial	Los métodos descritos en esta norma se refieren a la determinación de los parámetros de resistencia de los suelos mediante el ensayo de compresión triaxial. Los métodos descritos son: el ensayo no consolidado no drenado (UU) con o sin medición de las presiones de poros y el ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) con o sin medición de la presión de poros. Los parámetros obtenidos son la cohesión no drenada del suelo (C_u), el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c) respectivamente para cada tipo de ensayo, al medirse las presiones de agua en los poros se podrá calcular los valores efectivos de la fricción interna y la cohesión (ϕ' y c').
I.N.V. E – 154 – 07 Método de corte directo (CD) (Consolidado Drenado)	Puede ser desarrollado con un corte sencillo o un corte doble y es posible realizarlo sobre todos los tipos de suelos, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas. El ensayo es útil para la determinación de la máxima resistencia al corte y la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia en el material.

Fuente: Elaboración propia.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1. ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que requiere de modelos matemáticos y cálculos geotécnicos para la caracterización del subsuelo que permita el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos hechos a las muestras recogidas.

La investigación es de tipo experimental ya que requiere de la aplicación de técnicas controladas que permitan obtener las características del subsuelo y analizar su comportamiento frente a la realización de obras civiles por medio de diferentes ensayos geotécnicos.

7.2. FASES DE INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrollará en cuatro fases, las cuales contemplan las actividades correspondientes para determinar la caracterización y análisis de los resultados del subsuelo.

7.2.1. Fase I. Información previa y reconocimiento

7.2.1.1. Información previa

Se realiza la revisión de bibliografía que permita recolectar los conocimientos necesarios para fundamentar la investigación que se va a llevar a cabo, encontrando estudios relacionados a la caracterización del subsuelo que puedan servir como antecedentes.

7.2.1.2. Reconocimiento de campo in situ

Mediante una visita se realiza el reconocimiento del terreno teniendo en cuenta las cualidades físicas y geológicas con el fin de determinar la ubicación de los lugares más apropiados en donde se realizará la extracción de las muestras a ensayar.

7.2.2. Fase II. Ensayos en campo y laboratorio

Se desarrollan los ensayos de campo y laboratorio teniendo en cuenta las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (I.N.V.E 2007), las NSR-10 y las ASTM de acuerdo al ensayo realizado, siendo esta la normativa usualmente utilizada en Colombia para la realización de los ensayos requeridos en la presente investigación.

7.2.2.1. Ensayos de Campo.

- Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

7.2.2.2. Ensayos de Laboratorio.

- Ensayos de Caracterización Física.
 - Límites Atterberg.
 - Humedad Natural.
 - Granulometría por hidrómetro.
 - Gravedad Específica.
 - Contenido Orgánico.
 - Peso Unitario Parafinado.
- Ensayos de Caracterización Mecánica.
 - Corte Directo.
 - Consolidación Unidimensional.
 - Compresión Inconfinada.
 - Triaxial Estático.
- Ensayos de Caracterización Dinámica.
 - Triaxial Dinámico.

7.2.3. Fase III. Realización cálculos y obtención de resultados

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos se desarrollan los cálculos pertinentes a las especificaciones dadas por el INVIAS y demás

mencionadas en el marco jurídico que permiten establecer las propiedades que caracterizan el subsuelo de la zona en estudio.

7.2.4. Fase IV. Discusión de los resultados y conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se realiza la comparación entre las características propias del subsuelo que se ensayó y las características que tiene dicho subsuelo en la teoría con base de las consultas realizadas y aportes de la literatura, generando así un respectivo análisis en donde se demuestre la veracidad y utilidad en el campo del diseño para obras civiles.

7.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

7.3.1. Determinación del límite líquido de los suelos

7.3.1.1. Cazuela de Casagrande

Consiste en una cazuela de bronce de dimensiones normalizadas, esta cuenta con un sistema de rotación de velocidad constante que cae libremente y se cuenta el número de golpes necesarios para cerrar una zanja hecha al material de ensayo.

Figura 11 Cazuela Casagrande e instrumentos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Determinación del límite plástico de los suelos

7.3.2.1. Recipientes límite plástico

Figura 12 Límite plástico.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.3. Determinación del contenido de agua en laboratorio

7.3.3.1. Balanza

Con la capacidad de pesar las muestras que se requiera.

Figura 13 Balanza de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.2. Horno

Controlado termostáticamente, preferiblemente de tiro forzado y que mantenga una temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$) en toda la cámara de secado.

Figura 14 Horno de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.4. Granulometría por Hidrómetro

7.3.4.1. Hidrómetro

Instrumento usado para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados que permanecen en suspensión en un determinado tiempo, consiste en un cilindro hueco hecho de vidrio con un bulbo pesado en su extremo para que pueda flotar en posición vertical. El hidrómetro 152 H de la norma ASTM E 100 tiene una escala graduada para leer los gramos por litro de suspensión, ésta tiene valores de gramos de suelo por litro (g/l) que van de -5 a +60 y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20°C (68°F) y que el suelo en suspensión tiene una gravedad específica de 2.65.

Figura 15 Hidrómetro 152H.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.4.2. Tubo Sedimentador

Figura 16 Tubo Sedimentador.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.5. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral

7.3.5.1. Picnómetros

Los picnómetros utilizados deben de ser un frasco con tapón o un frasco volumétrico con una capacidad de 250 ml. El volumen del picnómetro debe de ser de 2 a 3 veces mayor que el volumen del material con agua usado en el ensayo.

Figura 17 Picnómetros de laboratorio.



Fuente:Elaboración propia.

7.3.6. Determinación del contenido orgánico en suelos

7.3.6.1. Mufla

Es un tipo de horno que puede alcanzar temperaturas muy altas y se encuentra equipado con un control digital que se encarga de regular la temperatura; es utilizado en laboratorios para realizar pruebas de calcinamiento de muestras, incineración, tratamientos térmicos, entre otros.

Figura 18 Mufla.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.7. Peso unitario parafinado

7.3.7.1. Balanza Hidrostática

Figura 19 Balanza Hidrostática.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.8. Corte directo

7.3.8.1. Caja de Corte

Esta puede ser redonda o cuadrada; deberá ser de acero inoxidable, bronce o aluminio, con los accesorios necesarios para el drenaje por la parte de arriba y por el fondo. Adicionalmente la caja de corte también deberá poseer tornillos que controlen el espaciamiento entre el marco superior y el inferior.

Figura 20 Caja de Corte de laboratorio.



Fuente:Elaboración propia.

7.3.8.2. Máquina de Corte

Figura 21 Máquina de Corte.



Fuente: Elaboración propia.

7.3.9. Consolidación y curvas de consolidación

7.3.9.1. Dispositivos de carga

Es un dispositivo adecuado para aplicar cargas verticales a la muestra, este debe ser capaz de mantener las cargas especificadas durante períodos prolongados.

7.3.9.2. Consolidómetro

Es un dispositivo para mantener la muestra dentro de un anillo el cual puede estar fijado a la base o puede ser flotante con piedras porosas sobre cada cara de la muestra.

7.3.9.3. Cizalla o cortador cilíndrico

Se usa para tallar la muestra hasta el diámetro interior del anillo del consolidómetro, este cortador debe tener una superficie altamente pulida.

7.3.9.4. Aparato de compresión

Conformado por una prensa con suficiente capacidad de proporcionar la velocidad de la carga de forma controlada manual o mecánicamente hasta lograr llevar el material a su falla. Esta máquina tiene incorporado la medición de carga aplicada y el desplazamiento que produce la misma al material.

7.3.9.5. Dispositivo de aplicación de carga

El dispositivo de carga axial puede ser cualquier aparato de compresión u otro tipo con la suficiente capacidad y el adecuado control para proporcionar la velocidad de carga prescrita.

Figura 22 Máquina de consolidación.



Fuente:Elaboración propia.

7.3.10. Compresión Inconfinada

7.3.10.1. Aparato o Dispositivo de Corte

Este aparato debe estar provisto de los dispositivos necesarios para aplicar una fuerza normal en las caras de la muestra para determinar los cambios en el espesor de la muestra y permitir el drenaje del agua. Este debe ser capaz de aplicar y medir una fuerza de corte para hacer fallar la muestra a lo largo de un determinado plano (corte simple) o de determinados planos (corte doble), los cuales serán paralelos a las caras de la muestra y determinar los desplazamientos laterales de ésta.

Figura 23 Máquina de Corte Directo.



Fuente:Elaboración propia.

7.3.11. Triaxial estático y dinámico

7.3.11.1. Dispositivo para medir la carga axial

Podrá ser un anillo de carga, una celda electrónica de carga, o cualquier otro dispositivo capaz de medir con una precisión la carga axial anticipada de falla.

7.3.11.2. Amplificador

Esta aumenta las señales eléctricas de la cámara de carga de manera que sean suficientemente grandes para que puedan ser detectadas mediante un voltímetro digital o un registrador gráfico de tira.

7.3.11.3. Voltímetro

Este puede ser digital o registrador gráfico y es usado para la medición de la carga o presión.

7.3.11.4. Indicador de deformación vertical

El indicador de deformación vertical del espécimen podrá ser cualquier dispositivo de medida que cumpla los requisitos generales descritos en la norma I.N.V.E. 153-07.

7.3.11.5. Cámara de Compresión Triaxial

Empleada para contener el espécimen y el fluido de confinamiento durante el ensayo.

7.3.11.6. Dispositivos para la medición de la presión y el vacío

Los dispositivos de medición para la presión de la cámara, la contrapresión y el vacío, podrán ser cualquier clase de dispositivo que cumpla la precisión requerida.

7.3.11.7. Dispositivo para la medición del cambio de volumen

El dispositivo que medirá la cantidad de volumen de agua que entrará o drenará de la muestra.

Figura 24 Maquina triaxial y dispositivos complementarios.



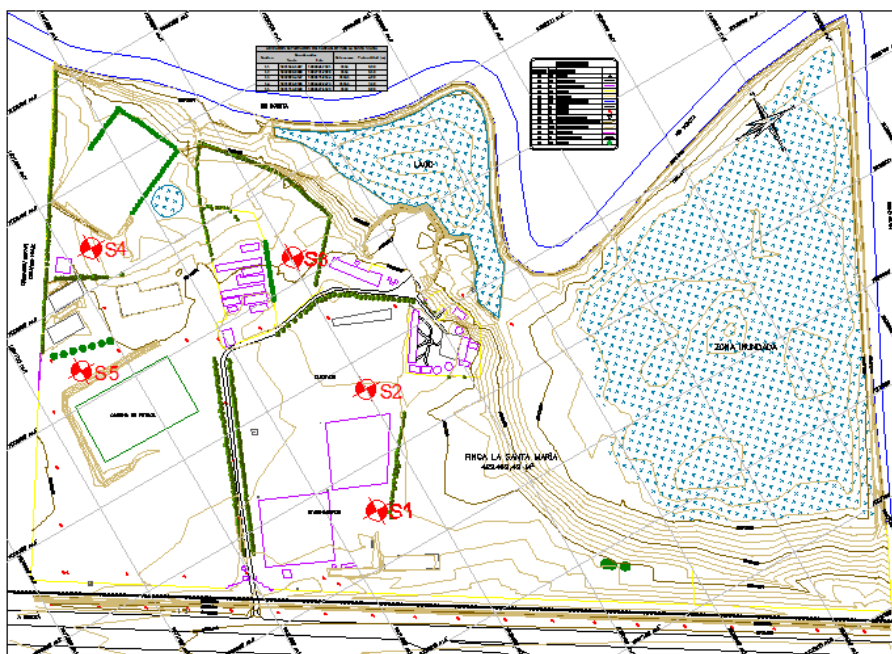
Fuente:Elaboración propia.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.2. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

El estudio de campo realizado para la caracterización del subsuelo y la determinación de las condiciones físicas, mecánicas y dinámicas del mismo consistió en cinco (5) perforaciones con equipo de penetración manual, durante esos sondeos se recuperaron muestras inalteradas con tubo Shelby y remoldeadas con el tubo Split Spoon durante el Ensayo de Penetración Estándar, SPT; dichos sondeos se ubicaron de tal forma que se abarcará la totalidad de la zona de estudio ubicando los sondeos en cinco (5) sitios como se observa en la Figura 25.

Figura 25 Plano de Ubicación de Sondeos.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se resume la profundidad explorada, coordenadas, cota y nivel freático de los sondeos ejecutados en la zona de estudio, esta tabla

junto al plano de ubicación de los sondeos se podrá encontrar en el ANEXO B.

Tabla 4 Profundidad y Nivel Freático de los sondeos realizados.

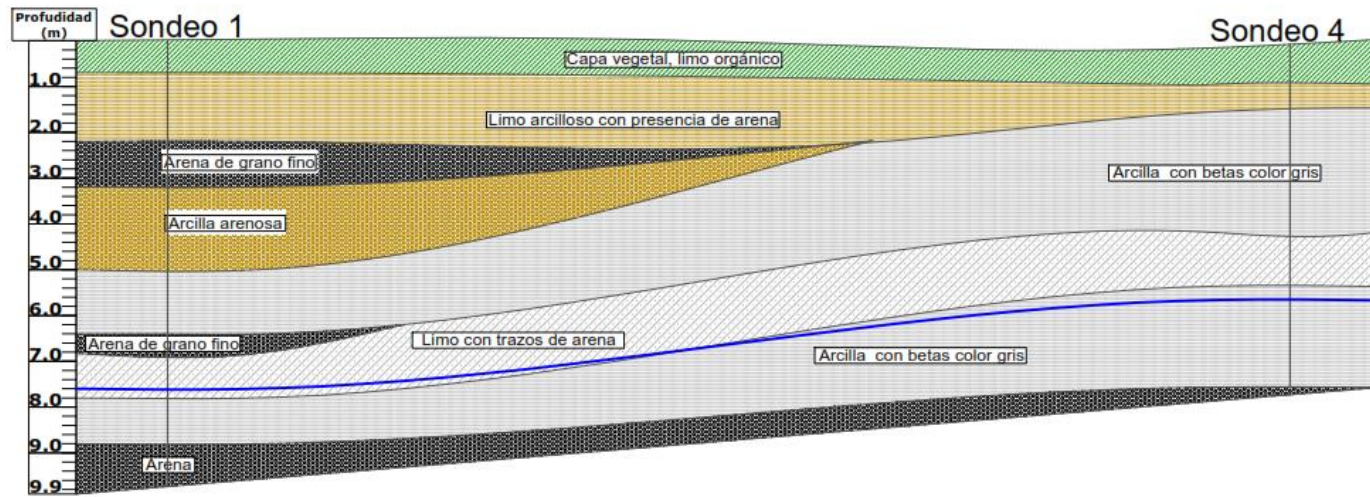
UBICACIÓN EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO FINCA LA SANTA MARÍA					
Sondeo	Coordenadas		Cota msnm	Profundidad (m)	Nivel Freático (m)
	Norte	Este			
S1	1031946.5657	1006845.7501	2553	9.90	7.6
S2	1032000.0000	1006731.2920	2553	9.50	8
S3	1032002.4147	1006575.0534	2552.5	4.90	No encontrado
S4	1031826.0186	1006462.2473	2551.5	7.60	5.7
S5	1031753.8530	1006567.5529	2552	9.00	No encontrado

Fuente: Elaboración propia.

En cada sondeo se elaboró el registro de perforación, los cuales pueden observarse en el ANEXO C, en dichos registros se relacionó la información de profundidad en metros, la nomenclatura de las muestras recuperadas, el tipo de muestra, la profundidad del nivel freático (N.F.) en metros, la descripción geológica y el registro del número de golpes necesarios para penetrar seis (6) pulgadas en los ensayos de Penetración Estándar, SPT.

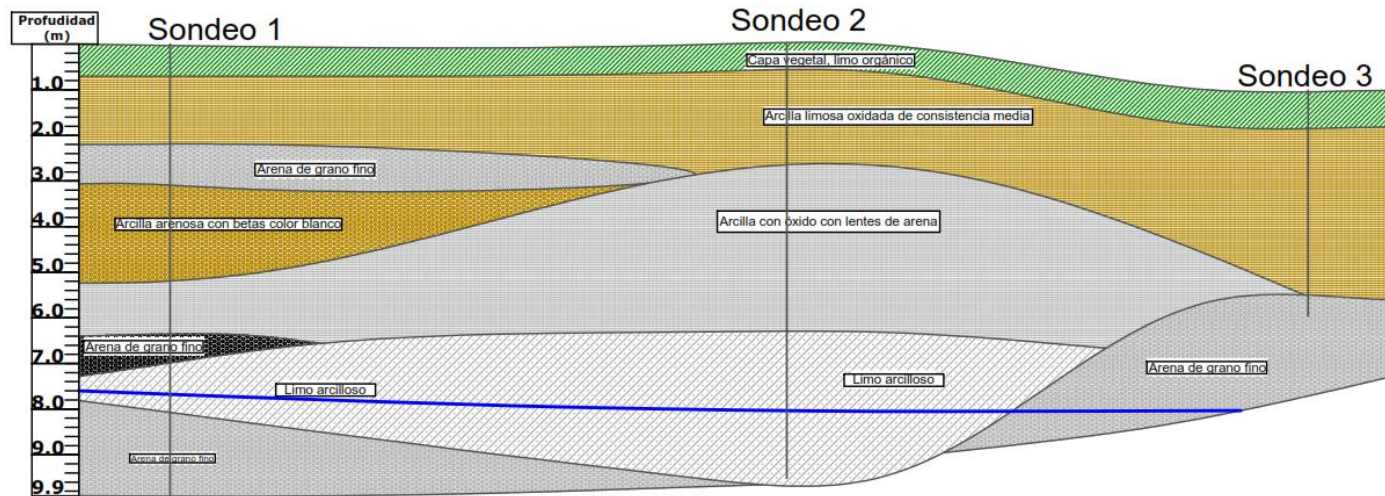
A continuación se presenta el perfil estratigráfico del área del proyecto elaborado en función de los resultados de la campaña de exploración ejecutada, la Figura 26 corresponde al perfil realizado a partir del sondeo 1 y del sondeo 4, el cual se encuentra alineado en sentido NW, y la Figura 27 es el perfil estratigráfico de los sondeos 1, 2 y 3 que se encuentra alineado en sentido EW.

Figura 26 Perfil Estratigráfico Finca "La Santa María", Sondeo 1 y 4.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27 Perfil Estratigráfico Finca "La Santa María", Sondeo 1, 2 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

8.3. Ensayos de campo

Durante las labores de campo se realizaron ensayos de penetración estándar, SPT, en cada uno de los sondeos efectuados como ya se había mencionado, esto con el fin de tener un criterio previo de las características mecánicas de los materiales que componen el perfil de subsuelo de la Finca La Santa María. Se presenta a continuación el resumen de las pruebas de SPT ejecutadas en cada uno de los sondeos.

Tabla 5 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 1.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	SPT (número de golpes)				N.F. (m)
									N (6")	N (12")	N (18")	N de Campo	
SONDEO 1	0.00	-	0.70		0.70	0.35		Capa Vegetal, Limo Orgánico, Raíces					7.6
	0.70	-	1.10	1.0	0.40	0.90	SPT	Limo Arcilloso, Consistencia Firme, Color Marrón, Seca.	7	11	14	25	
	1.40	-	1.80	2.0	0.40	1.60	SPT	Limo Arcilloso, Consistencia Firme, Color Marrón, Seca.	2	5	3	8	
	1.80	-	2.20	2.1	0.40	2.00	B	Limo Arcilloso, Consistencia Media, Color Habano Claro.					
	1.80	-	2.20	3.0	0.40	2.00	SH	Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)	1	3	3	6	
	3.90	-	4.40	4.0	0.50	4.15		Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)					
	5.00	-	5.60	5.0	0.60	5.30	SPT	Arcilla habana Oscura, Pocos lentes de Arena, Presencia de Material Blanco.	2	1	2	3	
	5.60	-	6.10	5.1	0.50	5.85	B	Arcilla Habana clara, Punta Gris					
	6.10	-	6.40	6.0	0.30	6.25	SH	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad					
	6.70	-	7.10	7.0	0.40	6.90	SH	Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad					
	7.10	-	7.70	8.0	0.60	7.40	SPT	Limo Oscuro	6	4	3	7	
	7.70	-	7.80	8.1	0.10	7.75	B	Limo con capa intermedia de Arena (2 muestras)					
	7.80	-	8.20	9.0	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena					
	7.80	-	8.20	9.1	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena					
	8.20	-	8.80	9.2	0.60	8.50	B	Limpieza Arcilla Gris con Lentes de arena					
	8.80	-	9.30	10.0	0.50	9.05	SH	Se introdujo el Shelby y se encontró arena gris con gran cantidad de agua por lo que se recuperó en bolsa.					
	9.30		9.70	11.0	0.40	9.50	SPT	Se encontró hasta 9.70 arena gris	1	3	3	6	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 2.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	SPT (número de golpes)				N.F. (m)
									N (6")	N (12")	N (18")	N de Campo	
SONDEO 2	0.00	-	0.60		0.60	0.30		Se realiza el descapote inmediatamente se observó arcilla amarilla con óxido					8
	0.60	-	1.20	1.0	0.60	0.90	SPT	Arcilla color habana oxidada	2	5	4	9	
	1.20	-	1.60	1.1	0.40	1.40	B	Arcilla habana con óxido					
	1.60	-	2.00	2.0	0.40	1.80	SH	Arcilla habana con óxido					
	2.80	-	3.40	3.0	0.60	3.10	SPT	Arcilla habana con óxido	1	1	1	2	
	3.40	-	4.30	3.1	0.90	3.85	B	Limpieza, Arcilla habana con oxido se toma muestra de 4.10 a 4.30					
	4.30	-	4.70	4.0	0.40	4.50	SPT	Arcilla habana con un lente bajo de arena	4	7	5	12	
	4.30	-	4.70	4.1	0.40	4.50	B	Se tomó muestra 4.1 m , Arcilla con bajos lentes de limo con oxido					
	4.70	-	5.50	4.2	0.80	5.10	B	Limpieza - Arcilla habana con vetas color gris					
	5.50	-	5.80	5.0	0.30	5.65	SH	Arcilla gris					
	6.00	-	6.60	5.1	0.60	6.30	B	Limpieza arcilla gris oscuro, limo					
	6.90	-	7.30	6.0	0.40	7.10	SH	Limo orgánico gris oscuro					
	7.70	-	8.10	7.0	0.40	7.90	SH	Limo verdoso					
	8.10	-	8.80	7.1	0.70	8.45	B	Limpieza limo verdoso					
	8.90	-	9.50	8.0	0.60	9.20	SPT	Limo verde	6	9	7	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 3.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	SPT (número de golpes)				N.F. (m)
									N (6")	N (12")	N (18")	N de Campo	
SONDEO 3	0.00	-	0.80		0.80	0.40		Capa vegetal, limo orgánico y raíces					No Encontrado
	0.80	-	1.10	1.0	0.30	0.95	B	Arcilla habana clara, ocas Raíces, Consistencia firme, Presencia de Limo Orgánico					
	1.70	-	2.20	2.0	0.50	1.95	SPT	Arcilla habana clara con vetas de óxido, Consistencia Media	2	3	6	9	
	2.50	-	2.90	3.0	0.40	2.70	SPT	Arcilla limosa, grandes vetas de oxido	2	3	4	7	
	3.40	-	4.00	4.0	0.60	3.70	SPT	Arcilla Consistencia Firme, Color Habana Oscura oxidada con lentes de arena	3	3	4	7	
	4.60	-	4.90	5.0	0.30	4.75	SH	Arena, difícil recuperación					

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 4.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	SPT (número de golpes)				N. F. (m)
									N (6")	N (12")	N (18")	N de Campo	
SONDEO 4	0.00	-	0.10		0.10	0.05		Descapote, Capa vegetal aparentemente relleno de abono por causa de cultivo					5.7
	1.00	-	1.40	1.0	0.40	1.20	SPT	Arcilla limosa de consistencia firme, color habano con pequeña presencia de raíces y vetas de óxido.	2	2	2	4	
	1.40	-	2.40	1.1	1.00	1.90	B	Arcilla limosa con contenido de oxido					
	2.80	-	3.30	2.0	0.50	3.05	SH	Arcilla Color Habana con gran oxidación a la anterior.					
	3.70	-	3.90	2.1	0.20	3.80	B	Arcilla de color habano claro, poco oxido					
	4.00	-	4.50	3.0	0.50	4.25	SPT	Arcilla de consistencia media de color habano claro y presencia de óxido	1	1	1	2	
	4.80	-	5.30	3.1	0.50	5.05	B	Arcilla oxidada Oscura					
	5.30	-	5.70	4.0	0.40	5.50	SPT	Arcilla seca con presencia de óxido color habana oscura	1	2	2	4	
	6.20	-	6.60	4.1	0.40	6.40	B	Arcilla totalmente gris					
	6.60	-	7.60	5.0	1.00	7.10	B	Arcilla gris con presencia de arena					

Fuente: Elaboración propia.

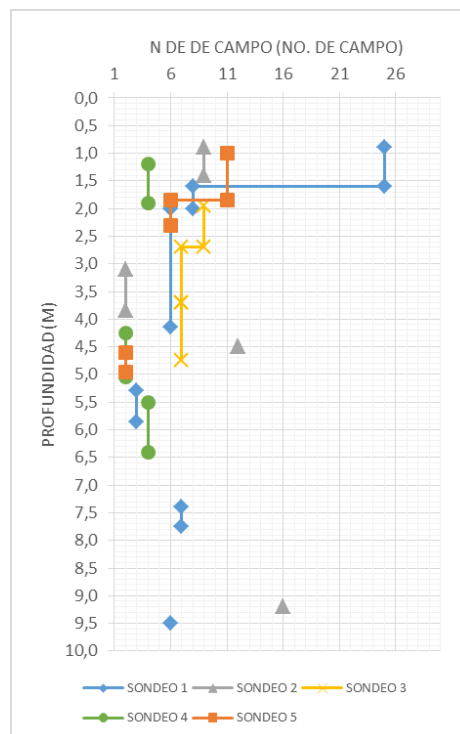
Tabla 9 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT); Sondeo 5.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	SPT (número de golpes)				N.F. (m)
									N (6")	N (12")	N (18")	N de Campo	
SONDEO 5	0.00	-	0.30		0.30	0.15		Pasto Kikuyo, limo orgánico y raíces					No Encontrado
	0.30	-	0.50	1.0	0.20	0.40	B	Arcilla limosa color marrón, apariencia expansiva consistencia firme con presencia de raíces.					
	0.80	-	1.20	2.0	0.40	1.00	SPT	Arcilla color habana con presencia de óxido, de consistencia firme y pequeña presencia de raíces	4	6	5	11	
	1.60	-	2.10	3.0	0.50	1.85	SPT	Arcilla color habano, aparecen lentes finos de arena en los últimos 0,10 m	3	3	3	6	
	2.10	-	2.50	4.0	0.40	2.30	SH	Arcilla con lentes de arena					
	3.30	-	3.70	5.0	0.40	3.50	SH	Arcilla color habano oscuro					
	3.70	-	4.30	5.1	0.60	4.00	B	Arcilla de tonalidad más oscura, se detecta en la limpieza del barreno					
	4.30	-	4.90	6.0	0.60	4.60	SPT	Arcilla café vetas negras, lentes de arena, Con el solo peso del golpeador se empieza a hundir	1	1	1	2	
	4.90	-	5.00	6.1	0.10	4.95	B	Se toma muestra y la arcilla empieza a tener una tonalidad más oscura a mayor profundidad					
	5.00	-	5.50	7.0	0.50	5.25	SH	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media					
	5.70	-	6.20	7.1	0.50	5.95	B	Arcilla habana con vetas de tonalidad gris					
	6.80	-	7.30	8.0	0.50	7.05	SH	Arcilla de color gris de consistencia media					
	7.60	-	8.00	8.1	0.40	7.80	B	Arcilla gris oscura de consistencia media					
	8.00	-	8.30	8.2	0.30	8.15	B	Limo con presencia de arena de grano fino					
	8.30	-	9.00	9.0	0.70	8.65	SPT	Arena gris de grano fino	13	22	22	44	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la gráfica 1, en la que se relaciona el N de campo (Sumatoria del número de golpes necesarios para penetrar el suelo en 12 y 18 pulgadas) de los ensayos efectuados con la profundidad. Con base en éste es posible determinar las profundidades a las cuales se registra un cambio de material y así obtener una herramienta adicional al momento de establecer los criterios para definición de fronteras entre los diferentes tipos de suelos presentes en la zona en estudio, en este caso particular se ve una tendencia similar en los materiales que se encuentran a partir del primer metro de profundidad hasta 4.8 metros donde se encuentra una media de 6 golpes lo cual corresponde a un material de consistencia media, dentro de la gráfica se pueden ver dos variaciones notorias al principio del sondeo 1 (uno) donde se encuentra un material compacto y en las ultimas profundidades hay presencia de materiales de consistencia blanda, esto puede deberse al nivel freático encontrado en el terreno y que se justifica por la cercanía con el río Bogotá.

Gráfica 1 Variación del N de Campo vs profundidad de los sondeos realizados.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.1. Obtención del ángulo de fricción a partir del SPT.

A partir de los resultados del Ensayo de Penetración Estándar SPT, se puede determinar los parámetros de resistencia haciendo uso de correlaciones matemáticas; estos resultados del SPT deben ser corregidos por medio de la metodología de González planteada en 1999, para las que se debe tener en cuenta la siguiente expresión general:

Ecuación 4 Corrección resultados SPT.

$$N_{CRR} = N \times C_n \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4$$

Donde: N_{CRR} es el Valor de N Corregido, N es el Valor de N de campo, C_n es el Factor de corrección por confinamiento efectivo, η_1 es el Factor por energía del martillo ($0.45 < \eta_1 < 1$), η_2 Factor por longitud de la varilla ($0.75 < \eta_2 < 1$), η_3 es el Factor por revestimiento interno de toma muestras ($0.8 < \eta_3 < 1$) y η_4 es el Factor por diámetro de la perforación.

Cada uno de los factores que alimenta esta expresión se obtiene de la siguiente manera:

- **Corrección por confinamiento (sobrecarga)**

Este factor de corrección fue definido por Gibbs & Holz 1957 y se calcula de la siguiente manera por medio del factor C_n :

Ecuación 5 Factor de corrección por confinamiento.

$$N_{corr} = N_1 = C_n \times N$$

Existen propuestas de varios autores para el factor de corrección por confinamiento del SPT, entre las que se destacan la de la Tabla 10, comentando que el parámetro R_s definido por $R_s = \frac{\sigma'_v}{p_a}$, esta estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia $\sigma_{vr} = 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmósfera} = 1 p_a$.

Tabla 10 Propuestas de autores para el factor de corrección por confinamiento.

FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONFINAMIENTO	
Peck	$C_n = \frac{\text{Log}\left(\frac{20}{R_s}\right)}{\text{Log}(20)}$
Seed	$C_n = 1 - 1.25 \text{Log}(R_s)$
Meyerhoff-Ishihara	$C_n = \left(\frac{1.70}{0.7 + R_s}\right)$
Liao & Witman	$C_n = \sqrt{\left(\frac{1}{R_s}\right)}$
Skempton	$C_n = \left(\frac{2}{1 + R_s}\right)$
González	$C_n = \log\left(\frac{10}{R_s}\right)$

Fuente: Elaboración propia.

- **Corrección por energía (η_1)**

Ecuación 6 Skempton, 1953, $e_1=60\%$

$$N_{e1} = N_{e2} \times \left(\frac{e_2}{e_1}\right) = N_{60} = N_{45} \left(\frac{45}{60}\right) = 0.75 N_{45}$$

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de las correcciones planteadas por confinamiento y energía que se efectuó para la totalidad de muestras a las cuales se les realizó Ensayo de Penetración Estándar.

Tabla 11 Cálculo de correcciones para el N de Campo.

SONDEO	Profundidad de la muestra (m)				Esfuerzo Vertical Total y Efectivo						SPT	Factores de corrección Cn								h1	N Corregido
	Inicial	Final	Media	Tipo de Material	γ (ton/m ³)	σ_v (ton/m ²)	N.F (m)	μ_w (ton/m ²)	σ'_v (ton/m ²)	R _s	N. Campo (golpes/pie)	Peck	Seed	Meyerhof-Ishihara	Liao-Whitman	Skempton	Seed-Idriss	González	Promedio	Colombia	(golpes/pie)
Sondeo 1	0,7	1,1	0,90	Limo habano	1,75	1,58	7,6	0,00	1,58	0,21	25	1,52	1,85	1,87	2,19	1,65	1,96	1,68	1,82	0,6	27
	1,4	1,8	1,60		1,65	2,64	7,6	0,00	2,64	0,35	8	1,35	1,57	1,62	1,69	1,48	1,64	1,46	1,54	0,6	7
	1,8	2,2	2,00		1,65	3,30	7,6	0,00	3,30	0,44	6	1,28	1,45	1,49	1,51	1,39	1,51	1,36	1,43	0,6	5
	5,0	5,6	5,30	Arcilla habana	1,65	8,75	7,6	0,00	8,75	1,16	3	0,95	0,92	0,91	0,93	0,93	0,94	0,94	0,93	0,6	2
	7,1	7,7	7,40		1,65	12,21	7,6	0,00	12,21	1,62	7	0,84	0,74	0,73	0,79	0,76	0,81	0,79	0,78	0,6	3
	9,3	9,7	9,50		1,65	15,68	7,6	1,90	13,78	1,83	6	0,80	0,67	0,67	0,74	0,71	0,76	0,74	0,73	0,6	3
Sondeo 2	0,6	1,2	0,90	Limo habano	1,65	1,49	8,0	0,00	1,49	0,20	9	1,54	1,88	1,89	2,25	1,67	1,99	1,71	1,85	0,6	10
	2,8	3,4	3,10	Arcilla habana	1,65	5,12	8,0	0,00	5,12	0,68	2	1,13	1,21	1,23	1,21	1,19	1,24	1,17	1,20	0,6	1
	4,3	4,7	4,50		1,65	7,43	8,0	0,00	7,43	0,99	12	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	0,6	7
	8,9	9,5	9,20	Limo areno verdoso	1,65	15,18	8,0	1,20	13,98	1,86	16	0,79	0,66	0,66	0,73	0,70	0,75	0,73	0,72	0,6	7
Sondeo 3	1,7	2,2	1,95	Arcilla habana	1,65	3,22	-	0,00	3,22	0,43	9	1,28	1,46	1,51	1,53	1,40	1,52	1,37	1,44	0,6	8
	2,5	2,9	2,70		1,65	4,46	-	0,00	4,46	0,59	7	1,18	1,28	1,32	1,30	1,26	1,32	1,23	1,27	0,6	5
	3,4	4,0	3,70		1,65	6,11	-	0,00	6,11	0,81	7	1,07	1,11	1,13	1,11	1,10	1,13	1,09	1,11	0,6	5

SONDEO	Profundidad de la muestra (m)				Esfuerzo Vertical Total y Efectivo						SPT	Factores de corrección Cn								h1	N _{Corregido}
	Inicial	Final	Media	Tipo de Material	γ (ton/m ³)	σ_v (ton/m ²)	N.F (m)	μ_w (ton/m ²)	σ'_v (ton/m ²)	R_s	N. Campo (golpes/pie)	Peck	Seed	Meyerhof-Ishihara	Liao-Whitman	Skempton	Seed-Idriss	González	Promedio	Colombia	(golpes/pie)
Sondeo 4	1,0	1,4	1,20	Limo habano	1,60	1,92	5,7	0,00	1,92	0,25	4	1,46	1,74	1,78	1,98	1,59	1,84	1,59	1,71	0,6	4
	4,0	4,5	4,25	Arcilla habana	1,60	6,80	5,7	0,00	6,80	0,90	2	1,03	1,06	1,06	1,05	1,05	1,06	1,04	1,05	0,6	1
	5,3	5,7	5,50		1,60	8,80	5,7	0,00	8,80	1,17	4	0,95	0,92	0,91	0,93	0,92	0,94	0,93	0,93	0,6	2
Sondeo 5	0,8	1,2	1,00	Arcilla habana	1,60	1,60	-	0,00	1,60	0,21	11	1,52	1,84	1,86	2,17	1,65	1,95	1,67	1,81	0,6	12
	1,6	2,1	1,85		1,60	2,96	-	0,00	2,96	0,39	6	1,31	1,51	1,56	1,59	1,44	1,57	1,41	1,48	0,6	5
	4,3	4,9	4,60	Arcilla café	1,50	6,90	-	0,00	6,90	0,92	2	1,03	1,05	1,05	1,04	1,04	1,05	1,04	1,04	0,6	1
	8,3	9,0	8,65	Arena	1,85	16,00	-	0,00	16,0	2,13	44	0,75	0,59	0,60	0,69	0,64	0,70	0,67	0,66	0,6	17

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los factores de corrección, se calcula el Ángulo de fricción con las siguientes formulas:

Tabla 12 Propuestas para el cálculo del ángulo de fricción.

ÁNGULO DE FRICCIÓN EQUIVALENTE	
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{\text{corregido}}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 \left(2 - e^{-\frac{N_{\text{corregido}}}{62}} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + (12.5 N_{\text{corregido}})^{1/2}$
JNR	$\phi = 27 + 0.1875 N_{\text{corregido}}$
JRB	$\phi = 15 + (9.375 N_{\text{corregido}})^{1/2}$

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se presenta la tabla con los resultados del ángulo de fricción realizado para este proyecto, seguido de dicha tabla se expondrá la Gráfica 2 donde se observan la totalidad de resultados relacionando el esfuerzo normal (σ) contra el esfuerzo cortante (τ), esto con el fin de obtener el ángulo de fricción promedio de cada uno de los estratos que componen el perfil geotécnico establecido.

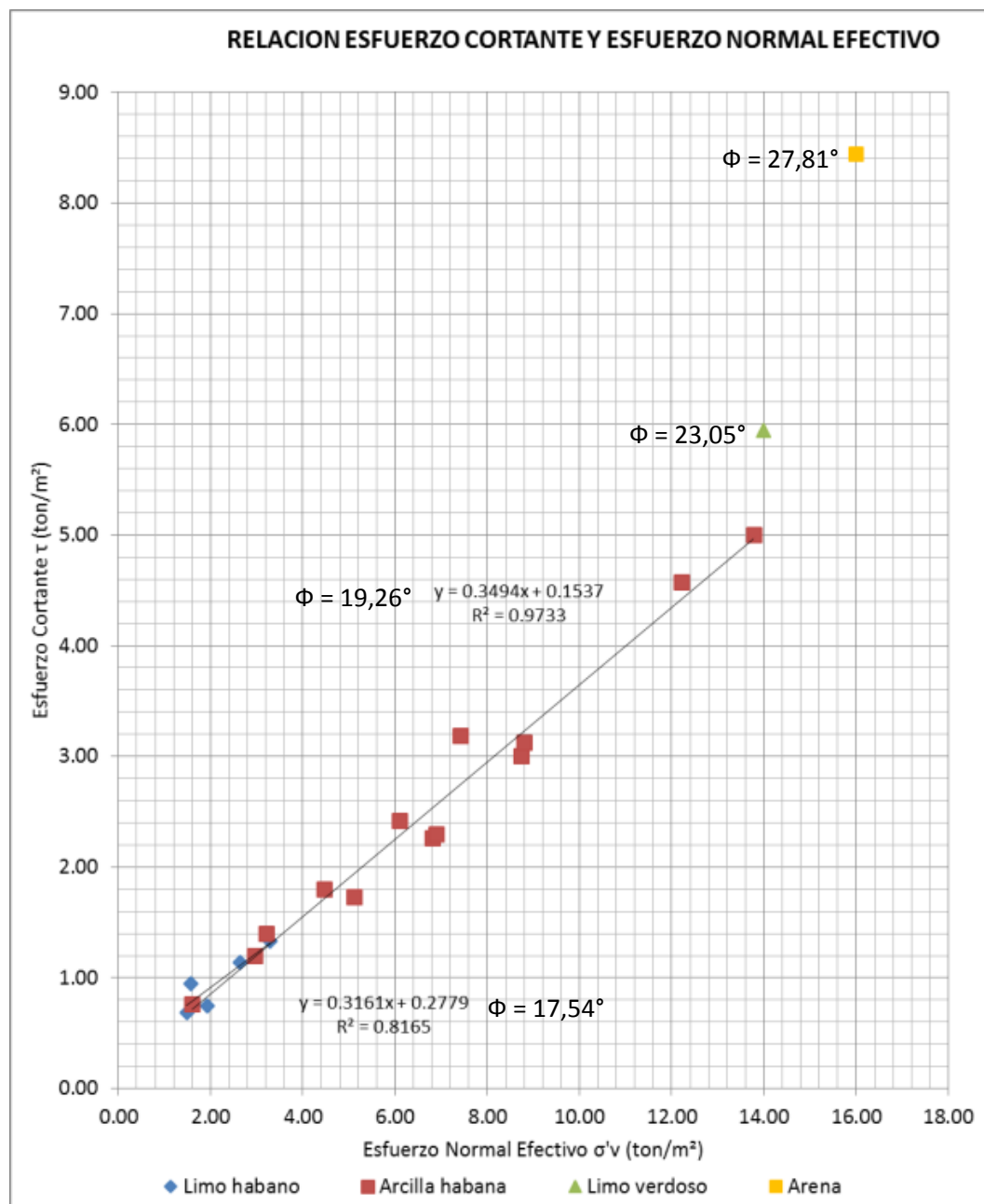
Tabla 13 Resultados Ángulo de Fricción.

Sondeo	Profundidad de la muestra (m)			Tipo de Material	ϕ' equivalente					$\sigma'v$ (ton/m ²)	τ (ton/m ²)
	Inicial	Final	Media		Peck	Peck, Hanson y Thornburn	Kishida	JNR	JRB		
Sondeo 1	0,7	1,1	0,90	Limo habano	35,31	35,59	33,46	32,11	30,99	1,58	0,95
	1,4	1,8	1,60		30,35	29,21	24,62	28,39	23,33	2,64	1,14
	1,8	2,2	2,00		29,78	28,34	23,01	27,96	21,94	3,30	1,33
	5,0	5,6	5,30	Arcilla habana	28,92	26,95	19,57	27,31	18,96	8,75	3,00

Sondeo	Profundidad de la muestra (m)			Tipo de Material	φ'equivalente					σ'v (ton/m ²)	τ (ton/m ²)
	Inicial	Final	Media		Peck	Peck, Hanson y Thornburn	Kishida	JNR	JRB		
	7,1	7,7	7,40		29,32	27,60	21,40	27,61	20,54	12,21	4,57
	9,3	9,7	9,50		29,15	27,33	20,72	27,49	19,95	13,78	5,00
Sondeo 2	0,6	1,2	0,90	Limo habano	31,00	30,15	26,17	28,87	24,67	1,49	0,68
	2,8	3,4	3,10	Arcilla habana	28,86	26,85	19,24	27,27	18,67	5,12	1,73
	4,3	4,7	4,50		30,31	29,15	24,52	28,36	23,24	7,43	3,19
	8,9	9,5	9,20	Limo areno verdoso	30,23	29,02	24,30	28,30	23,05	13,98	5,95
Sondeo 3	1,7	2,2	1,95	Arcilla habana	30,44	29,34	24,86	28,46	23,54	3,22	1,40
	2,5	2,9	2,70		29,83	28,41	23,16	28,00	22,07	4,46	1,81
	3,4	4,0	3,70		29,66	28,15	22,62	27,87	21,60	6,11	2,42
Sondeo 4	1,0	1,4	1,20	Limo habano	29,53	27,93	22,17	27,77	21,21	1,92	0,74
	4,0	4,5	4,25	Arcilla habana	28,82	26,78	18,97	27,24	18,44	6,80	2,27
	5,3	5,7	5,50		29,06	27,18	20,27	27,42	19,57	8,80	3,13
Sondeo 5	0,8	1,2	1,00	Arcilla habana	31,48	30,85	27,22	29,24	25,58	1,60	0,77
	1,6	2,1	1,85		29,83	28,42	23,17	28,00	22,07	2,96	1,20
	4,3	4,9	4,60	Arcilla café	28,81	26,78	18,96	27,23	18,43	6,90	2,30
	8,3	9,0	8,65	Arena	32,87	32,70	29,79	30,28	27,81	16,00	8,44

Fuente: Elaboración propia.

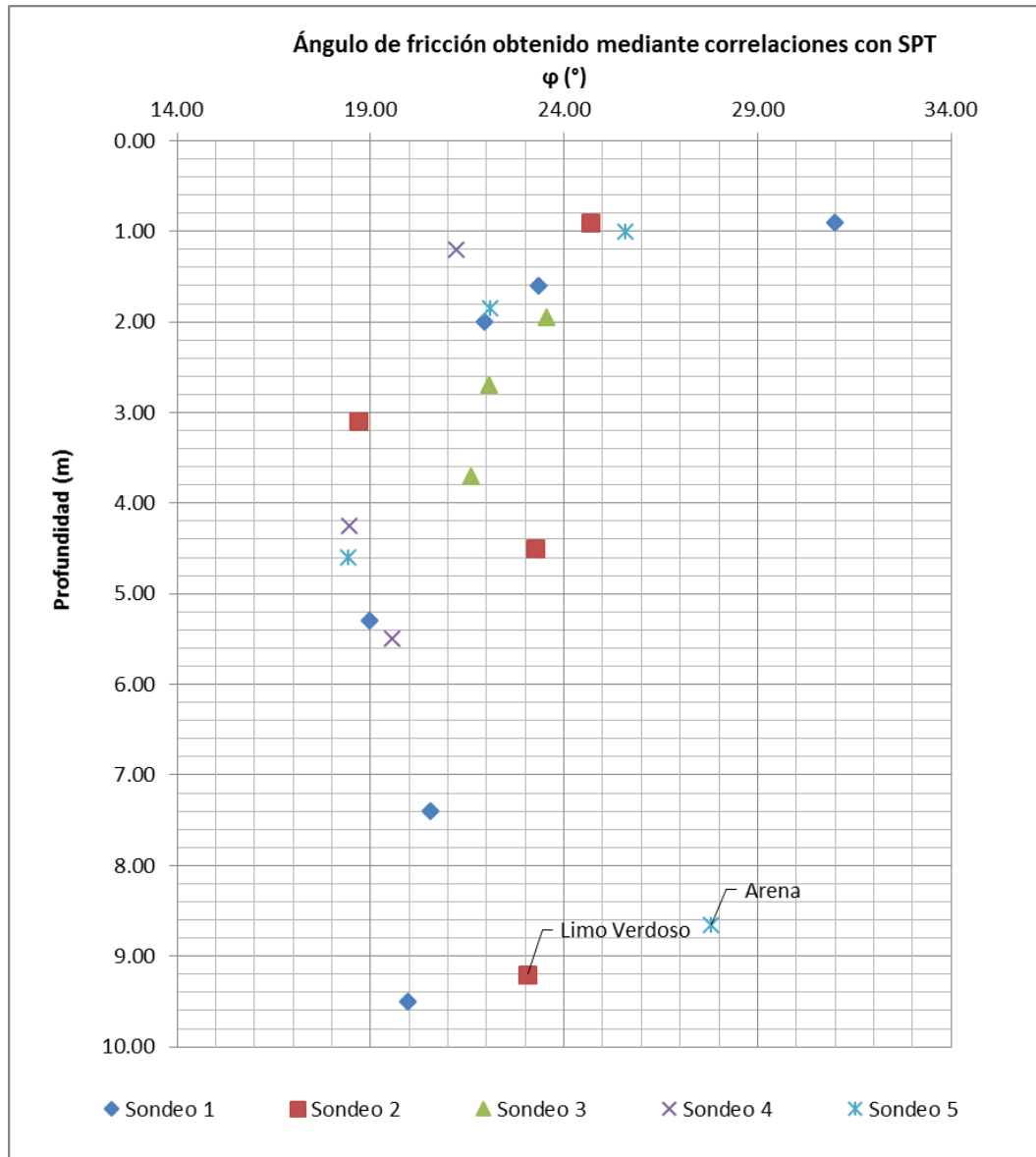
Gráfica 2 Relación Esfuerzo Cortante y Esfuerzo Normal Efectivo.



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 2 se observa la relación de Esfuerzo Cortante y Esfuerzo Normal Efectivo de la zona de estudio, en donde se visualiza que hay 4 materiales diferentes con los que se analiza los ángulos de fricción que se exponen en la Gráfica 3 y que se encuentran en la Tabla 14.

Gráfica 3 Comparación del Ángulo de Fricción vs Profundidad.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, en la Gráfica 3 se pueden observar los resultados obtenidos de las correlaciones mencionadas anteriormente, su utilización se justifica para estudios básicos ya que generan un ángulo de fricción representativo de los materiales analizados, el procedimiento llevado a cabo para el anterior análisis se encuentra más específico en el ANEXO E, y a continuación se

presenta en la Tabla 14 los resultados de las correlaciones para los sondeos realizados.

Tabla 14 Resultados ángulo de fricción por medio de correlaciones con SPT.

	Estrato	Desde	-	Hasta	Valor pendiente	$\phi(^{\circ})$
Sondeo 1	Limo habano	0,70	-	2,20	0,2183	12,31
	Arcilla habana	5,00	-	9,70	0,4061	22,10
Sondeo 2	Arcilla habana	2,80	-	4,70	0,6324	32,31
Sondeo 3	Arcilla habana	1,70	-	1,40	0,3528	19,43
Sondeo 4	Arcilla habana	4,00	-	5,70	0,4303	23,28
Sondeo 5	Arcilla habana	4,00	-	5,70	0,3528	19,43

Fuente: Elaboración propia.

8.4. Ensayos de laboratorio

Posterior a la exploración de campo, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas que permitieron clasificar los suelos y evaluar su comportamiento físico, mecánico y dinámico. En la Tabla 15 se presenta una relación de la cantidad de ensayos realizados y las normas de referencia, reiterando que los ensayos en el 2014, para cuando estaban vigentes las INVE 2007 y en el ANEXO D se encuentra el resumen de estos ensayos.

Tabla 15 Relación de ensayos realizados.

ENSAYO	CANTIDAD	NORMA
CONTENIDO DE HUMEDAD	50	INV.E-122-07
LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO	23	INV.E-125-07, INV.E-126-07
COMPRESIÓN INCONFINADA	5	INV E-152-07
PESO UNITARIO PARAFINADO	6	ISRM-07
GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO	10	INV E-124-07
CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	3	INV E-151-07
CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA POR CALCINACIÓN	6	INV E-121-07
CORTE DIRECTO	2	INV E-154-08

COMPRESIÓN TRIAXIAL ESTÁTICA	2	INV E-153-09
COMPRESIÓN TRIAXIAL DINÁMICA	2	ASTM D5311/D5311M – 13

Fuente: Elaboración propia.

8.5. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Para llevar a cabo la caracterización física del suelo se deben tener en cuenta diferentes parámetros básicos obtenidos a partir de las propiedades físicas, conceptos y conocimientos de expertos; todo esto permite obtener indicios de la forma en la que se comportarán los diferentes materiales estudiados; de acuerdo a esto se realizaron ensayos de límite líquido, límite plástico, granulometría por hidrómetro, contenido de humedad, contenido de materia orgánica y gravedad específica (Los resultados de los ensayos se pueden observar en los anexos F, G, H, I, y J respectivamente). Con estos materiales ya clasificados, es posible definir las diferentes acciones que se deben tener en cuenta para el tipo de construcción que se realizara en la zona estudiada. A continuación se presentan las tablas resumen con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio ejecutados, organizados por sondeos y con su respectivo análisis:

Tabla 16 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 1.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Prof. media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Granulometría por método del hidrómetro		Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	Contenido Orgánico (%)	Gravedad Específica
											%Limo	%Arcilla	LL	LP	IP			
SONDEO 1	0.00	-	0.70		0.70	0.35		Capa Vegetal, Limo Orgánico, Raíces										
	0.70	-	1.10	1.0	0.40	0.90	SPT	Limo Arcilloso, Consistencia Firme, Color Marrón, Seca.								19		
	1.40	-	1.80	2.0	0.40	1.60	SPT									31		
	1.80	-	2.20	2.1	0.40	2.00	B	Limo Arcilloso, Consistencia Media, Color Habano Claro.	Limo orgánico de alta plasticidad de color habano claro	OH			60	43	17	42	6.5	
	1.80	-	2.20	3.0	0.40	2.00	SH	Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)								43		
	3.90	-	4.40	4.0	0.50	4.15		Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)								32		
	5.00	-	5.60	5.0	0.60	5.30	SPT	Arcilla habana Oscura, Pocos lentes de Arena, Presencia de Material Blanco.								64		2.61
	5.60	-	6.10	5.1	0.50	5.85	B	Arcilla Habana clara, Punta Gris	Arcilla habana de alta plasticidad	CH	42	58	64	27	37	70		2.66
	6.10	-	6.40	6.0	0.30	6.25	SH	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad	Limo habano claro con presencia de arena fina	MH			88	41	47	31		2.53
	6.70	-	7.10	7.0	0.40	6.90	SH	Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad										
	7.10	-	7.70	8.0	0.60	7.40	SPT	Limo Oscuro								24		
	7.70	-	7.80	8.1	0.10	7.75	B	Limo con capa intermedia de Arena (2 muestras)										
	7.80	-	8.20	9.0	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena								23		
	7.80	-	8.20	9.1	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena	Arcilla gris de alta plasticidad con presencia de arena	CH			106	28	78	94		
	8.20	-	8.80	9.2	0.60	8.50	B	Limpieza Arcilla Gris con Lentes de arena	Arcilla gris de alta plasticidad con presencia de arena	MH	42	58	73	35	38	60	7.4	2.51
	8.80	-	9.30	10.0	0.50	9.05	SH	Se introdujo el Shelby y se encontró arena gris con gran cantidad de agua por lo que se recuperó en bolsa.			62	38						2.60
	9.30		9.70	11.0	0.40	9.50	SPT	Se encontró hasta 9.70 arena gris								196		

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16 se encuentra el resumen de resultados del sondeo 1, donde se puede observar que en cuanto a la clasificación USCS (Unified Soil Classification System) el suelo se cataloga como suelos de alta plasticidad lo que indica que estos están en capacidad de soportar mayores deformaciones sin que tenga mayor agrietamiento, todo esto obtenido a partir de los límites líquido y plástico en donde se destaca que los rangos de límite líquido van desde 60% hasta 106%, el límite plástico va del 28% al 43% y a partir de estos se obtienen índices de plasticidad desde 17% hasta 78%; con respecto a la granulometría por hidrómetro se encuentra que el material predominante es la Arcilla con un porcentaje de 58% y presencia de Limo de 42%, sin embargo la muestra 10 perteneciente a una arena gris fina, por lo cual no se le debió practicar este ensayo dado que no cumple con la especificación de pasa tamiz 200, es por ello que los resultados se ven afectados al presentar un porcentaje de 62% y 38% para Limo y Arcilla respectivamente; en cuanto a la humedad del suelo se presenta un aumento gradual entre 31% y el 196%, sin embargo se aclara que la muestra 11 correspondiente a la humedad máxima, fue la última extraída en este sondeo porque presentaba gran cantidad de agua, lo que justifica el porcentaje de humedad tan alto e impidió el avance de la perforación manual; adicionalmente se observa que existen cambios notables que pueden ser causados por la presencia del Nivel Freático y combinación de materiales que son más permeables que la arcilla; acerca del contenido orgánico se realizaron dos ensayos en este sondeo en los que la muestra superficial presenta un 6,5% (2 m de profundidad) y la muestra más profunda muestra un 7,4% (8.5 m de profundidad) por lo que se deduce que existe una mayor presencia de materia orgánica en la profundidad debido a las depositaciones de materiales en el río que se transportaron y con el tiempo conformaron estratos; en relación a la gravedad específica se considera un rango comprendido entre 2,51 y 2,66.

Tabla 17 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 2.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Granulometría por método del hidrómetro		Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	Contenido Orgánico (%)	Gravedad Específica
											%Limo	%Arcilla	LL	LP	IP			
SONDEO 2	0.00	-	0.60		0.60	0.30		Se realiza el descapote inmediatamente se observó arcilla amarilla con óxido										
	0.60	-	1.20	1.0	0.60	0.90	SPT	Arcilla color habana oxidada								33		
	1.20	-	1.60	1.1	0.40	1.40	B	Arcilla habana con óxido	Limo de color habano de alta	OH			77	39	38	49		
	1.60	-	2.00	2.0	0.40	1.80	SH	Arcilla habana con óxido								48	6.8	2.61
	2.80	-	3.40	3.0	0.60	3.10	SPT	Arcilla habana con óxido								63		
	3.40	-	4.30	3.1	0.90	3.85	B	Limpieza, Arcilla habana con oxido se toma muestra de 4.10 a 4.30	Arcilla habana de baja plasticidad con pintas de óxido	CL			44	26	18	35		
	4.30	-	4.70	4.0	0.40	4.50	SPT	Arcilla habana con un lente bajo de arena								98		
	4.30	-	4.70	4.1	0.40	4.50	B	Se tomó muestra 4.1 m , Arcilla con bajos lentes de limo con oxido	Arcilla habana con óxido de baja plasticidad y lentes de arena fina	CL	47	53	33	21	12	25		2.47
	4.70	-	5.50	4.2	0.80	5.10	B	Limpieza - Arcilla habana con vetas color gris	Limo gris de alta plasticidad color gris	MH			67	48	19	61		
	5.50	-	5.80	5.0	0.30	5.65	SH	Arcilla gris								51		
	6.00	-	6.60	5.1	0.60	6.30	B	Limpieza arcilla gris oscuro, limo	Arcilla gris de alta plasticidad	CH	43	57	101	72	29	90		2.57
	6.90	-	7.30	6.0	0.40	7.10	SH	Limo orgánico gris oscuro										
	7.70	-	8.10	7.0	0.40	7.90	SH	Limo verdoso										
	8.10	-	8.80	7.1	0.70	8.45	B	Limpieza limo verdoso	Limo de baja plasticidad de tonalidad verdosa	OL	67	33	44	27	17	32		2.61
	8.90	-	9.50	8.0	0.60	9.20	SPT	Limo verde								33		

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 17 perteneciente al resumen de los resultados obtenidos en el sondeo 2, donde se puede observar que en cuanto a la clasificación USCS se encuentran suelos de alta y baja plasticidad que indican que algunos de estos están en capacidad de soportar mayores deformaciones sin que tengan mayor agrietamiento, todo esto obtenido a partir de los límites líquido y plástico en donde se destaca que los rangos de límite líquido van desde 33% hasta 101%, el límites plástico va del 21% al 72% y a partir de estos se obtienen índices de plasticidad desde 12% hasta 38%; con respecto a la granulometría por hidrómetro se encuentra que el material predominante es la Arcilla con un porcentaje mayor o igual a 53% y presencia de Limo menor o igual a 47% en gran parte del sondeo, sin embargo al finalizar el sondeo se encontró abundante presencia de Limo en un 67% y Arcilla en 33% lo que concuerda con lo visto en campo y la descripción del laboratorio; en cuanto a la humedad del suelo se presenta un aumento gradual entre 25% y el 98%, aunque existen cambios notables que pueden ser causados por la presencia del Nivel Freático y combinación de materiales que son más permeables que la arcilla; acerca del contenido orgánico existe un porcentaje del 6,8 lo que es natural ya que la muestra no es tan profunda; en relación a la gravedad específica se considera un rango comprendido entre 2,47 y 2,61.

Tabla 18 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 3.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Granulometría por método del hidrómetro		Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	Contenido Orgánico (%)	Gravedad Específica
											%Limo	%Arcilla	LL	LP	IP			
SONDEO 3	0.00	-	0.80		0.80	0.40		Capa vegetal, limo orgánico y raíces										
	0.80	-	1.10	1.0	0.30	0.95	B	Arcilla habana clara, ocas Raíces, Consistencia firme, Presencia de Limo Orgánico	Arcilla habana de alta plasticidad	CH	44	56	60	21	39	37	6.7	2.58
	1.70	-	2.20	2.0	0.50	1.95	SPT	Arcilla habana clara con vetas de óxido, Consistencia Media								54		
	2.50	-	2.90	3.0	0.40	2.70	SPT	Arcilla limosa, grandes vetas de óxido								35		
	3.40	-	4.00	4.0	0.60	3.70	SPT	Arcilla Consistencia Firme, Color Habana Oscura oxidada con lentes de arena								35		
	4.60	-	4.90	5.0	0.30	4.75	SH	Arena, difícil recuperación	Arcilla gris de baja plasticidad con presencia de arena	CL			35	24	11	20		

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 18 se puede observar el resumen de los resultados adquiridos del sondeo 3, donde se visualiza que con respecto a la clasificación USCS el suelo se cataloga como arcillas de alta y baja plasticidad, todo esto obtenido a partir de los límites líquido y plástico en donde se destaca que los rangos de límite líquido van desde 35% hasta 60%, el límite plástico va del 21% al 24% y a partir de estos se obtienen índices de plasticidad desde 11% hasta 39%; con respecto a la granulometría por hidrómetro se encuentra que el material predominante es la Arcilla con un porcentaje de 56% y presencia de Limo de 44%; en cuanto a la humedad del suelo se presenta un rango entre 20% y 54%; acerca del contenido orgánico existe un porcentaje del 6,8 lo que es natural ya que la muestra no es tan profunda; en relación a la gravedad específica se realizó un único ensayo correspondiente a la muestra 1 que dio como resultado 2,58.

Tabla 19 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 4.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Granulometría por método del hidrómetro		Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	Contenido Orgánico (%)	Gravedad Específica
											%Limo	%Arcilla	LL	LP	IP			
SONDEO 4	0.00	-	0.10		0.10	0.05		Descapote, Capa vegetal aparentemente relleno de abono por causa de cultivo										
	1.00	-	1.40	1.0	0.40	1.20	SPT	Arcilla limosa de consistencia firme, color habano con pequeña presencia de raíces y vetas de óxido.	Limo orgánico arcilloso habano de alta plasticidad	OH			67	55	12	34		
	1.40	-	2.40	1.1	1.00	1.90	B	Arcilla limosa con contenido de óxido								32	6.70	
	2.80	-	3.30	2.0	0.50	3.05	SH	Arcilla Color Habana con gran oxidación a la anterior.										
	3.70	-	3.90	2.1	0.20	3.80	B	Arcilla de color habano claro, poco óxido	Limo orgánico arcilloso habano de alta plasticidad	OH	67	33	69	34	35	60		2.43
	4.00	-	4.50	3.0	0.50	4.25	SPT	Arcilla de consistencia media de color habano claro y presencia de óxido								54		
	4.80	-	5.30	3.1	0.50	5.05	B	Arcilla oxidada Oscura	Limo color habano oscuro de alta plasticidad	MH			67	39	28	52		
	5.30	-	5.70	4.0	0.40	5.50	SPT	Arcilla seca con presencia de óxido color habana oscura								69		
	6.20	-	6.60	4.1	0.40	6.40	B	Arcilla totalmente gris	Limo color gris de alta plasticidad	MH	82	18	82	40	42	63		2.42
	6.60	-	7.60	5.0	1.00	7.10	B	Arcilla gris con presencia de arena	Limo color gris de alta plasticidad	MH			98	58	40	53		

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 19 se encuentra el resumen de resultados del sondeo 4, donde se puede observar que en cuanto a la clasificación USCS el suelo se cataloga como suelos de alta plasticidad lo que indica que estos están en capacidad de soportar mayores deformaciones sin que tenga agrietamiento, todo esto obtenido a partir de los límites líquido y plástico en donde se destaca que los rangos de límite líquido van desde 67% hasta 98%, el límite plástico va del 34% al 58% y a partir de estos se obtienen índices de plasticidad desde 12% hasta 42%; con respecto a la granulometría por hidrómetro se encuentra que el material predominante es el Limo con un porcentaje mayor o igual a 67% y presencia de Arcilla con un porcentaje menor o igual a 33%; en cuanto a la humedad del suelo se presenta un rango entre 32% y 69%; acerca del contenido orgánico existe un porcentaje del 6,7 lo que es natural ya que la muestra no es tan profunda; en relación a la gravedad específica se obtiene un resultado de 2,4.

Tabla 20 Resumen Resultados Clasificación Física, Sondeo 5.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Granulometría por método del hidrómetro		Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	Contenido Orgánico	Gravedad Específica
											%Limo	%Arcilla	LL	LP	IP			
SONDEO 5	0.00	-	0.30		0.30	0.15		Pasto Kikuyo, limo orgánico y raíces										
	0.30	-	0.50	1.0	0.20	0.40	B	Arcilla limosa color marrón, apariencia expansiva consistencia firme con presencia de raíces.	Arcilla limosa color habana de alta plasticidad	CH			59	26	33	24		
	0.80	-	1.20	2.0	0.40	1.00	SPT	Arcilla color habana con presencia de óxido, de consistencia firme y pequeña presencia de raíces								28		
	1.60	-	2.10	3.0	0.50	1.85	SPT	Arcilla color habano, aparecen lentes finos de arena en los últimos 0,10 m								46		
	2.10	-	2.50	4.0	0.40	2.30	SH	Arcilla con lentes de arena										
	3.30	-	3.70	5.0	0.40	3.50	SH	Arcilla color habano oscuro										
	3.70	-	4.30	5.1	0.60	4.00	B	Arcilla de tonalidad más oscura, se detecta en la limpieza del barreno	Limo arcilloso color habano de alta plasticidad	MH			54	30	24	53		
	4.30	-	4.90	6.0	0.60	4.60	SPT	Arcilla café vetas negras, lentes de arena, Con el solo peso del golpeador se empieza a hundir								54		
	4.90	-	5.00	6.1	0.10	4.95	B	Se toma muestra y la arcilla empieza a tener una tonalidad más oscura a mayor profundidad	Arcilla habana oscura de alta plasticidad	CH			50	26	24	56		
	5.00	-	5.50	7.0	0.50	5.25	SH	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media									6.30	2.58
	5.70	-	6.20	7.1	0.50	5.95	B	Arcilla habana con vetas de tonalidad gris	Limo arcilloso habano con vetas grises de alta plasticidad	MH			59	37	22	67		
	6.80	-	7.30	8.0	0.50	7.05	SH	Arcilla de color gris de consistencia media										
	7.60	-	8.00	8.1	0.40	7.80	B	Arcilla gris oscura de consistencia media	Limo arcilloso habano con vetas grises de alta plasticidad	MH			95	47	48	76		
	8.00	-	8.30	8.2	0.30	8.15	B	Limo con presencia de arena de grano fino			80	20						2.12
	8.30	-	9.00	9.0	0.70	8.65	SPT	Arena gris de grano fino								21		

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la Tabla 20 donde se encuentra el resumen de resultados del sondeo 5, se puede observar que referente a la clasificación USCS el suelo se cataloga como suelos de alta plasticidad, todo esto obtenido a partir de los límites líquido y plástico en donde se destaca que los rangos de límite líquido van desde 50% hasta 95%, el límite plástico va del 26% al 47% y a partir de estos se obtiene índices de plasticidad desde 22% hasta 48%; con respecto a la granulometría por hidrómetro se encuentra que el material predominante es el Limo con un porcentaje de 80% y presencia de Arcilla de 20%; en cuanto a la humedad del suelo se presenta un aumento gradual entre 24% y el 76%, no obstante en las muestras 6.1 y 7.1 se presenta una incoherencia debido a que la humedad es mayor al LL, de lo que se deduce que el suelo es líquido, lo cual no corresponde a lo observado en la muestra extraída, esta equivocación posiblemente se debe a errores humanos durante la ejecución del ensayo justificado en la falta de experiencia para llevar a cabo este procedimiento; acerca del contenido orgánico existe un porcentaje del 6,3% a media profundidad del sondeo por lo que se deduce que existe debido a transportes de materiales que se han producido con el paso del tiempo; en relación a la gravedad específica se considera un rango comprendido entre 2,12 y 2,58.

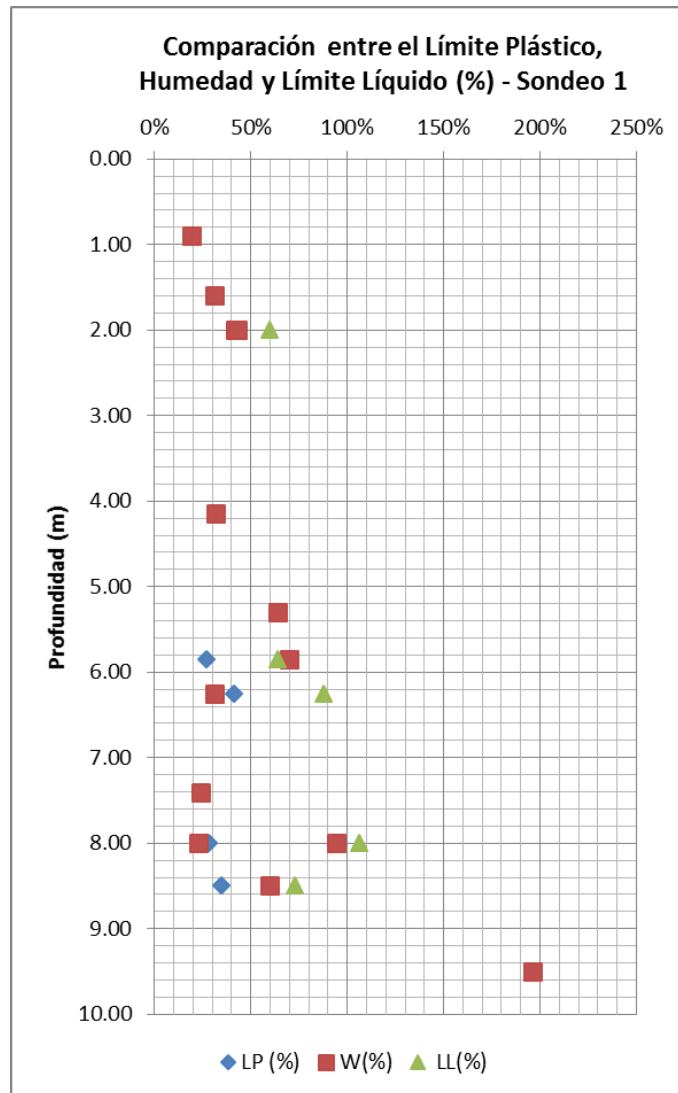
Finalmente se deduce que:

- a. Se hace la comparación entre el límite líquido y la humedad natural, esto con el fin de reconocer la consistencia que puede presentar el material en estudio:

En la Gráfica 4 del sondeo 1 se puede observar que los valores del LL con respecto a la humedad se mantienen cercanos de 0 a 6 m y de 8 a 9 m de profundidad lo que indica que la consistencia en estas secciones es blanda, exceptuando el sector comprendido entre 6 a 8 m de profundidad en la que se visualiza que el LL está alejado de la humedad en un 50% aproximadamente

por lo que se deduce que la consistencia es más alta en relación al resto del sondeo.

Gráfica 4 Comparación LP, W y LL, Sondeo 1.

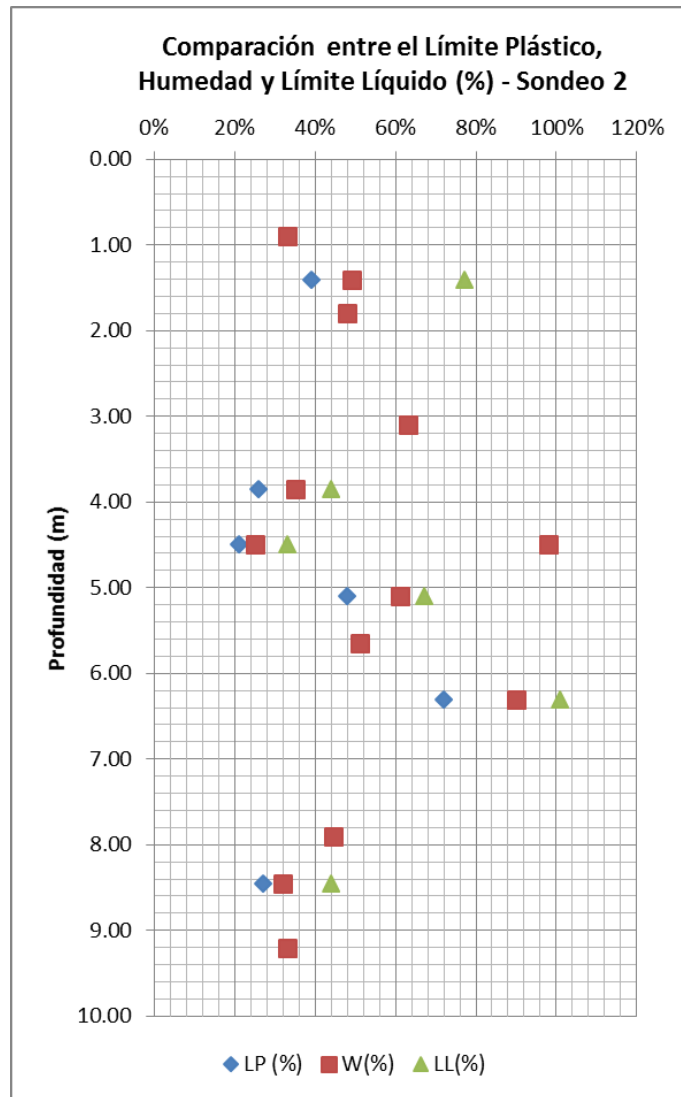


Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 5 del sondeo 2 se presenta consistencia alta en el sector comprendido entre 1 y 2 m de profundidad debido a que el LL no está tan cercano a la humedad natural, mientras que en el sector incluido por las profundidades entre 3,8 y 9 m los LL están mucho más cercanos a las

humedades naturales con respecto al sector anteriormente mencionado, por lo que se concluye que la consistencia es más blanda.

Gráfica 5 Comparación LP, W y LL, Sondeo 2.

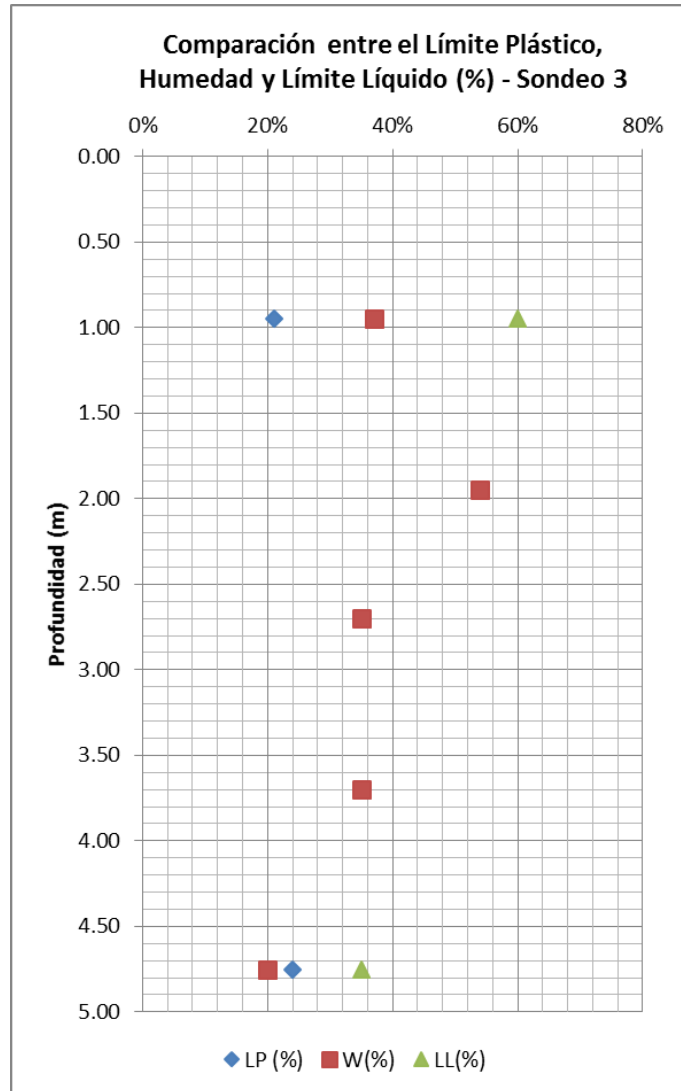


Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 6 del sondeo 3 se observa que no hay gran cantidad de LL realizados, sin embargo los que se efectuaron se encuentran al principio y final de la perforación en cuestión, lo que permite concluir que existe una

consistencia alta en todo el sondeo en consecuencia de la lejanía que se presentan entre los LL y las humedades naturales.

Gráfica 6 Comparación LP, W y LL, Sondeo 3.

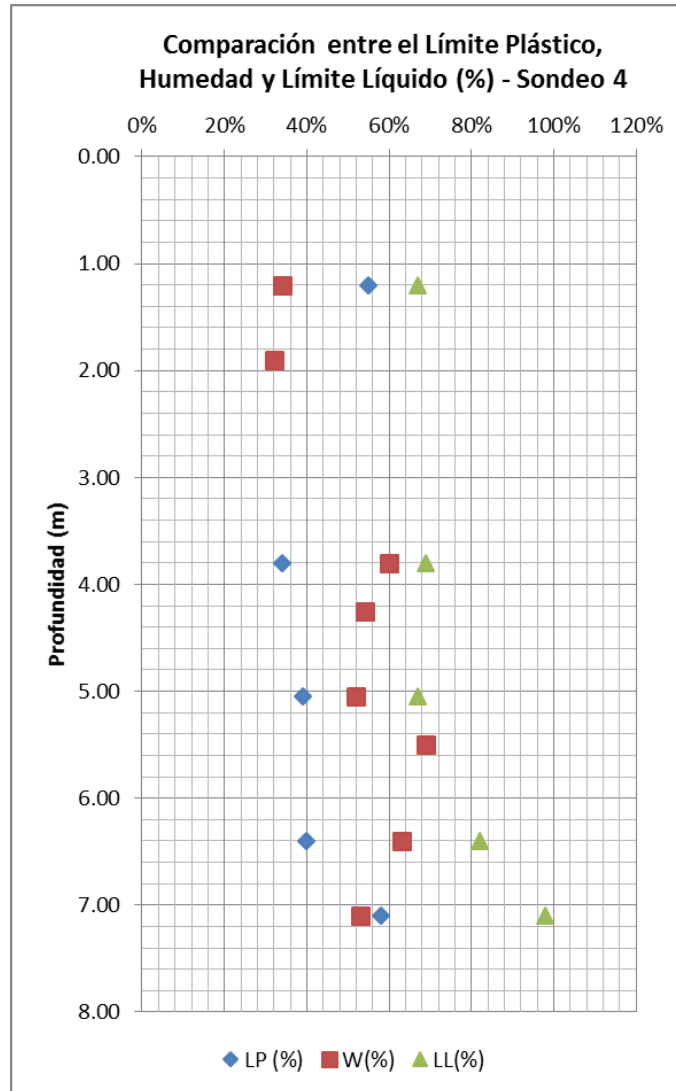


Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 7 del sondeo 4 se evidencia que la consistencia es alta en los sectores comprendidos entre 1 a 2 m y de 6 a 8 m de profundidad dado que los LL están apartados de las humedades naturales correspondientes, no

obstante la sección incluido entre los 3,8 y 5,2 m exhibe una consistencia blanda por la proximidad de los LL con la humedad natural.

Gráfica 7 Comparación LP, W y LL, Sondeo 4.

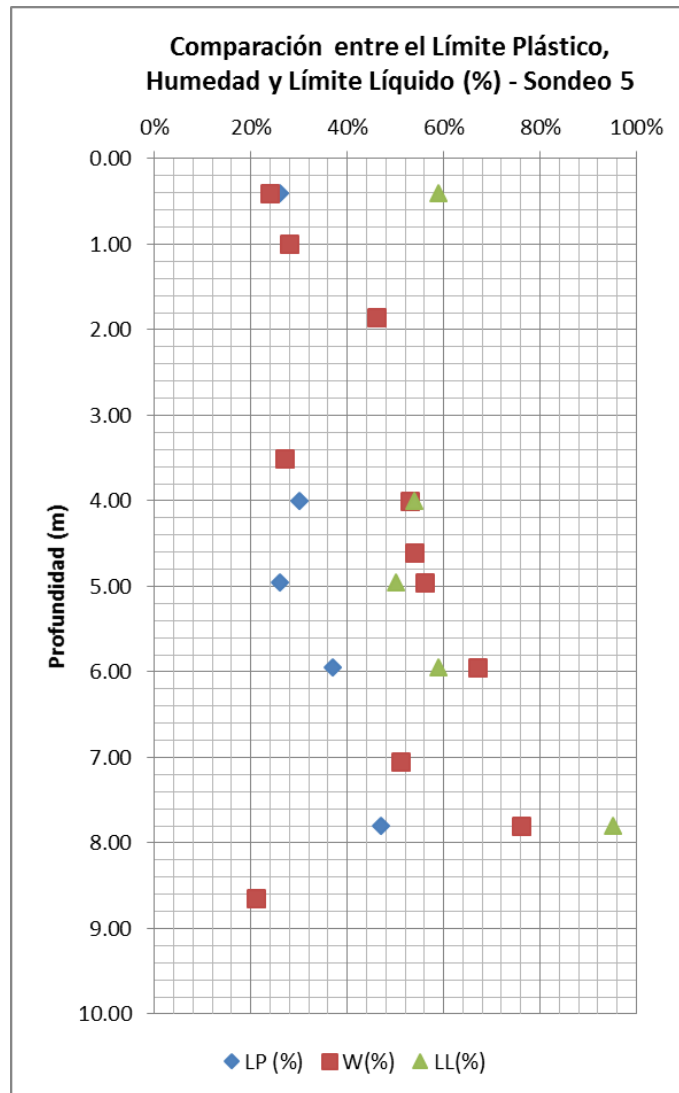


Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 8 del sondeo 5 se expone que los LL y las humedades de la sección comprendida entre 4,8 y 6 m se encuentran cercanas por lo que se deduce que su consistencia es blanda; al contrario sucede con el resto del material encontrado en la perforación en donde se categoriza su consistencia

como alta como consecuencia de la separación de los LL y las humedades naturales.

Gráfica 8 Comparación LP, W y LL, Sondeo 5.



Fuente: Elaboración propia.

- b. A partir de la Ecuación 1 relacionada al índice de consistencia que fue mencionada con anterioridad y teniendo la Tabla 21 se realizan las observaciones pertinentes, se realiza otro análisis correspondiente a la zona en

estudio, en este análisis se alcanza una distinción más precisa con respecto a la categorización de las consistencias de cada muestra en estudio.

Tabla 21 Índice de Consistencia.

CONSISTENCIA	Ic
Líquida	$Ic < 0,5$
Blanda	$0,5 < Ic < 0.75$
Rígida	$0.75 < Ic < 1$
Dura	$Ic > 1$

Fuente: LIZCANO A. Módulo 1 Caracterización, Mecánica de Suelos-Universidad de los Andes.

Tabla 22 Índice de Consistencia, Sondeo 1 al 5.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Índice de Consistencia
SONDEO 1	1,80	-	2,20	2.1	1,06
	5,60	-	6,10	5.1	-0,16
	6,10	-	6,40	6.0	1,21
	7,80	-	8,20	9.1	0,15
	8,20	-	8,80	9.2	0,34
SONDEO 2	1,20	-	1,60	1.1	0,74
	3,40	-	4,30	3.1	0,5
	4,30	-	4,70	4.1	0,67
	4,70	-	5,50	4.2	0,32
	6,00	-	6,60	5.1	0,38
	8,10	-	8,80	7.1	0,71
SONDEO 3	0,80	-	1,10	1.0	0,59
	4,60	-	4,90	5.0	1,36
SONDEO 4	1,00	-	1,40	1.0	2,75
	3,70	-	3,90	2.1	0,26
	4,80	-	5,30	3.1	0,54
	6,20	-	6,60	4.1	0,45

	6,60	-	7,60	5.0	1,125
SONDEO 5	0,30	-	0,50	1.0	1,06
	3,70	-	4,30	5.1	0,04
	4,90	-	5,00	6.1	-0,25
	5,70	-	6,20	7.1	-0,36
	7,60	-	8,00	8.1	0,40

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 22 se encuentra el valor calculado del índice de consistencia del suelo analizado, a partir de esos resultados, se observa que:

- En el sondeo 1 en cuanto a los valores obtenidos del índice de consistencia en las muestras 2.1 y 6.0 la consistencia del suelo es dura; mientras que el resto de las muestras estudiadas de este sondeo exponen una consistencia líquida.
- Para el sondeo 2, se expone que en los valores obtenidos del índice de consistencia en las muestras 4.2 y 5.1 la consistencia del suelo es líquida; sin embargo en las otras muestras del sondeo presentan una consistencia blanda.
- En cuanto al sondeo 3, se presenta que el índice de consistencia para la muestra 1.0 la consistencia del suelo es blanda y el índice de consistencia para la muestra 5.0 la consistencia del suelo es dura.
- De igual manera para las muestras 1.0 y 5.0 del sondeo 4 la consistencia del suelo es dura, la muestra 3.1 presenta una consistencia blanda y el resto de las muestras estudiadas presentan una consistencia líquida.
- Ahora en cuanto al sondeo 5, se expone que en el valor obtenido del índice de consistencia en la muestra 1.0 la consistencia del suelo es dura, mientras que en el resto de las muestras estudiadas se presenta una consistencia líquida.

- c. El índice de plasticidad es una propiedad importante a tener en cuenta, de tal forma que se busca analizarla más específicamente teniendo en cuenta la Tabla 23 que se describe a continuación:

Tabla 23 Índice de Plasticidad.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD %	DESCRIPCIÓN
0 - 1	No Plástico
1 - 4	Ligeramente Plástico
4 - 10	Plasticidad baja
10 - 20	Plasticidad media
20 - 35	Plasticidad alta
> 35	Plasticidad muy alta

Fuente: LIZCANO A. Módulo 1 Caracterización, Mecánica de Suelos-Universidad de los Andes.

Tabla 24 Índice de Plasticidad, Sondeo 1 al 5.

No.	Profundidad (m)		Muestra	IP
SONDEO 1	1,80	- 2,20	2.1	17%
	5,60	- 6,10	5.1	37%
	6,10	- 6,40	6.0	47%
	7,80	- 8,20	9.1	78%
	8,20	- 8,80	9.2	38%
SONDEO 2	1,20	- 1,60	1.1	38%
	3,40	- 4,30	3.1	18%
	4,30	- 4,70	4.1	12%
	4,70	- 5,50	4.2	19%
	6,00	- 6,60	5.1	29%
SONDEO 3	0,80	- 1,10	1.0	39%
	4,60	- 4,90	5.0	11%
SONDEO 4	1,00	- 1,40	1.0	12%
	3,70	- 3,90	2.1	35%
	4,80	- 5,30	3.1	28%
	6,20	- 6,60	4.1	42%
	6,60	- 7,60	5.0	40%
SONDEO 5	0,30	- 0,50	1.0	33%
	3,70	- 4,30	5.1	24%
	4,90	- 5,00	6.1	24%
	5,70	- 6,20	7.1	22%

	7,60	-	8,00	8.1	48%
--	------	---	------	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 24 se puede deducir de manera puntual que los IP obtenidos en la muestra 2.1 del sondeo 1, muestra 3.1, 4.1, 4.2, 5.1 y 7.1 del sondeo 2, muestra 5 del sondeo 3 y la muestra 1.0 del sondeo 4 son clasificadas como materiales de plasticidad media, mientras que la muestra 5.1 del sondeo 2 y las muestras 2.1 y 3.1 del sondeo 4, las muestras 1.0, 5.1, 6.1 y 7.1 del sondeo 5 clasifican como plasticidad alta y el resto de las muestras analizadas corresponden a materiales de plasticidad muy alta.

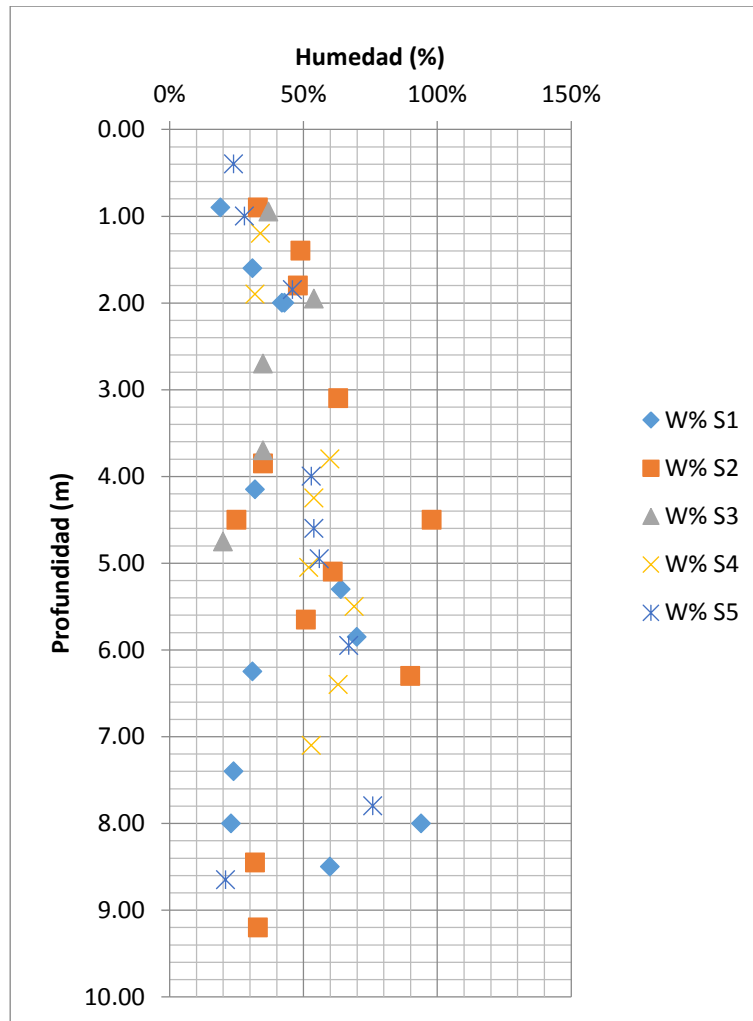
Es así que se concluye que el comportamiento general del material presente en la zona de estudio se caracteriza por mostrar una plasticidad alta, lo que le permite soportar deformaciones rápidas sin exhibir agrietamientos como consecuencia de las características que presenta el suelo; como se mencionó anteriormente mediante el análisis de los límites líquido y plástico se dedujo que en su mayoría el suelo es arcilloso, ya que según Juárez Badillo²⁷ este tipo de material influye en gran manera sobre su plasticidad ya que se tiene en cuenta la forma laminar que exhiben las partículas de las arcillas, que al tener un bajo contenido de humedad se sitúan en forma desordenada pero al poseer una humedad propicia son recubiertas por el agua posibilitando que las partículas se organicen y permanezcan juntas, cuando las partículas están sometidas a una presión grande, la capa de agua presente entre ellas facilita el deslizamiento de las unas sobre las otras, lo que permite que el suelo sea deformado hasta cierto punto sin romperse debido a la distancia en que las partículas pueden moverse sin perder su cohesión; también se debe considerar el aumento del área específica en las arcillas en comparación a las arenas, ya que esto permite que haya una mayor atracción con el agua siendo

²⁷ BADILLO, J. Mecánica de suelos. Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelo, Tercera Edición, México, Editorial Limusa, 1975.

reforzado por las fuerzas electroestáticas presentes entre las partículas arcillosas que favorecen una atracción entre las mismas.

- d. Referente a la granulometría por hidrómetro se puede reafirmar que el material predominante en la finca la Santa María es la arcilla, sin embargo hay una considerable presencia de limos y en minoría material arenoso.
- e. Con respecto a la humedad natural se realiza la Gráfica 9, en la cual se visualiza los resultados obtenidos en cada uno de los sondeos, de tal forma que se observan los cambios que se generan a profundidad y la comparación entre cada uno de los demás sondeos:

Gráfica 9 Humedad Natural vs Profundidad.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica 9 se deduce que los cambios repentinos están relacionados a la profundidad en la cual se señala el nivel freático y la presencia de otros materiales, tales como las arenas y los limos, que intervienen en el resultado obtenido.

- f. En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos del contenido de materia orgánica en donde se observa que no hay gran cantidad de material orgánico en la zona de estudio, aunque en algunos sondeos se presenta a profundidades

mayores de 5 m, lo que se explica por las inundaciones que en el transcurso del tiempo se han venido presentando en el lugar y que sirven como un mecanismo de transporte de materiales que se encuentran presentes en el lugar debido a la cercanía de la finca al cauce del Río Bogotá. Se destaca que la alta presencia de materia orgánica dentro de un material arcilloso o limoso afecta la resistencia de estos al verse reducida debido al cambio de sus propiedades mecánicas, ya que se produce una disminución en su peso unitario que influye en términos de esfuerzos totales al cambiar su comportamiento en comparación con el material natural; en los materiales donde se realizó el ensayo de materia orgánica se observa que la presencia de contenido orgánico es muy bajo (6 y 7%), por lo que no tiene una influencia apreciable en el comportamiento de los materiales.

Tabla 25 Contenido de materia orgánica.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Contenido de materia orgánica
SONDEO 1	1,80	-	2,20	2.1	6,5%
	8,20	-	8,80	9.2	7,4%
SONDEO 2	1,60	-	2,00	2.0	6,8%
SONDEO 3	0,80	-	1,10	1.0	6,70%
SONDEO 4	1,40	-	2,40	1.1	6,70%
SONDEO 5	5,00	-	5,50	7.0	6,30%

Fuente: Elaboración propia.

- g. Para hacer el respectivo análisis de la gravedad específica se tiene en cuenta la Tabla 27 en la que se puede visualizar los valores generales de gravedad específica para cada tipo de suelo:

Tabla 26 Valores típicos de gravedad específica para minerales del suelo.

MINERAL	GRAVEDAD ESPECÍFICA	MINERAL	GRAVEDAD ESPECÍFICA
Bentonita	2,13 - 2,18	Muscovita (mica)	2,80 - 2,90

Yeso	2,30	Dolomita	2,87
Gipsita	2,30 - 2,40	Aragonita	2,94
Montmorillonita	2,40	Anhidrita	3,00
Feldespato Ortoclásico	2,56	Biotita (mica)	3,0 - 3,1
Ilita	2,60	Hornblenda	3,0 - 3,47
Cuarzo	2,60	Augita	3,20 - 3,40
Caolinita	2,60 - 2,63	Olivina	3,27 - 3,37
Clorita	2,60 - 3,0	Limonita	3,8
Feldespato Plagioclásico	2,62 - 2,76	Siderita	3,83 - 3,88
Talco	2,70 - 2,80	Hematita	4,90 - 5,30
Calcita	2,80 - 2,90	Magnetita	5,17 - 5,18

Fuente: BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. Bogotá, Mc Graw-Hill, 1982.

Tabla 27 Valores típicos de la gravedad específica de las partículas de suelo.

SUELO	Gs
Arena	2,65 - 2,68
Grava	2,65 - 2,68
Arcilla (inorgánica)	2,68 - 2,72
Arcilla (orgánica)	2,62 - 2,66
Limo	2,65 - 2,68

Fuente: BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. Bogotá, Mc Graw-Hill, 1982.

En la Tabla 28 correspondiente a los sondeos realizados se observa que en su mayoría los resultados dan dentro de los rangos de valores típicos que se visualizan en la Tabla 27, sin embargo aquellos resultados que están por debajo de los valores típicos pueden ser justificados por medio de la Tabla 26, en la que se presentan las diferentes gravedades específicas que se pueden presentar para varios minerales, por lo que el resultado de gravedad específica de un suelo, al estar conformado por diferentes minerales puede variar en sus propiedades y por lo tanto en el resultado final de la gravedad específica.

Tabla 28 Gravedad Específica.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Gravedad Específica
SONDEO 1	5	-	5,6	5.0	2,61
	5,6	-	6,1	5.1	2,66
	6,1	-	6,4	6.0	2,53
	8,2	-	8,8	9.2	2,51
	8,8	-	9,3	10.0	2,6
SONDEO 2	1,6	-	2	2.0	2,61
	4,3	-	4,7	4.1	2,47
	6	-	6,6	5.1	2,57
	8,1	-	8,8	7.1	2,61
SONDEO 3	0,8	-	1,1	1.0	2,58
SONDEO 4	3,7	-	3,9	2.1	2,43
	6,2	-	6,6	4.1	2,42
SONDEO 5	5	-	5,5	7.0	2,58
	8	-	8,3	8.2	2,12

Fuente: Elaboración propia.

8.5.1. Identificación de los suelos expansivos a partir del Límite Líquido e Índice de Plasticidad

Se desarrolló el análisis de potencial de expansión de los suelos del proyecto en función del límite líquido e índice plástico de las muestras ensayadas en laboratorio, los cuales se fundamentan en la tabla H.9.1-1 de la Norma de Diseño Sismo resistente de Colombia NSR-10.

A continuación, en la Tabla 29 se presentan los rangos establecidos en dicha norma, para la clasificación del potencial de expansión de los suelos del proyecto.

Tabla 29 Clasificación del Potencial de Expansión en función del LL y IP.

POTENCIAL DE EXPANSIÓN	LÍMITE LÍQUIDO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)
Muy alto	>63	>32
Alto	50-63	23-45
Medio	39-50	12-34
Bajo	<39	<20

Fuente: NSR-10, Tabla H.9.1-1 Clasificación de suelos expansivos, 2010.

Es así que teniendo en cuenta los valores del límite líquido consignados en la Tabla 29, se presenta a continuación los análisis de suelos expansivos del proyecto. De la Tabla 30 hasta la Tabla 34 se encuentra el resumen de este análisis.

Tabla 30 Potencial de Expansión, Sondeo 1.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Límites de consistencia (%)			Humedad Natural (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	
											LL	LP	IP		Por LL	Por IP
SONDEO 1	0.00	-	0.70		0.70	0.35		Capa Vegetal, Limo Orgánico, Raíces							NA	NA
	0.70	-	1.10	1.0	0.40	0.90	SPT	Limo Arcilloso, Consistencia Firme, Color Marrón, Seca.						19	NA	NA
	1.40	-	1.80	2.0	0.40	1.60	SPT							31	NA	NA
	1.80	-	2.20	2.1	0.40	2.00	B	Limo Arcilloso, Consistencia Media, Color Habano Claro.	Limo orgánico de alta plasticidad de color habano claro	OH	60	43	17	42	Alto	Muy Alto
	1.80	-	2.20	3.0	0.40	2.00	SH	Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)						43	NA	NA
	3.90	-	4.40	4.0	0.50	4.15		Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)							NA	NA
	5.00	-	5.60	5.0	0.60	5.30	SPT	Arcilla habana Oscura, Pocos lentes de Arena, Presencia de Material Blanco.						64	NA	NA
	5.60	-	6.10	5.1	0.50	5.85	B	Arcilla Habana clara, Punta Gris	Arcilla habana de alta plasticidad	CH	64	27	37	70	Muy Alto	Alto
	6.10	-	6.40	6.0	0.30	6.25	SH	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad	Limo habano claro con presencia de arena fina	MH	88	41	47	31	Muy Alto	Muy Alto
	6.70	-	7.10	7.0	0.40	6.90	SH	Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad							NA	NA
	7.10	-	7.70	8.0	0.60	7.40	SPT	Limo Oscuro						24	NA	NA
	7.70	-	7.80	8.1	0.10	7.75	B	Limo con capa intermedia de Arena (2 muestras)							NA	NA
	7.80	-	8.20	9.0	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena						23	NA	NA
	7.80	-	8.20	9.1	0.40	8.00	SH	Arcilla Color Gris con capa de Arena	Arcilla gris de alta plasticidad con presencia de arena	CH	106	28	78	94	Muy Alto	Alto
	8.20	-	8.80	9.2	0.60	8.50	B	Limpieza Arcilla Gris con Lentes de arena	Arcilla gris de alta plasticidad con presencia de arena	CH	73	35	38	60	Muy Alto	Muy Alto
	8.80	-	9.30	10	0.50	9.05	SH	Se introdujo el Shelby y se encontró arena gris con gran cantidad de agua por lo que se recuperó en bolsa.							NA	NA
	9.30		9.70	11	0.40	9.50	SPT	Se encontró hasta 9.70 arena gris						196	NA	NA

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31 Potencial de Expansión, Sondeo 2.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	
											LL	LP	IP		Por LL	Por IP
SONDEO 2	0.00	-	0.60		0.60	0.30		Se realiza el descapote inmediatamente se observó arcilla amarilla con óxido							NA	NA
	0.60	-	1.20	1.0	0.60	0.90	SPT	Arcilla color habana oxidada						33	NA	NA
	1.20	-	1.60	1.1	0.40	1.40	B	Arcilla habana con óxido	Limo de color habano de alta	OH	77	39	38	49	Muy Alto	Muy Alto
	1.60	-	2.00	2.0	0.40	1.80	SH	Arcilla habana con óxido						48	NA	NA
	2.80	-	3.40	3.0	0.60	3.10	SPT	Arcilla habana con óxido						63	NA	NA
	3.40	-	4.30	3.1	0.90	3.85	B	Limpieza, Arcilla habana con oxido se toma muestra de 4.10 a 4.30	Arcilla habana de baja plasticidad con pintas de óxido	CL	0.44	0.26	0.18	35	Media	Alto
	4.30	-	4.70	4.0	0.40	4.50	SPT	Arcilla habana con un lente bajo de arena						98	NA	NA
	4.30	-	4.70	4.1	0.40	4.50	B	Se tomó muestra 4.1 m , Arcilla con bajos lentes de limo con oxido	Arcilla habana con óxido de baja plasticidad y lentes de arena fina	CL	33	21	12	25	Bajo	Media
	4.70	-	5.50	4.2	0.80	5.10	B	Limpieza - Arcilla habana con vetas color gris	Limo gris de alta plasticidad color gris	MH	67	48	19	61	Muy Alto	Muy Alto
	5.50	-	5.80	5.0	0.30	5.65	SH	Arcilla gris						51	NA	NA
	6.00	-	6.60	5.1	0.60	6.30	B	Limpieza arcilla gris oscuro, limo	Arcilla gris de alta plasticidad	CH	101	72	29	90	Muy Alto	Muy Alto
	6.90	-	7.30	6.0	0.40	7.10	SH	Limo orgánico gris oscuro							NA	NA
	7.70	-	8.10	7.0	0.40	7.90	SH	Limo verdoso							NA	NA
	8.10	-	8.80	7.1	0.70	8.45	B	Limpieza limo verdoso	Limo de baja plasticidad de tonalidad verdosa	OL	44	27	17	32	Media	Alto
	8.90	-	9.50	8.0	0.60	9.20	SPT	Limo verde						33	NA	NA

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32 Potencial de Expansión, Sondeo 3.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	
											LL	LP	IP		Por LL	Por IP
SONDEO 3	0.00	-	0.80		0.80	0.40		Capa vegetal, limo orgánico y raíces							NA	NA
	0.80	-	1.10	1.0	0.30	0.95	B	Arcilla habana clara, ocas Raíces, Consistencia firme, Presencia de Limo Orgánico	Arcilla habana de alta plasticidad	CH	60	21	39	37	Alto	Media
	1.70	-	2.20	2.0	0.50	1.95	SPT	Arcilla habana clara con betas de óxido, Consistencia Media						54	NA	NA
	2.50	-	2.90	3.0	0.40	2.70	SPT	Arcilla limosa, grandes betas de óxido						35	NA	NA
	3.40	-	4.00	4.0	0.60	3.70	SPT	Arcilla Consistencia Firme, Color Habana Oscura oxidada con lentes de arena						35	NA	NA
	4.60	-	4.90	5.0	0.30	4.75	SH	Arena, difícil recuperación	Arcilla gris de baja plasticidad con presencia de arena	CL	0.35	0.24	0.11	20	Bajo	Alto

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33 Potencial de expansión, Sondeo 4.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	
											LL	LP	IP		Por LL	Por IP
SONDEO 4	0.00	-	0.10		0.10	0.05		Descapote, Capa vegetal aparentemente relleno de abono por causa de cultivo							NA	NA
	1.00	-	1.40	1.0	0.40	1.20	SPT	Arcilla limosa de consistencia firme, color habano con pequeña presencia de raíces y betas de óxido.	Limo orgánico arcilloso habano de alta plasticidad	OH	67	55	12	34	Muy Alto	Muy Alto
	1.40	-	2.40	1.1	1.00	1.90	B	Arcilla limosa con contenido de óxido						32	NA	NA
	2.80	-	3.30	2.0	0.50	3.05	SH	Arcilla Color Habana con gran oxidación a la anterior.							NA	NA
	3.70	-	3.90	2.1	0.20	3.80	B	Arcilla de color habano claro, poco óxido	Limo orgánico arcilloso habano de alta plasticidad	OH	69	34	35	60	Muy Alto	Muy Alto
	4.00	-	4.50	3.0	0.50	4.25	SPT	Arcilla de consistencia media de color habano claro y presencia de óxido						54	NA	NA
	4.80	-	5.30	3.1	0.50	5.05	B	Arcilla oxidada Oscura	Limo color habano oscuro de alta plasticidad	MH	67	39	28	52	Muy Alto	Muy Alto
	5.30	-	5.70	4.0	0.40	5.50	SPT	Arcilla seca con presencia de óxido color habana oscura						69	NA	NA
	6.20	-	6.60	4.1	0.40	6.40	B	Arcilla totalmente gris	Limo color gris de alta plasticidad	MH	82	40	42	63	Muy Alto	Muy Alto
	6.60	-	7.60	5.0	1.00	7.10	B	Arcilla gris con presencia de arena	Limo color gris de alta plasticidad	MH	98	58	40	53	Muy Alto	Muy Alto

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34 Potencial de expansión, Sondeo 5.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	Descripción de Laboratorio	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Humedad Natural (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	
											LL	LP	IP		Por LL	Por IP
SONDEO 5	0.00	-	0.30		0.30	0.15		Pasto Kikuyo, limo orgánico y raíces							NA	NA
	0.30	-	0.50	1.0	0.20	0.40	B	Arcilla limosa color marrón, apariencia expansiva consistencia firme con presencia de raíces.	Arcilla limosa color habana de alta plasticidad	CH	59	26	33	24	Alto	Alto
	0.80	-	1.20	2.0	0.40	1.00	SPT	Arcilla color habana con presencia de óxido, de consistencia firme y pequeña presencia de raíces					28	NA	NA	
	1.60	-	2.10	3.0	0.50	1.85	SPT	Arcilla color habano, aparecen lentes finos de arena en los últimos 0,10 m					46	NA	NA	
	2.10	-	2.50	4.0	0.40	2.30	SH	Arcilla con lentes de arena						NA	NA	
	3.30	-	3.70	5.0	0.40	3.50	SH	Arcilla color habano oscuro						NA	NA	
	3.70	-	4.30	5.1	0.60	4.00	B	Arcilla de tonalidad más oscura, se detecta en la limpieza del barreno	Limo arcilloso color habano de alta plasticidad	MH	54	30	24	53	Alto	Alto
	4.30	-	4.90	6.0	0.60	4.60	SPT	Arcilla café betas negras, lentes de arena, Con el solo peso del golpeador se empieza a hundir					54	NA	NA	
	4.90	-	5.00	6.1	0.10	4.95	B	Se toma muestra y la arcilla empieza a tener una tonalidad más oscura a mayor profundidad	Arcilla habana oscura de alta plasticidad	CH	50	26	24	56	Alto	Alto
	5.00	-	5.50	7.0	0.50	5.25	SH	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media						NA	NA	
	5.70	-	6.20	7.1	0.50	5.95	B	Arcilla habana con vetas de tonalidad gris	Limo arcilloso habano con vetas grises de alta plasticidad	MH	59	37	22	67	Alto	Muy Alto
	6.80	-	7.30	8.0	0.50	7.05	SH	Arcilla de color gris de consistencia media						NA	NA	
	7.60	-	8.00	8.1	0.40	7.80	B	Arcilla gris oscura de consistencia media	Limo arcilloso habano con vetas grises de alta plasticidad	MH	95	47	48	76	Muy Alto	Muy Alto
	8.00	-	8.30	8.2	0.30	8.15	B	Limo con presencia de arena de grano fino						NA	NA	
	8.30	-	9.00	9.0	0.70	8.65	SPT	Arena gris de grano fino						21	NA	NA

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a este análisis se observa que los materiales encontrados en la finca son potencialmente expansivos, sin embargo esto es realizado mediante la clasificación recomendada por el título H de la NSR-10, que puede usarse como punto de partida, mas no como una decisión final para confirmar y realizar este parámetro, es recomendable realizar ensayos de Expansividad del suelo o difracción de rayos x para determinar la actividad precisa de los materiales.

8.6. PERFIL TÍPICO

Se establece un perfil típico que se realiza en función de los materiales encontrados en campo y los resultados de laboratorio, estableciéndose las fronteras de análisis de los resultados de SPT y la descripción de campo de los materiales que se obtuvieron con la exploración efectuada. El perfil estratigráfico típico para el predio se describe a continuación en la Tabla 35:

Tabla 35 Tabla de descripción del perfil de típico.

MATERIAL	PROFUNDIDAD (m)	
	Desde	Hasta
Limo Orgánico	0.0	2.0
Arcilla habana oxidada	2.0	5.0
Arcilla Limo Arenosa café oscura con vetas de oxidación	5.0	8.0
Arena fina gris	8.0	9.0

Fuente: Elaboración propia.

- De 0.0 m a 2.0 m: A esta profundidad se identifica la capa vegetal y un material de relleno limo arcilloso de color café oscuro (S1), junto con la capa vegetal y una arcilla limosa con vetas rojizas (S2 al S5), en donde el LL oscila entre 59% – 77%, el LP varía entre 20 - 60% y el IP está en el rango de 12% - 39%, además el valor del SPT varía de los 4 a 25 golpes/pie.

- De 2.0 m a 5.0 m se encuentra una arcilla habana de alta plasticidad, cuyos parámetros de clasificación son: LL entre 33% - 79%, el LP varía entre 21% - 37% y el IP está en el intervalo de 11% - 35%, el valor del SPT varía entre 2 y 12 golpes/pie, es útil señalar que dentro del sondeo 3 se encuentra un estrato de arena fina gris cuyo espesor es de 0.60 m.
- De 5.0 m a 8.0 m: Arcilla Limo Arenosa café oscura con vetas de oxidación, en donde el LL oscila entre 59% – 101%, el LP varía entre 27 - 72%, el IP está en el rango de 19% - 48% y el valor del SPT varía de los 2 a 7 golpes/pie, es importante mencionar que dentro del sondeo 1 se encuentra un estrato de 0.40 m de arena fina gris a la profundidad de 6.4 m. El nivel freático del sondeo 4 se encuentra a 5.7m.
- De 8 m a 9.0 m: Los sondeos que alcanzaron esta profundidad muestran la presencia de un estrato de arena con cortas intercalaciones de limo hasta terminar la perforación, el LL se encuentra entre 44% - 73%, el LP desde 27% - 35%, IP varía entre 17% - 38%, con valones de N de campo desde 6 hasta 34 golpes/pie. Aquí se halló el nivel freático del terreno en los sondeos 1 y 2, a 7.6 y 8 m respectivamente.

8.7. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para llevar a cabo la clasificación mecánica del suelo se realizaron ensayos de Pesos Unitarios, Consolidación, Compresión Inconfinada, Corte Directo, y Triaxial Estático (Los resultados obtenidos de los ensayos se pueden observar en los anexos K, L, M, N y O respectivamente), y así considerar diversos parámetros obtenidos a partir de las propiedades que definen el comportamiento que pueden presentar los diferentes materiales en estudio. A continuación se presentan las tablas resumen con los

resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio ejecutados,
organizados por sondeos:

Tabla 36 Resumen Resultados Clasificación Mecánica, Sondeos 1 al 5.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	PESO UNITARIO		CONSOLIDACIÓN				RESISTENCIA SUELOS									
									Total (Y _T) (Ton/m³)	Seco (Y _s) (ton/m³)	Índice de Compresión C _c	Índice de Expansión C _s	eo	σ _p (ton/m²)	Compresión inconfiada		Corte Directo			Triaxial Estático				
															Q _u (ton/m²)	C _u (ton/m²)	Total (Y _t) (Ton/m³)	Seco (Y _s) (Ton/m³)	C (Ton/m²)	φ (°)	Total (Y _t) (Ton/m³)	Seco (Y _s) (Ton/m³)	C (Ton/m²)	φ (°)
SONDEO 1	3,90	-	4,40	4.0	0,50	4,15		Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)	1,846	1,840					18,86	9,43	1,68	1,27						
	6,10	-	6,40	6.0	0,30	6,25	SH	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad	1,798	1,793	0,01267	0,00027	1,049	17,200	5,60	2,80								
SONDEO 2	1,60	-	2,00	2.0	0,40	1,80	SH	Arcilla habana con óxido	1,661	1,653	0,02112	0,02276	1,474	21,380										
	6,90	-	7,30	6.0	0,40	7,10	SH	Limo orgánico gris oscuro	1,641	1,641					26,50	13,30								
	7,70	-	8,10	7.0	0,40	7,90	SH	Limo verdoso												1,47	1,02	1,40	22,20	
SONDEO 4	2,80	-	3,30	2.0	0,50	3,05	SH	Arcilla Color Habana con gran oxidación a la anterior.													NA	NA	NA	
SONDEO 5	3,30	-	3,70	5.0	0,40	3,50	SH	Arcilla color habano oscuro									1,68	1,32	1,30	21,60				
	5,00	-	5,50	7.0	0,50	5,25	SH	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media	1,799	1,799	0,09366	0,01189	3,836	10,670	11,20	5,60								
	6,80	-	7,30	8.0	0,50	7,05	SH	Arcilla de color gris de consistencia media	1,549	1,541					3,70	1,80	1,76	1,17	4,10	19,20				

Fuente: Elaboración propia.

8.7.1. Compresión Inconfinada

El valor de carga última de un suelo es un parámetro que indica de manera aproximada el comportamiento del mismo ante la aplicación de cargas externas (suelos cohesivos), es por ello que para ciertos materiales presentes en la Finca La Santa María se realizaron cinco (5) ensayos de Compresión Inconfinada con el fin de determinar las resistencias o esfuerzos últimos, además de valores de la resistencia al corte (no consolidado – no drenado). En la

Tabla 37 se presentan los valores obtenidos a partir del ensayo:

Tabla 37 Resumen de los resultados ensayo Compresión Inconfinada.

No.	Profund. (m)			Tipo de Muestra	Descripción Campo	Peso Unitario		Compresión inconfinada	
						Total (γ_T) (ton/m ³)	Seco (γ_s) (ton/m ³)	Qu (ton/m ²)	Cu (ton/m ²)
S1	3.90	-	4.40	SH	Habana Clara, Poca Oxidación, Presencia de Arena (Notable)	1.846	1.840	18.86	9.43
	6.10	-	6.40	SH	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad	1.798	1.793	5.60	2.80
S2	6.90	-	7.30	SH	Limo orgánico gris oscuro	1.641	1.641	26.50	13.30
S5	5.00	-	5.50	SH	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media	1.799	1.799	11.20	5.60
	6.80	-	7.30	SH	Arcilla de color gris de consistencia media	1.549	1.541	3.70	1.80

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en el ensayo de Compresión Inconfinada, el comportamiento de los materiales extraídos en el sondeo 1 y sondeo 5 tienen una tendencia a profundidad similar que se puede observar en la Gráfica 10, es decir a bajas profundidades el valor de la resistencia al corte no drenado a rotura es mayor (9.43 y 5.60 ton/m²) respectivamente; por el contrario a profundidades mayores los valores de resistencia al corte no drenado son menores (2.80 y 1.10 ton/m²) respectivamente. Estos comportamientos son causados por la presencia de lentes de arenas las

cuales hacen que el contacto entre sus partículas sea menor y traiga como consecuencia la disminución de su cohesión.

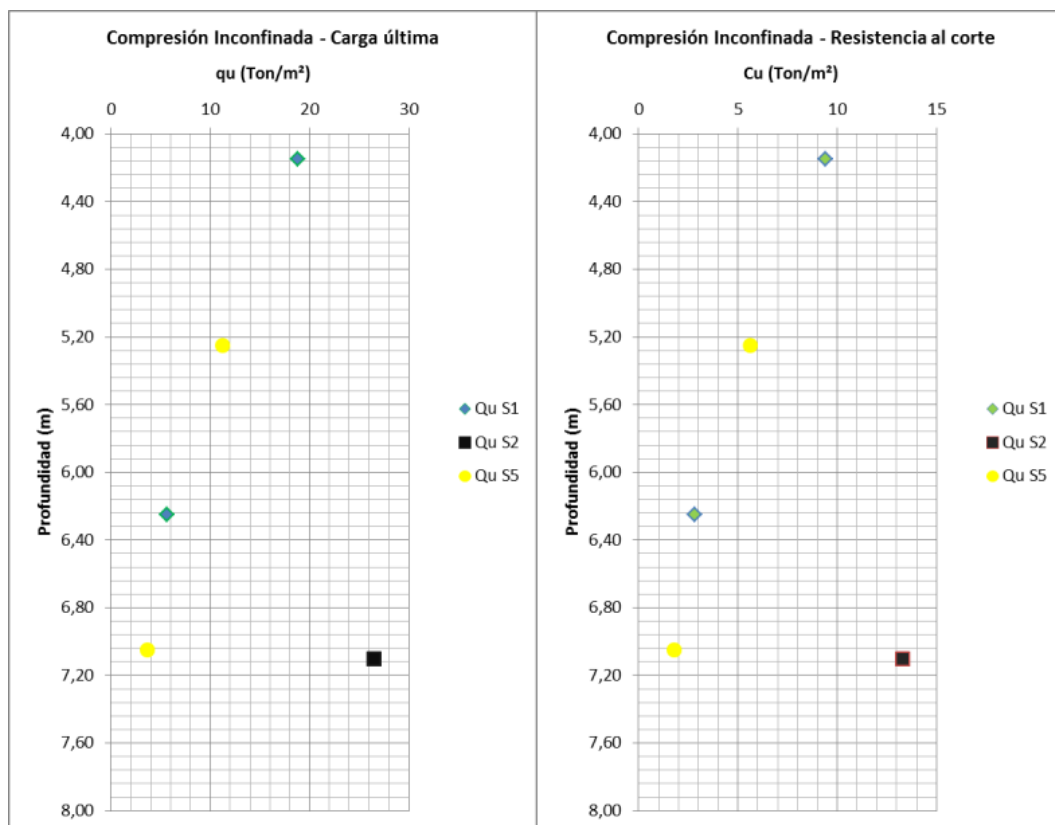
En la Tabla 38 se correlaciona la resistencia a la carga última de falla con respecto a la consistencia de suelo; para las muestras ensayadas la consistencia del subsuelo se encuentra entre los rangos de blanda para profundidades mayores y por el contrario de firme a muy firme para profundidades menores.

Tabla 38 Consistencia del suelo en función de la carga última.

Consistencia del suelo	Carga última (ton/m²)
Muy blanda	0 - 2.5
Blanda	2.5 - 5.0
Media	5.0 - 10.0
Firme	10.0 - 20.0
Muy Firme	20.0 - 40.0
Dura	> 40.0

Fuente: Das, B. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Thompson Learning, 2001

Gráfica 10 Comportamiento a profundidad de la carga última y la resistencia al corte no drenada.

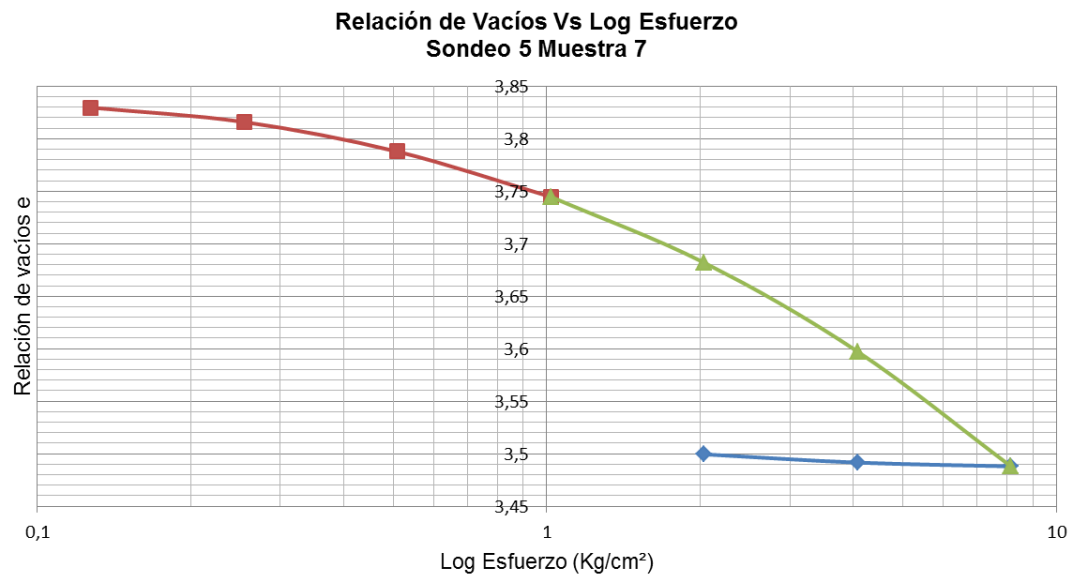


Fuente: Elaboración propia.

8.7.2. Consolidación Unidimensional

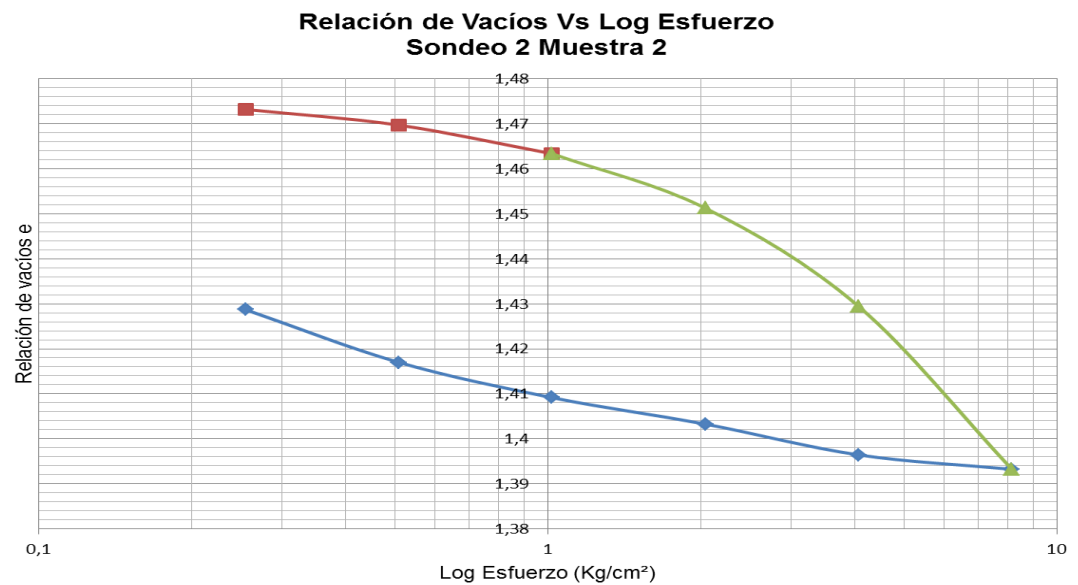
A continuación se presenta las curvas de Consolidación de las muestras a las que se les practico el ensayo de consolidación unidimensional, en la Gráfica 11, Gráfica 12 y la Gráfica 13 se observan el proceso de carga y descarga de cada una de las muestras y se diferencia el tramo de recompresión (línea roja), tramo virgen (línea verde) y tramo de descarga (línea azul).

Gráfica 11 Curva de Consolidación, Sondeo 5 Muestra 7.



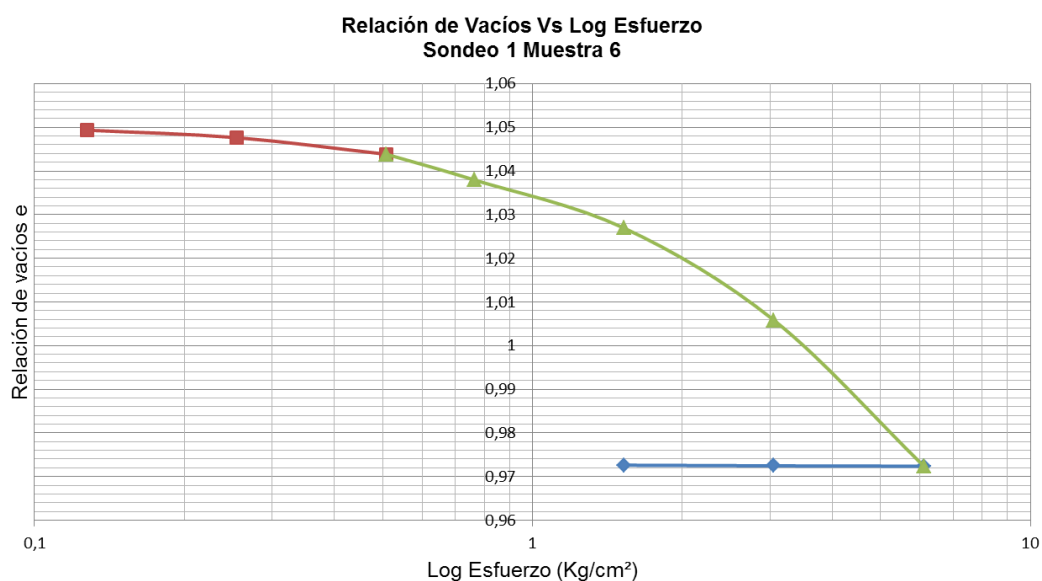
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 12 Curva de Consolidación, Sondeo 2 Muestra 2.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 13 Curva de Consolidación, Sondeo 1 Muestra 6.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte se reportan los resultados obtenidos en este ensayo sobre la muestra 6.0 del sondeo 1 que corresponde a una profundidad de 6.10 a 6.40, la muestra 2.0 del sondeo 2 con profundidad de 1.6m a 2.0m y la muestra 7.0 del sondeo 5 extraída de 5.0 a 5.5 m de profundidad; esto se realizó con el fin de obtener los parámetros de deformabilidad que se presentan en la Tabla 39:

Tabla 39 Resultados Consolidación Unidimensional.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Descripción Campo	Índice de Compresión	Índice de Expansión	Relación de Vacíos	Esfuerzo de Preconsolidación σ_p (ton/m²)
S1	6,10	-	6,40	6	Arcilla Habana Clara, Espejos de arena en gran cantidad	0,0127	0,0003	1,049	17,200
S2	1,60	-	2,00	2	Arcilla habana con óxido	0,0211	0,0228	1,474	21,380

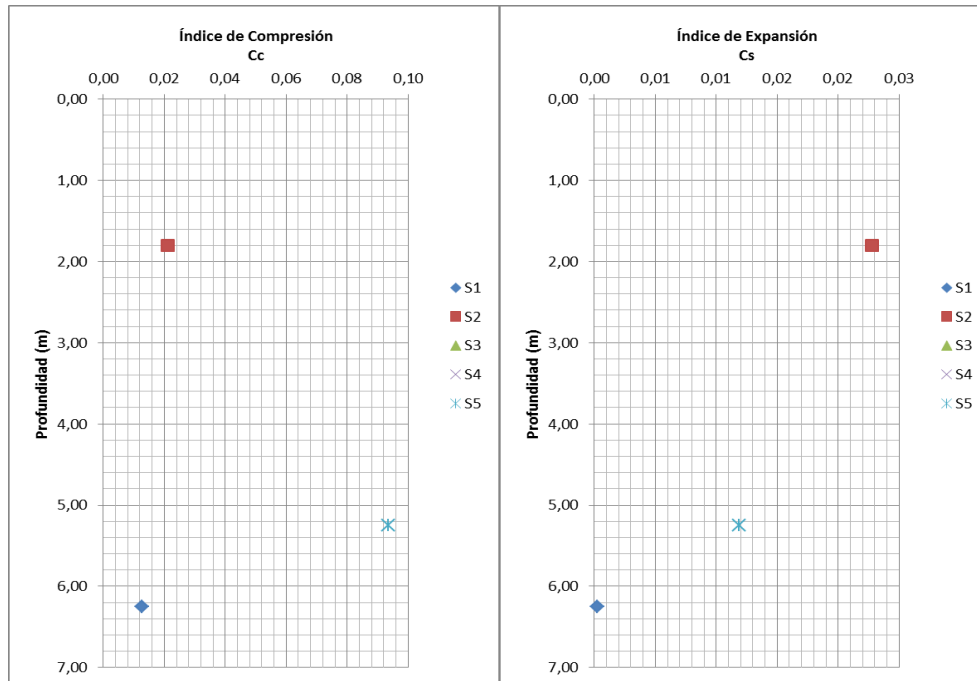
5	5,00	-	5,50	7	Arcilla de color habano claro con presencia de óxido y de consistencia media	0,0937	0,0119	3,836	10,670
---	------	---	------	---	--	--------	--------	-------	--------

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la anterior tabla se generó la Gráfica 14 en la cual se encuentra la variación a profundidad de los parámetros arrojados, los cuales se podrán encontrar en el ANEXO L donde se presentan los resultados del ensayo de consolidación para cada una de las muestras estudiadas; de estos resultados se deduce que el índice de compresión (C_c) varía entre 0.01267 y 0.02112, el índice de expansión (C_s) se halla entre 0.0027 y 0.01189; por otro lado el esfuerzo de preconsolidación se encuentra entre 10.6 y 21.38 ton/m²; estos valores se evidencian en la Tabla 39 y en la Gráfica 15, indicando que el material de la zona presentara pequeños asentamientos, así que se debe prestar atención moderada para futuras construcciones civiles.

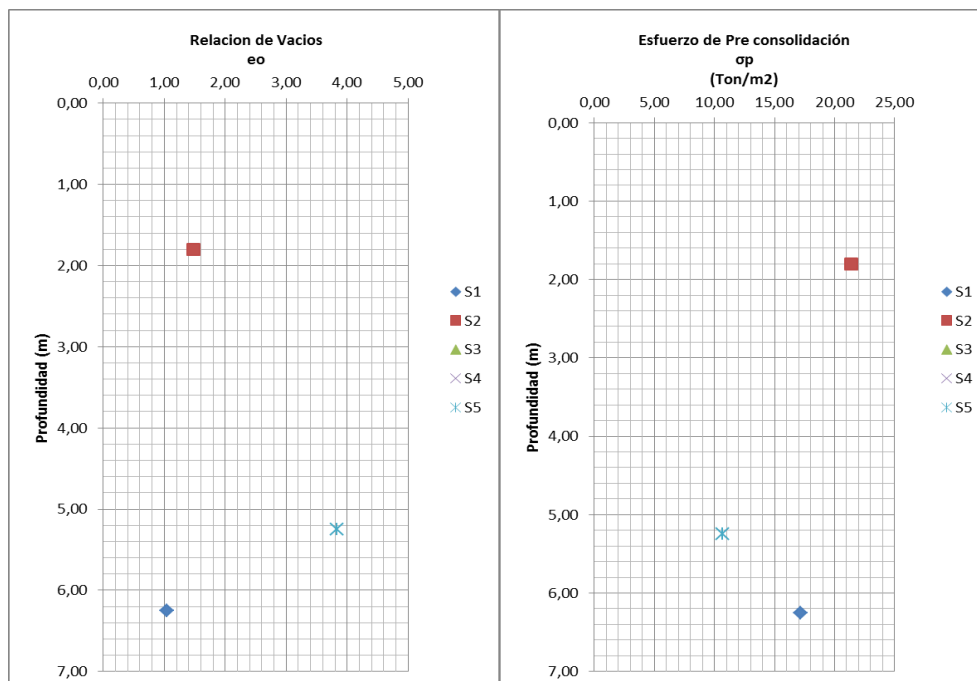
El material de la zona de estudio conserva una historia referente a la serie de eventos que acontecieron para su formación, es por ello que se dice que el suelo esta normalmente consolidado cuando recibe esfuerzos efectivos superiores a los que ha soportado en el pasado, mientras que se denomina suelo sobreconsolidado a aquel que soporta esfuerzos menores a los que sufrió previamente; teniendo en cuenta esto y los resultados anteriormente nombrados se identifica que para este caso la arcilla encontrada es sobreconsolidada, ratificando que la historia de los esfuerzos tiene una gran influencia sobre el comportamiento del material.

Gráfica 14 Variación de los índices de compresión y expansión de los sondeos ejecutados en la Finca La Santa María.



Fuente Elaboración propia.

Gráfica 15 Variación de la relación de vacíos y el esfuerzo de preconsolidación de los sondeos ejecutados en la Finca La Santa María.



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo se hizo necesario encontrar la relación de sobreconsolidación (OCR) del suelo en estudio para reiterar la información suministrada en los resultados, como se observa a continuación:

Tabla 40 Resultado Calculo del OCR (Over Consolidation Ratio).

Sondeo	1	2	5
Muestra	6	2	7
Profundidad media (m)	6.25	1.80	5.25
γ_t (ton/m³)	1.61	1.48	1.50
Esfuerzo σ_p (ton/m²)	17.20	21.38	10.67
Esfuerzo σ_v (ton/m²)	10.06	2.66	7.88
OCR	1.71	8.03	1.35

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 40 se presenta el cálculo del OCR que para un suelo normalmente consolidado es igual a uno ($OCR=1$), y para un suelo sobreconsolidado debe ser mayor a uno ($OCR>1$), así que según los resultados obtenidos del OCR, se confirma que para las tres muestras ensayadas los suelos son sobreconsolidados; sin embargo en la muestra 2 sondeo 2 se obtuvo un OCR de 8.03 debido a que esta se encuentra a una profundidad media de 1.8 m y un esfuerzo de preconsolidación de 21.38 ton/m² que al relacionarla con el esfuerzo efectivo de 2.66 ton/m² genera un mayor OCR en comparación a las otras muestras que se encuentran a profundidad de 6.25 m y 5.25 m, arrojando un OCR menor.

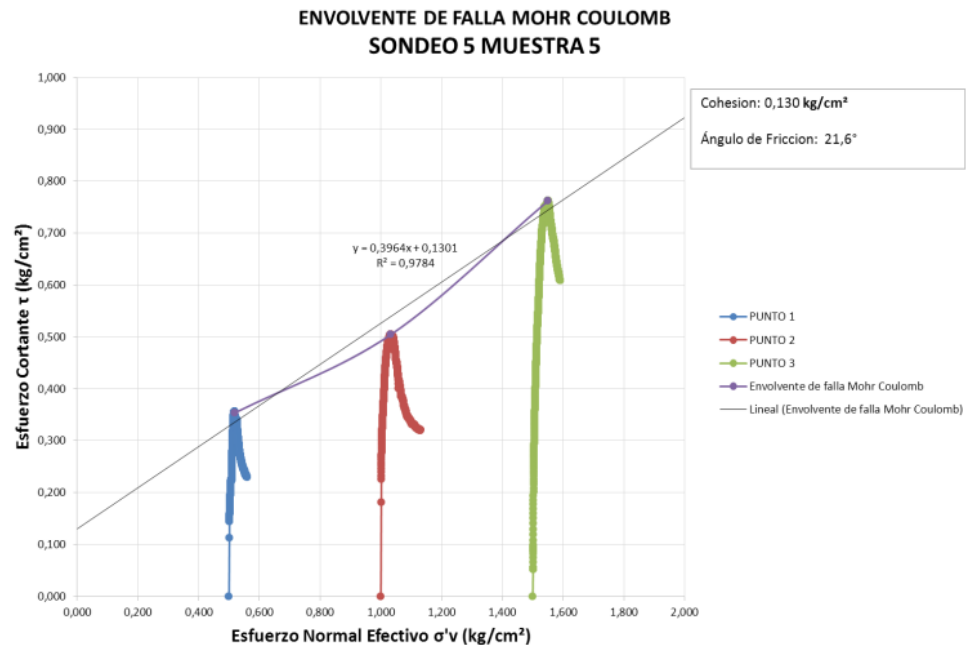
8.7.3. Corte Directo

Para definir el valor de la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo al estar sometido a un esfuerzo cortante se debe determinar la resistencia al corte de una muestra sometida previamente a un proceso de consolidación, después de consolidarse se le aplica el esfuerzo de cizalladura o corte directo lo que permite la compresión del comportamiento que dicho suelo presentara al construirse cualquier estructura civil; en cada una de las muestras se determinó la velocidad de

falla, según el tiempo de consolidación y la gráfica obtenida por el método de Taylor, dando como resultado una velocidad de 0,05 mm/min para la muestra 5 del sondeo 5 y una velocidad de 0,04 mm/min para la muestra 8 del sondeo 5.

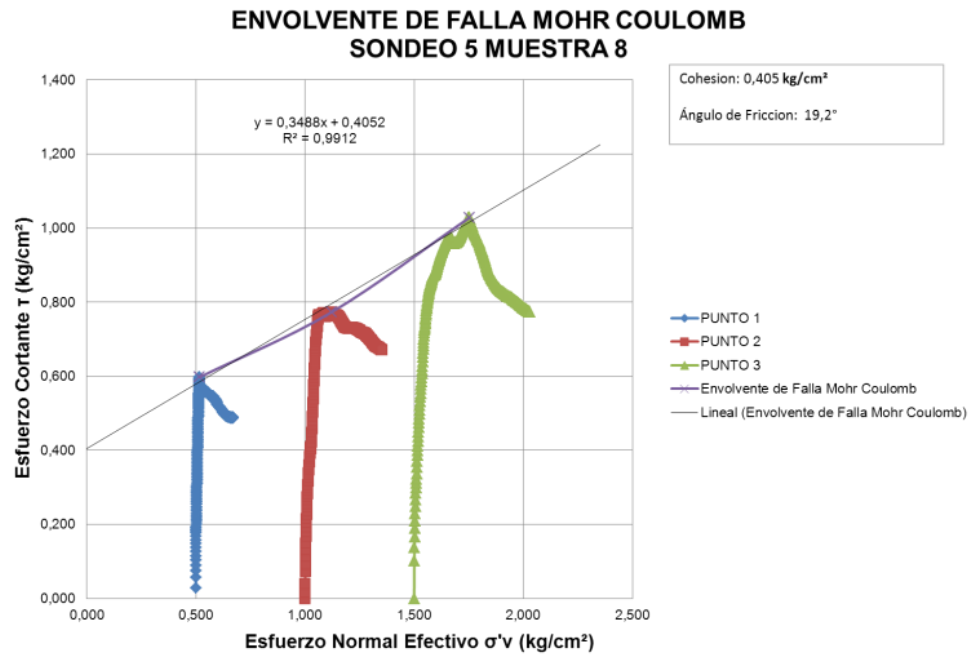
El ANEXO N contiene los resultados arrojados de la máquina de corte para cada uno de los puntos de esfuerzo preestablecidos, junto a las gráficas de resultados y cálculos realizados; dentro de este anexo, con el fin de analizar los resultados obtenidos, se creó una gráfica en la que se establecen los puntos máximos de cada uno de los cortes en donde se determina la línea de tendencia y de ahí se extraen los datos para calcular posteriormente los parámetros de corte mediante la ecuación lineal, arrojando una ecuación del estilo $y=mx+b$, donde la pendiente (m) será igual a la relación entre los cambios en los esfuerzos graficados, siendo viable encontrar el Ángulo de fricción θ de la siguiente manera $\theta = \tan^{-1}(m)$.

Gráfica 16 Envoltente de falla Mohr Coulomb, Sondeo 5 Muestra 5.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 17 Envolvente de falla Mohr Coulomb, Sondeo 5 Muestra 8.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Gráfica 16 y Gráfica 17 se conoce experimentalmente los parámetros de cohesión y ángulo de fricción que definen la resistencia del suelo, estos parámetros se resumen en la siguiente tabla, donde además se presenta el peso unitario total (γ_t) y el peso unitario seco (γ_s).

Tabla 41 Tabla parámetros de resistencia del suelo mediante ensayo de corte directo.

No.	Profundidad (m)		Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	RESISTENCIA SUELOS			
								CORTE DIRECTO			
								Total (γ_t) (ton/m ³)	Seco (γ_s) (ton/m ³)	c (ton/m ²)	ϕ (°)
SONDEO 5	3,30	-	3,70	5,0	0,40	3,50	SH Arcilla color habano oscuro	1,68	1,32	1,30	21,60
	6,80	-	7,30	8,0	0,50	7,05	SH Arcilla de color gris	1,76	1,17	4,10	19,20

								de consistencia media				
--	--	--	--	--	--	--	--	--------------------------	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

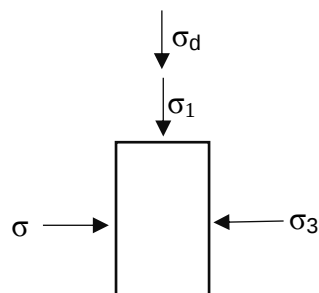
A partir de los ensayos realizados se ha encontrado que los parámetros de suelo en cuanto al ángulo de fricción y la cohesión por el método de corte directo son más confiables que el análisis llevado a cabo en el numeral 8.2.1 donde se realizó un estimativo del ángulo de fricción a partir del SPT, pero en este caso al realizar la comparación de los ángulos de fricción obtenidos, de una u otra forma, se establece la similitud en los resultados por lo que pueden ser adoptados para el diseño de la obra que se vaya a realizar.

8.7.4. Triaxial Estático

En complementación a la caracterización mecánica del subsuelo presente en la Finca La Santa María, se realizaron ensayos Triaxiales de tipo Consolidado – No Drenado (CU) con el fin de obtener los parámetros de resistencia al corte. Este tipo de ensayos permite la determinación la presión de poros para obtener los resultados de cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ) en términos de los esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.

Estos criterios se definen de la siguiente manera:

Figura 28 Condiciones de esfuerzo de una muestra de suelo sometida a un ensayo Triaxial estático.



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 7 Esfuerzo desviador.

$$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$$

Ecuación 8 Presión isotrópica de la muestra.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \sigma_3 = \sigma_2$$

Ecuación 9 Presión isotrópica (simplificada).

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

Ecuación 10 Presión isotrópica efectiva.

$$p' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - \mu$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores y al ser este un ensayo no drenado (CU), se obtienen las siguientes ecuaciones con las cuales se determinan las trayectorias para esfuerzos totales y para esfuerzos efectivos:

Ecuación 11 Esfuerzo Desviador (CU).

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{(\sigma_3 + \sigma_d) - \sigma_3}{2}$$

Ecuación 12 Esfuerzo Desviador Efectivo.

$$q' = \frac{(\sigma_3 + \sigma_d) - \sigma_3}{2} - \mu$$

En este caso, al igual que el análisis del corte directo, se determina el ángulo de fricción y la cohesión por medio de la ecuación de la recta que se establece por medio de la línea de tendencia trazada con los puntos

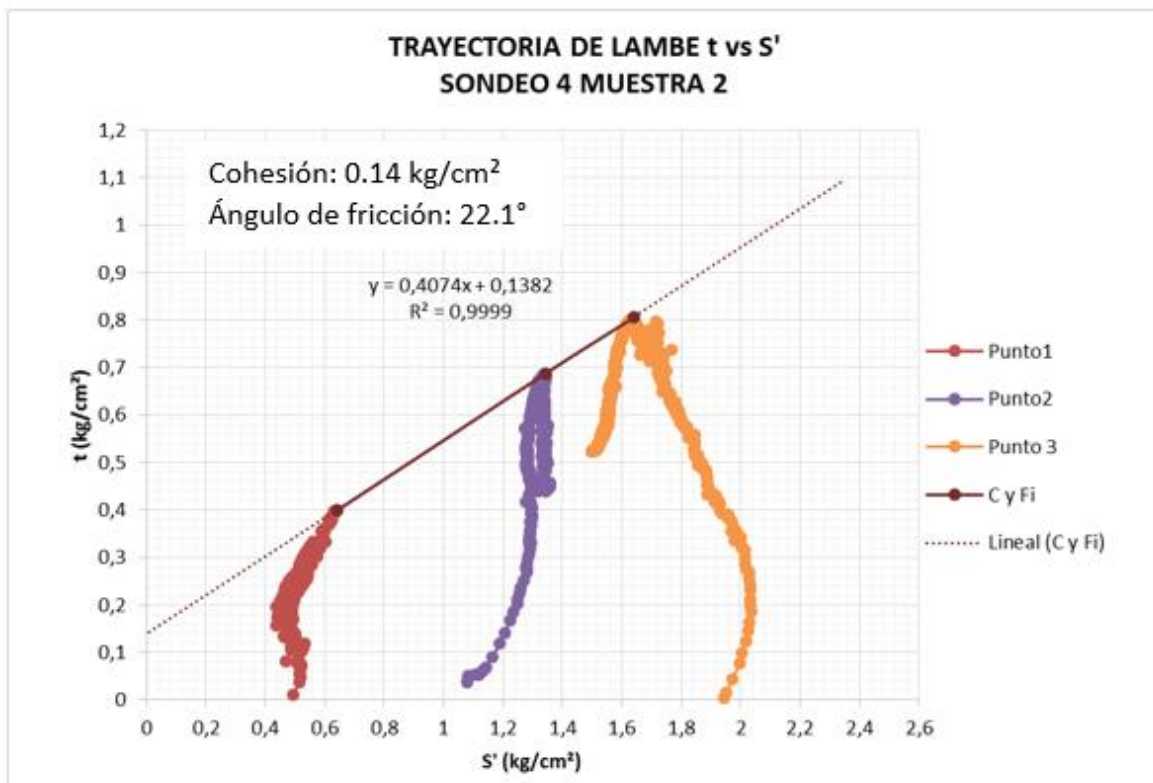
máximos de cada bastón de esfuerzo de la Gráfica 18, de la que se presentan sus valores en la Tabla 42:

Tabla 42 Resultados de ensayo triaxial estático.

No.	Profundidad (m)			Muestra	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Tipo de Muestra	Descripción Campo	RESISTENCIA SUELOS			
									TRIAXIAL ESTÁTICO			
									Total (Yt) (ton/m ³)	Seco (Ys) (ton/m ³)	c (ton/m ²)	φ (°)
SONDEO 2	7,70	-	8,10	7.0	0,40	7,90	SH	Limo verdoso	NR	NR	NR	NR
SONDEO 4	2,80	-	3,30	2.0	0,50	3,05	SH	Arcilla Color Habana con gran oxidación a la anterior.	1,47	1,02	1,40	22,20

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 18 Trayectoria de Lambe t vs s', Sondeo 4 Muestra 2.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 42 se evidencian los resultados del sondeo 4 muestra 2 los cuales reportan un ángulo de fricción de 22.20° y una cohesión de 1.40 ton/m^2 , mientras que las celdas con NR (No Relacionado) se deben a problemas técnicos que surgieron durante el ensayo del laboratorio tales como inconvenientes eléctricos durante las etapas de saturación y consolidación en las que se presentaba un retroceso generando cambios de presión aplicados a la muestra, por lo que los resultados del ensayo se vieron alterados, sin embargo con el valor que se tiene se puede comparar con la bibliografía relacionada a los suelos con lo que se deduce que el material ensayado corresponde a un material arcillo arenoso o a una arcilla de consistencia media, dos materiales cohesivos; los resultados de las muestras ensayadas pueden ser verificados en el ANEXO O.

8.8. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

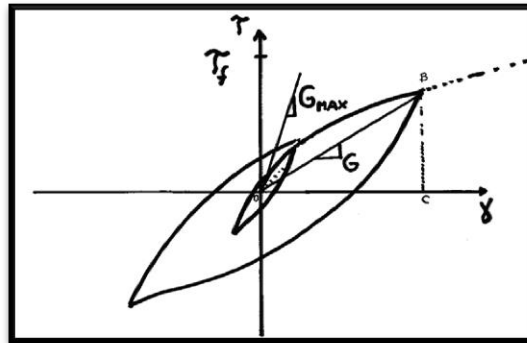
En cuanto a la clasificación dinámica de los materiales encontrados en la finca La Santa María, es importante conocer las propiedades del material de interés como lo son el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) y la relación de amortiguamiento (λ), de tal forma que se lleve a cabo la evaluación de los comportamientos dinámicos y los sistemas de interacción suelo estructura.

El ensayo de Triaxial Dinámico por deformación controlada fue empleado como base experimental para la caracterización dinámica; en la Figura 29 se evidencia la gráfica del ciclo de carga y descarga en la que se obtiene el módulo de rigidez (G), que es la pendiente del punto máximo del ciclo y la relación de amortiguamiento (λ) que está dada como resultado del cociente del ciclo carga-descarga y la energía suministrada al suelo como se ve en la siguiente ecuación:

Ecuación 13 Relación de amortiguamiento.

$$\lambda = \frac{\text{Pérdida de energía}}{\text{Energía aplicada al suelo}} = \frac{\text{Área primer ciclo}}{4\pi \text{ Área del triángulo } OBC}$$

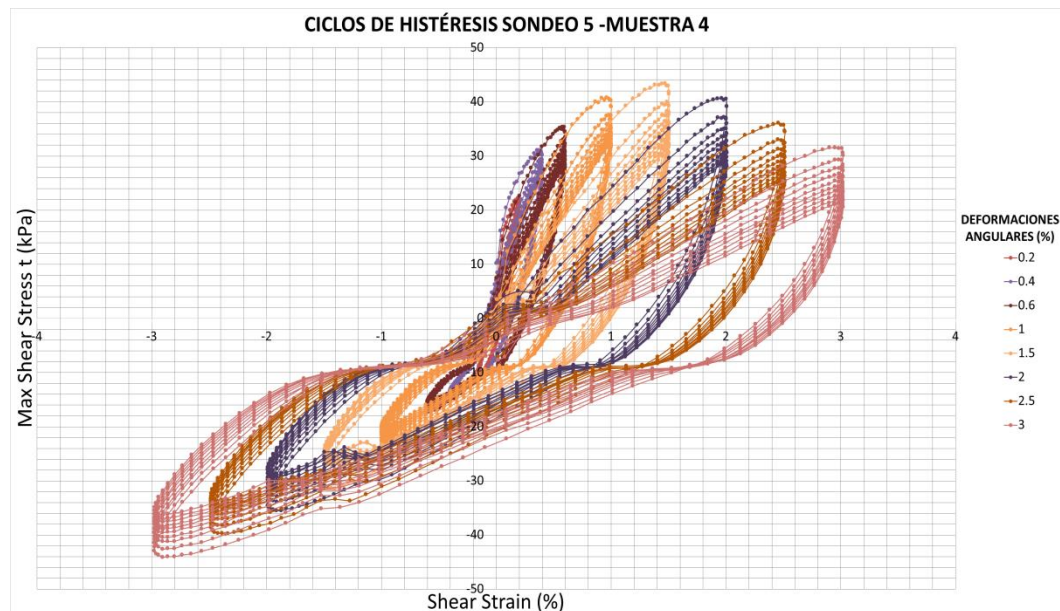
Figura 29 Proceso cíclico (carga y descarga).



Fuente: RODRÍGUEZ Edgar. Comportamiento dinámico de suelos y rocas (Diapositivas). Bogotá, 2013.

En la Figura 30 se presenta el ciclo de histéresis para la muestra ensayada a deformaciones angulares (γ) entre 0.2% y 3.0%, estas deformaciones corresponden a un comportamiento Elasto-plástico en las que se evidencia la degradación del módulo de rigidez a medida que el nivel de deformación aumenta.

Figura 30 Ciclos de Histéresis para distintas deformaciones angulares (γ).



Fuente: Elaboración propia.

Con base en la curva de histéresis es posible obtener las curvas $G/G_{\text{máx}}$ vs $\gamma\%$, donde $G_{\text{máx}}$ es el módulo de rigidez dado para deformaciones escogidas que van desde 0.2% hasta 3% como se mencionó anteriormente, de la misma manera las curvas de relación de amortiguamiento (λ) vs deformaciones angulares ($\gamma\%$), las dos curvas se presentan a continuación unidas en un solo diagrama con el fin de reconocer la relación de cada una, adicionalmente se presenta en la Tabla 43 el cálculo de las propiedades dinámicas calculadas para el sondeo 5 muestra 4:

8.8.1. Sondeo 5, Muestra 4 (Profundidad media 2.30 m)

Se realizó el ensayo a la muestra 4 del sondeo 5, que corresponde a una arcilla de color café clara encontrada a una profundidad media de 2.3 m, este material tiene un comportamiento estándar ya que la relación $G/G_{\text{máx}}$ se degrada a medida que la deformación angular (γ) aumenta, así mismo, se demuestra que la relación de amortiguación aumenta

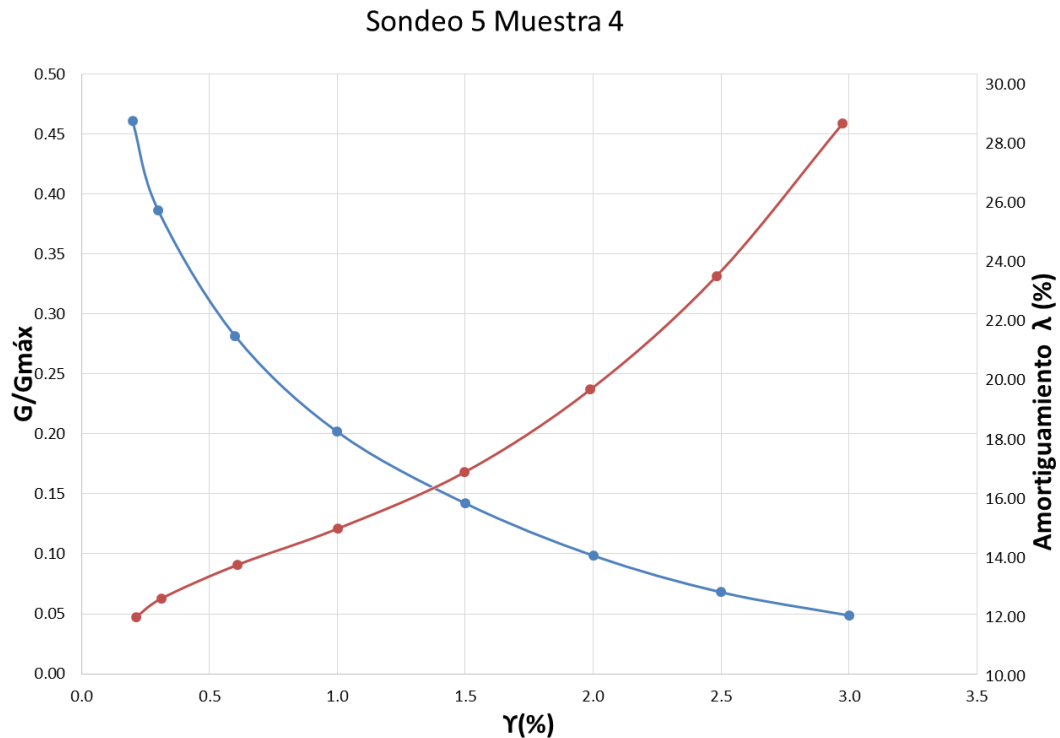
siendo directamente proporcional a la deformación angular (γ), estas dos curvas se ven relacionadas en la Gráfica 19.

Tabla 43 Cálculo Propiedades Dinámicas, Sondeo 5 Muestra 4.

γ_c (%)	G (kPa)	G _{máx} (kpa)	G/G _{máx}	Área ciclo (mm ²)	Área triángulo (mm ²)	λ
0,2	80,24	174,15	0,46	2,18	1,44	12,01
0,3	67,32		0,39	6,81	4,29	12,64
0,6	49,09		0,28	14,17	8,19	13,77
1	35,14		0,20	30,61	16,24	15,00
1,5	24,76		0,14	56,79	26,76	16,89
2	17,16		0,10	81,79	33,06	19,69
2,5	11,84		0,07	105,53	35,71	23,52
3	8,47		0,05	128,38	35,63	28,67

Fuente: Elaboración propia.

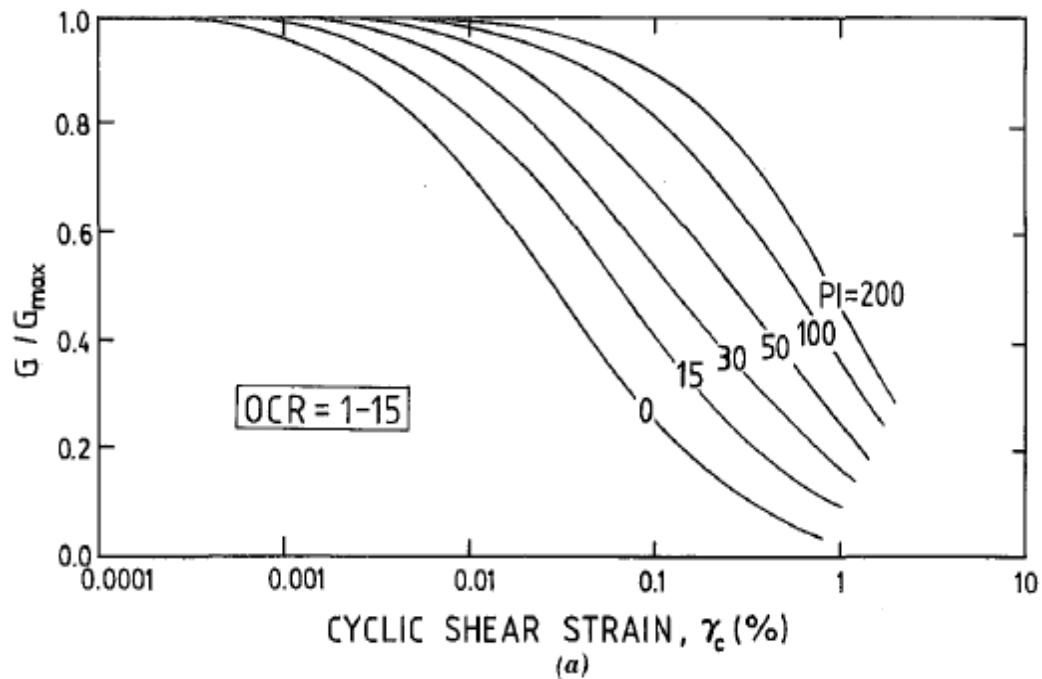
Gráfica 19 Degradación del módulo G y Comportamiento del λ en relación a γ % para el Sondeo 5 Muestra 4.



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar un análisis más detallado de las propiedades dinámicas obtenidas, teniendo en cuenta que el único ensayo dinámico realizado a estas muestras es el Triaxial Cíclico, se empleó lo expuesto por Vucetic & Dobry en el artículo llamado “Efecto de la Plasticidad del suelo sobre la Respuesta Cíclica”, donde se establecen métodos experimentales para arcillas normalmente consolidadas y sobreconsolidadas, en otras palabras el material presenta un OCR de 1 a 15. Este artículo trae consigo los datos empíricos reunidos de 16 publicaciones donde se demuestra las variaciones de $G/G_{m\acute{a}x}$ y λ con respecto a diferentes deformaciones angulares (γ). Esta variación se ve afectada según el tipo de material ya que el suelo cohesivo se comportara diferente al no cohesivo; en la Figura 31 se observa la variación de $G/G_{m\acute{a}x}$ para distintos IP, para materiales cohesivos el parámetro de análisis está dado por el índice de plasticidad (IP) ya que a medida que este aumenta, $G/G_{m\acute{a}x}$ necesita una mayor deformación para degradarse, es decir que para un IP de 100 y 200% $G/G_{m\acute{a}x}$ empieza a disminuir a partir de una deformación cercana a 0.01%, por el contrario para un material de un IP=15%, $G/G_{m\acute{a}x}$ empieza a degradarse a partir de bajas deformaciones (0.001%).

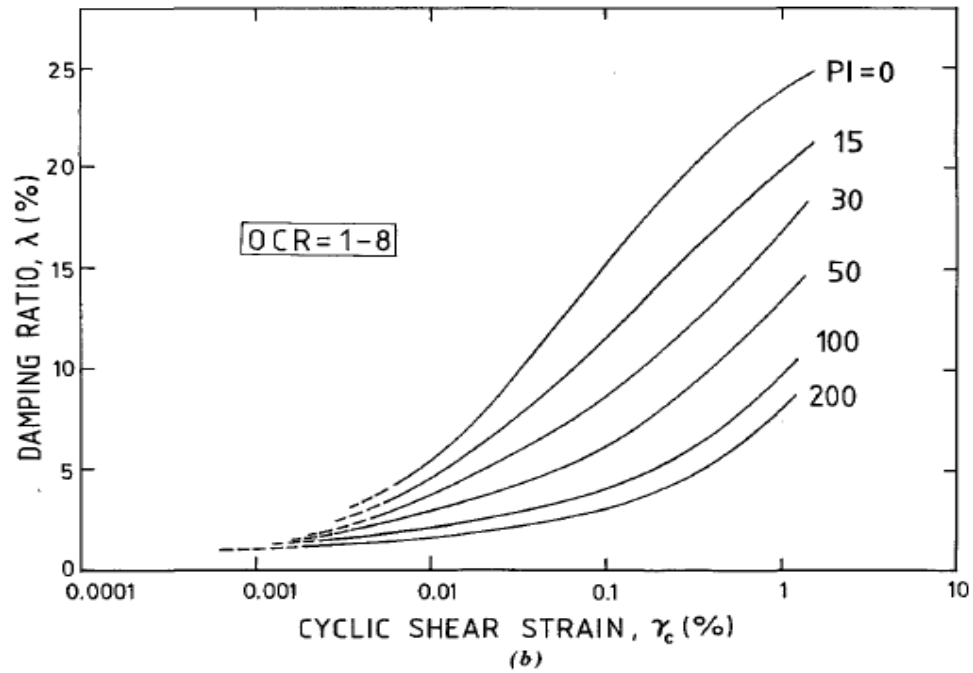
Figura 31 Correlación entre $G/G_{\max}$ vs γ y el IP - Suelos Normalmente Consolidados y Sobre consolidados



Fuente: VUCETIC M. AND DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response. EEUU, 1991.

Por otra parte, con respecto a la Figura 32 que correlaciona el λ vs γ con el IP se desarrolla la teoría de que el comportamiento de los materiales con alta plasticidad poseen un porcentaje bajo de amortiguación como se demuestra en la correlación realizada por Vucetic & Dobry, esto se debe a la importancia del área específica existente entre las partículas que generan enlaces eléctricos y fuerzas de repulsión entre las mismas; ante estos escenarios, aquellos materiales con un IP alto están en capacidad de soportar grandes deformaciones ($\geq 0.1\%$) antes de llegar a la falla. Adicionalmente se aclara que el porcentaje de amortiguación en materiales de $IP=0$ como las arenas y gravas es alto, ya que estas poseen un menor contacto entre las partículas debido a la fricción, tamaño y sus enlaces dados por la gravedad.

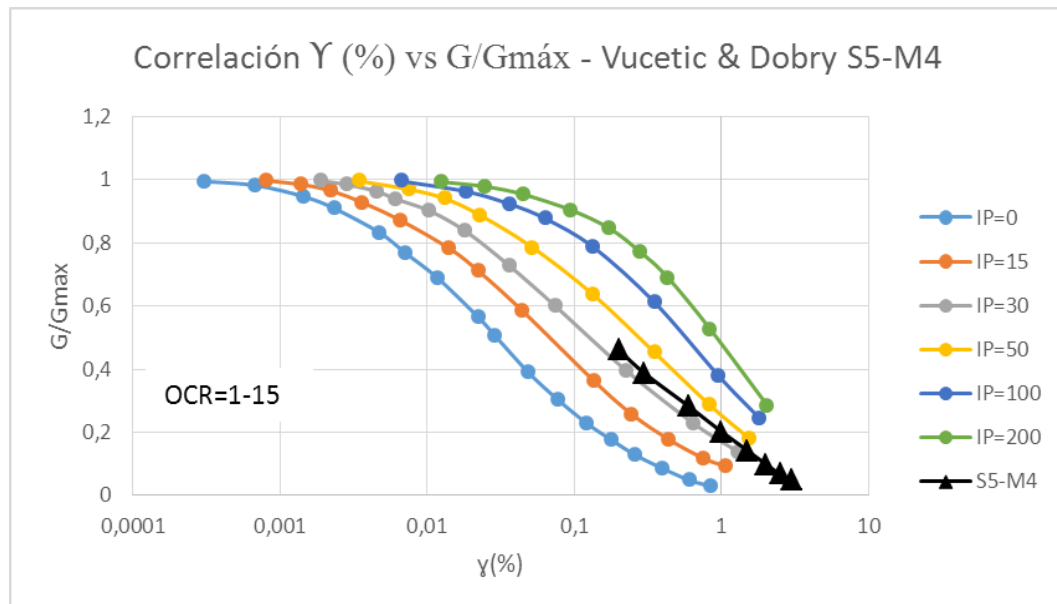
Figura 32 Correlación entre λ vs γ y el IP – Suelos Normalmente Consolidados y Sobre consolidados



Fuente: VUCETIC M. AND DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response. EEUU, 1991.

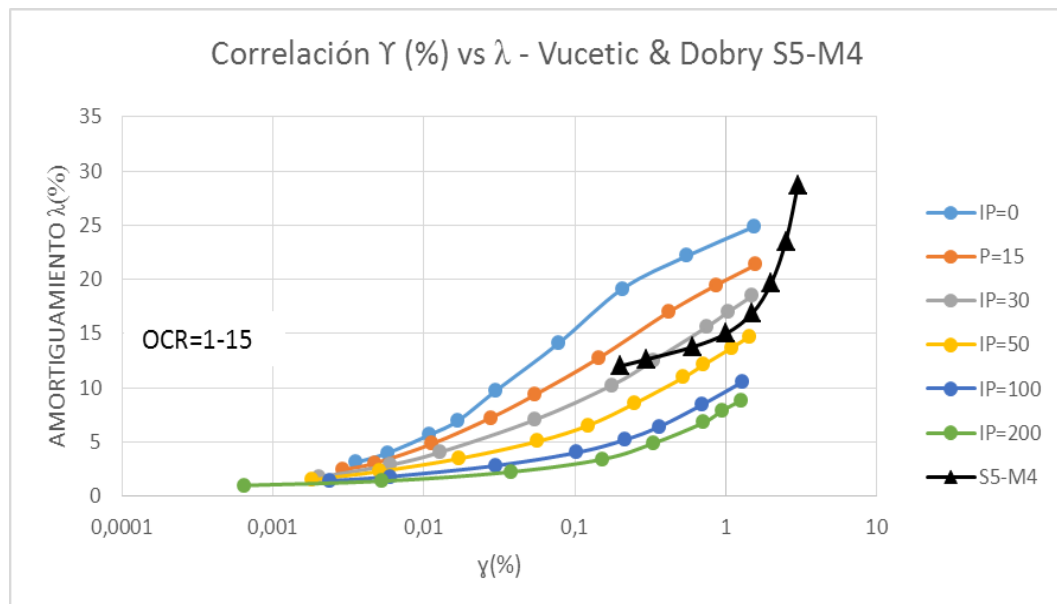
Según lo anterior, ahora se relacionan los parámetros obtenidos en el laboratorio mediante el ensayo de Triaxial y lo expuesto por Vucetic & Dobry:

Gráfica 20 Comparación Triaxial Cíclico de laboratorio vs Correlación Vucetic and Dobry ($G/G_{\max}$ vs γ %), Sondeo 5 Muestra 4.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 21 Comparación Triaxial Cíclico de laboratorio vs Correlación Vucetic and Dobry (λ vs γ %), Sondeo 5 Muestra 4.



Fuente: Elaboración propia.

Al yuxtaponer las correlaciones ya mencionadas con los resultados del ensayo de la muestra 4 perteneciente al sondeo 5, se evidencia en la Gráfica 20 que existe una tendencia similar de degradación del módulo, que para este caso, se ubica en un rango de IP comprendido entre 30 a 50, lo cual se efectúa cabalidad con los límites reportados en el numeral 8.4. del presente documento; concerniente a la Gráfica 21, la línea en color negro que representa los resultados del análisis cumple la tendencia entre el índice de plasticidad de 30 a 50 hasta la deformación de 3%, de ese punto en adelante la línea tiene una tendencia ascendente sin variar mucho en la deformación, por lo que se deduce que el material ha fallado.

8.9. CURVAS TÍPICAS DE SUELOS FINOS DE BOGOTÁ

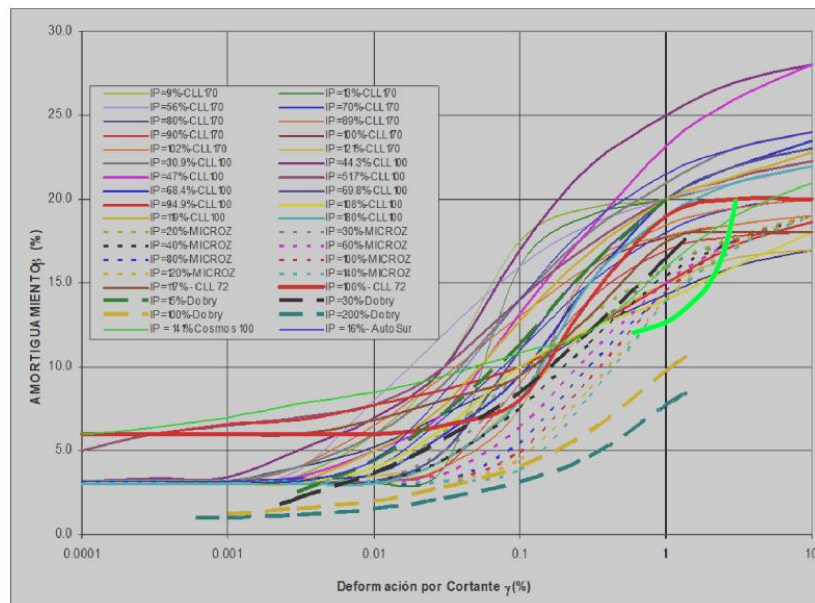
Para realizar la comparación de los resultados obtenidos con materiales de características similares se emplearon las curvas típicas de degradación del módulo de rigidez y de amortiguamiento para suelos finos de Bogotá elaboradas por Rodríguez Edgar y Moreno Carlos, a partir de estudios realizados en la calle 100 y 170 y la microzonificación sísmica de la ciudad.

[illegible]

De acuerdo al comportamiento encontrado en el análisis de la degradación del módulo de rigidez expuesto anteriormente en la

Gráfica 22 se obtiene que la curva correspondiente al ensayo se encuentra dentro del rango de las curvas típicas de suelos finos para la ciudad de Bogotá, en función del índice de plasticidad el cual en este caso al contar con un índice de plasticidad del 35% el cual se obtuvo de los ensayos de límite de plasticidad y límite líquido, se compara con la curva de la calle 100 con un índice mayor (47%), con ello se corrobora que el ensayo efectuado puede ser empleado para el análisis del espectro de diseño al igual que la anterior comparación realizada con las curvas del artículo de Vucetic and Dobry.

Gráfica 23 Curva típica degradación del amortiguamiento.



Fuente: MORENO RUIZ, Carlos Andrés. Comportamiento dinámico de Turbas y su efecto en la propagación de las ondas sísmicas. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. 2003.

Ahora de acuerdo a la Gráfica 23 la cual corresponde a las curva típica de degradación del amortiguamiento para los suelos finos de Bogotá se encuentra que la curva realizada para los materiales en estudio no se adecua a las expuestas por Carlos Moreno Ruiz en el estudio que realizo, sin embargo en este caso se considera que la tendencia del

amortiguamiento aumenta hasta un punto donde el porcentaje de deformación no se altera en gran proporción, ya que la muestra pudo llegar a su punto máximo de falla, considerando que para un mejor análisis de amortiguamiento se deben realizar otros ensayos como complemento y así conocer el comportamiento completo.

9. CONCLUSIONES

Para iniciar la exploración de campo, se recopiló y evaluó documentación técnica disponible en el mapa topográfico realizado por parte de la dependencia de planta física de la Universidad La Gran Colombia, fotografías tomadas en las visitas de reconocimiento y exploración, mapas geotécnicos e informe técnico realizado por la concesión Devinorte del Puente La Caro que se encuentra ubicado cerca al predio; en esta etapa de reconocimiento es necesario hacer énfasis en la descripción de los rasgos y procesos que se observan más que en su interpretación.

Este informe se efectuó con base en los resultados de la campaña de exploración del subsuelo y en el cronograma de ensayos de laboratorio realizado por los integrantes del equipo de trabajo, en función de las muestras recuperadas la campaña de exploración se elaboró en la semana del 18 al 22 de agosto del 2014 donde previamente se había establecido los sitios donde se ubicarían los sondeos distribuidos de tal manera que se tuviera la mayor cantidad de información en las muestras para ensayar y analizar.

Los ensayos de laboratorio fueron realizados de acuerdo a las especificaciones Invias del año 2007 las cuales estaban vigentes en 2014, año en el que se realizaron los ensayos por parte de los integrantes del Trabajo de Grado, y eventualmente la experiencia de los laboratoristas y apoyo constante del director del Trabajo; sin embargo, se aclara que se detectaron inconvenientes debidos a la interpretación de las normas utilizadas y a la falta de instrumentos de trabajo y organización del laboratorio (inventario de utensilios y equipos necesarios para cada ensayo).

Se estableció el perfil típico de acuerdo a los materiales encontrados en campo y los resultados de clasificación realizados en el laboratorio, es por ello que se presenta la Tabla 44, donde se muestra los materiales encontrados y

posteriormente se establecen los ensayos a realizar y las profundidades para homogenizar y recoger el mayor número de parámetros.

Tabla 44 Tabla del perfil de típico encontrado en la zona de estudio.

MATERIAL	PROFUNDIDAD (m)	
	Desde	Hasta
Limo Orgánico	0.0	2.0
Arcilla habana oxidada	2.0	5.0
Arcilla Limo Arenosa café oscura con vetas de oxidación	5.0	8.0
Arena fina gris	8.0	9.0

Fuente: Elaboración propia.

Según los 86 ensayos de laboratorio realizados para la elaboración del Trabajo de Grado, y que se especifican en la Tabla 15 por tipo de ensayo, en la Tabla 45 se presentan los parámetros obtenidos para los dos materiales típicos encontrados y ensayados, los cuales se establecieron a partir de la selección y análisis de todos los resultados, concluyendo que el suelo de la Finca La Santa María es homogéneo en cuanto a materiales, la siguiente tabla es un análisis realizado pero no es la única interpretación que se le puede dar a la totalidad de los resultados, en este caso se realizó un análisis de todos los resultados que se pueden encontrar en el cuerpo del presente trabajo y en el ANEXO D por si es necesario realizar alguna clarificación.

Tabla 45 Tabla de parámetros típicos para el suelo de la Finca La Santa María.

Material	Humedad Natural Wn (%)	Contenido Orgánico	Gravedad Específica	Peso Unitario Total (γT) (Ton/m³)	Índice de Compresión Cc	σ_p (Ton/m²)	Cu (Ton/m²)	C (Ton/m²)	ϕ (°)
Arcilla Limosa	51%	7%	2.43 - 2.54	1.64 - 1.73	0.04	16.42	4.91 – 13.30	1.35	20.4
Arena	73%	--	2.60	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

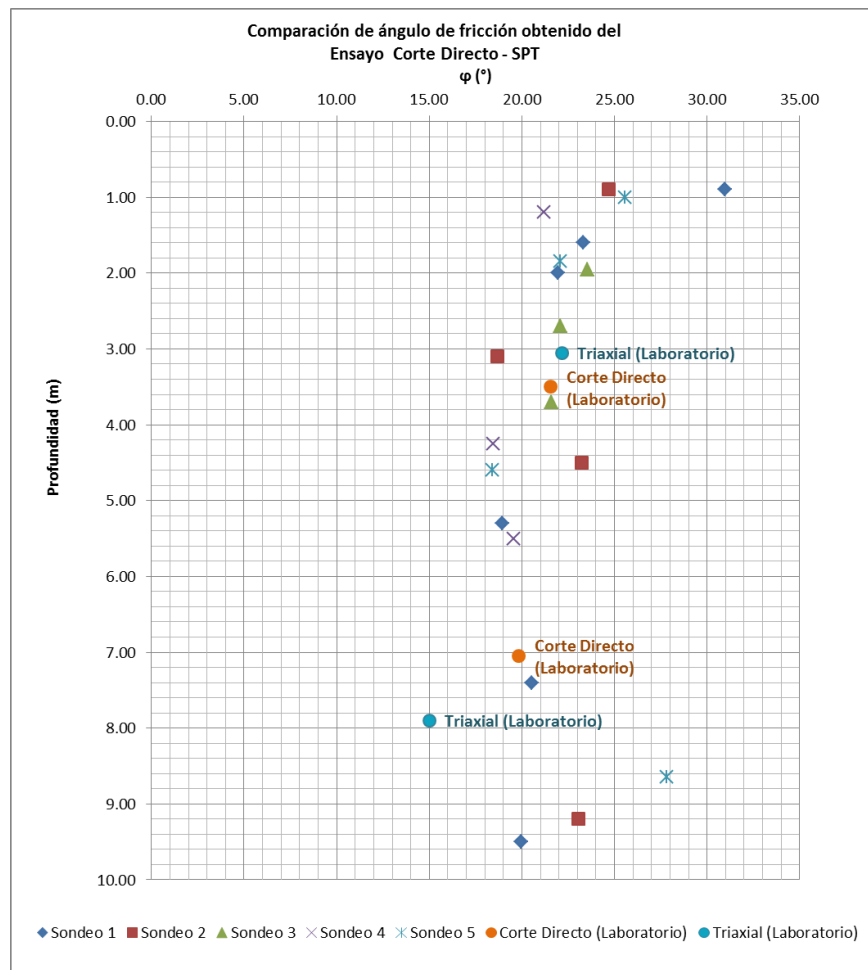
Por otra parte, a partir del ensayo de compresión inconfiada se presenta disminución de la resistencia al corte no drenada a medida que la profundidad del

suelo aumenta, lo que se debe a la composición de diferentes tipos de materiales que además traen como consecuencia la degradación de su cohesión y por ende la pérdida de la resistencia ante la aplicación de cargas axiales; en cuanto al ensayo de consolidación se concluye que los materiales ensayados son suelos arcillosos blandos que se encuentran sobreconsolidados, lo cual permite la construcción de edificaciones de categoría baja y media sin presentar asentamientos grandes; no obstante a los limos se debe prestar atención porque al ser materiales depositados para nivelar el terreno en antiguos humedales y lagos característicos de la zona de la sabana de Bogotá se encuentran normalmente consolidados cerca de la superficie, situación que generará asentamientos altos, evento característico en varias construcciones realizadas en la parte norte de la Ciudad de Bogotá.

Debido a la consistencia de los materiales, no fue posible la obtención de una gran cantidad de muestras inalteradas tipo Shelby, lo cual impidió una mayor determinación de los parámetros de resistencia a partir de ensayos de laboratorio en este tipo de muestras, razón por la cual se realizaron las correlaciones con el ensayo de SPT, la revisión de la literatura técnica existente sobre materiales de características similares y en ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas (Split Spoon).

Como se mencionó en el anterior párrafo, se realizó la comparación de los resultados del ángulo de fricción obtenidos de los ensayos Triaxiales, Corte Directo y el estimativo realizado por medio del SPT, los resultados obtenidos tienen similitud a los materiales que se presentan en la literatura técnica, por lo que se valida la utilización de dichos parámetros al obtener resultados similares generándose un ángulo de fricción representativo de cada uno de los materiales analizados. En la Gráfica 24 se presenta la relación de los ángulos de fricción obtenidos:

Gráfica 24 Comparaciones Φ (Corte Directo - SPT) vs Profundidad.



Fuente: Elaboración Propia.

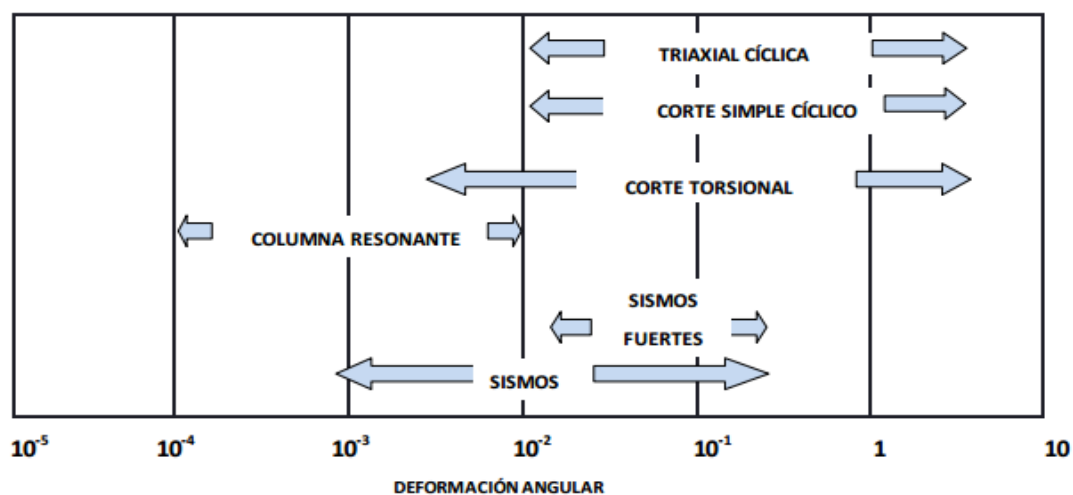
Los resultados obtenidos de la muestra 4 del sondeo 5, que corresponde a una profundidad media de 2.30 m presenta coherencia con las curvas típicas recomendadas por Vucetic & Dobry, y ya que no fue posible la realización de los ensayos de columna resonante y Bender Element para completar estas curvas, se recomienda la utilización de las curvas obtenidas por presentar aproximación confiable a las empleadas por Vucetic.

Cuando se empleen este tipo de ensayo dinámicos es razonable realizarlo sobre materiales netamente finos o granulares puesto que la combinación de los dos puede llegar a encontrarse con resultados como los obtenidos en la muestra 5 del

sondeo 3, que no concuerda con lo esperado según las curvas típicas; es por ello que se recomienda la realización del ensayo para material netamente homogéneo sin mezcla con otro lo cual afecta en el comportamiento, siendo esto aplicado no solamente a la finca la Santa María, sino también a nivel general.

En la Figura 33 se observa las diferentes pruebas de laboratorio que comúnmente se realizan para la obtención de los parámetros dinámicos en función del rango de la deformación angular, es decir para el ensayo de triaxial dinámico realizado se abarco una deformación angular de 0.01% hasta 0.1%; estos factores dinámicos poseen un comportamiento no lineal con respecto a una determinada deformación angular (γ), para la modelación de dichas propiedades es necesario definir escenarios de comportamiento elástico y elasto-plástico para deformaciones pequeñas y grandes respectivamente, y de eso se concluye que el comportamiento elástico está caracterizado por presentar deformaciones angulares (γ) menores de 0.001% en la cuales el suelo no presenta cambios de volúmenes representativos, por el contrario el comportamiento elasto-plástico presenta deformaciones angulares mayores de 0.01% cuyo cambio volumétrico es de gran importancia.

Figura 33 Pruebas de Laboratorio para la caracterización dinámica.



Fuente: BRAN J., GONZÁLEZ R. Y ORTÍZ H. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de el salvador. (Trabajo de grado), 2009. Pág. 112.

Para realizar un análisis más detallado de las propiedades dinámicas obtenidas y teniendo en cuenta que el único ensayo dinámico realizado a estas muestras corresponde a Triaxial Cíclico por deformación, cuyas deformaciones se encuentran en el rango elasto-plástico, es necesario determinar el comportamiento del material para deformaciones pequeñas (elásticas), estos parámetros se obtienen de ensayos de Columna Resonante y Bender Element los cuales no se realizaron por falta de estos implementos en el laboratorio.

En función de lo anterior, en caso de requerirse obtener el espectro sísmico de diseño para la finca La Santa María, se recomienda emplear las curvas obtenidas por Vucetic & Dobry, las cuales se ajustan a los resultados obtenidos en este Trabajo de Grado.

10. RECOMENDACIONES

Los resultados de los ensayos varían dependiendo de la manipulación de las muestras, por lo cual es recomendable que las muestras sean tomadas e identificadas de forma correcta. De ahí la importancia de obtener muestras lo más representativas para lograr obtener resultados confiables y disponer de la información necesaria y verídica.

Las recomendaciones se encaminan en la búsqueda de dotar el laboratorio con equipos completos siguiendo los lineamientos de las normas vigentes, de forma tal que efectúen correctamente los ensayos, teniendo en cuenta que se está implementando la acreditación del programa de Ingeniería Civil, y por ende del Laboratorio de Suelos.

Es de resaltar el apoyo de la Universidad La Gran Colombia para la elaboración de este Trabajo de Grado, en especial de los Laboratoristas, quienes estuvieron a disposición de asesorar los ensayos efectuados. El laboratorio cuenta con un amplio sistema de equipos, incluyendo el Triaxial Dinámico, el cual no se encuentra en muchos laboratorios; sin embargo, es necesario complementar los equipos existentes en función de lo siguiente:

- Se requiere contar con una planta de energía que permita controlar el funcionamiento de los equipos en caso de presentarse cortes de electricidad en el laboratorio. Lo anterior se recomienda dado que durante ensayos como el triaxial, se requiere tener continuidad en las lecturas de saturación de las muestras, y un corte de energía genera la pérdida del proceso que puede tardar hasta 15 días.
- Aun cuando a nivel internacional se está optando por la obtención de muestras con diámetro 3", en Colombia se continúa con la extracción de

muestras en tubo Shelby de diámetro 2". En función de lo anterior, el equipo de corte directo debe contar con anillos de corte con este último diámetro, dado que de lo contrario, no es posible emplear el equipo (excepto en muestras reconstituidas). Para la elaboración de este Trabajo de Grado se fabricaron los anillos de corte con diámetro 2".

- Se recomienda complementar el juego de instrumentos requeridos para caracterizar de forma dinámica los materiales, mediante la compra de una Columna Resonante y arreglo del Bender Element, de forma tal que se logre obtener las curvas características completas (G/G_{max} , λ).

Este informe se efectuó con base en los resultados de la campaña de exploración del subsuelo realizada por parte de los integrantes del trabajo de grado, y en el programa de ensayos de laboratorio realizado. En caso de encontrarse condiciones diferentes a las aquí consignadas se recomienda analizar la situación y verificar las condiciones propias de los cambios que se requieran efectuar, analizando su viabilidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALFARO CASTILLO, Andrés José; MONROY PEDROZA, Lucia del Pilar. Caracterización Dinámica de Arcillas sobre la Formación de Bogotá. En: Revista de investigación. Vol. 4. (Dic 2004); p. 173-180.

ARISTIZABAL, Edier; VALENCIA, Yamile; VELEZ, Marcela; ECHEVERRI, Oscar. Caracterización Geotécnica de Perfiles de Meteorización desarrollados sobre Rocas Ígneas en Ambientes Tropicales. No. 30 (2011); p. 93-106. ISSN 0120-3630.

BADILLO, J. Mecanica de suelos. Tomo I, Fundamentos de la mecanica de suelo, Tercera Edicion, Mexico, Editorial Limusa, 1975.

BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. Traducido por Eugenio Retamal, Bogotá, Mc Graw-Hill, 1982.

CABRERA CASTRO, P. M.; BEIRA FONTAINE, E. Caracterización Geotécnica del campo experimental de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente. En: Ingeniería Revista Académica. Vol. 11. No. 002 (May-Ago. 2007); p. 57-66.

CAMACHO, Javier; REYES, Oscar; BUENO, Paula. UTILIZACIÓN DEL MODELO CAM-CLAY MODIFICADO EN SUELOS COHESIVOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ (Articulo), Universidad Militar Nueva Granada, 2004.

CANGREJO ALJURE, Dense; INFANTE, Carlos Gustavo. Información geotécnica como elemento de análisis en la planeación y diseño de obras civiles en Bogotá. Ingeniería e Investigación. Vol.25. No.3 (2005); p. 71-83. ISSN 0120-5609.

GONZALEZ, Jorge; SCHMITZ, Michael. Caracterización Dinámica de Perfiles Geotécnicos de Cariaco (Estado Sucre, Venezuela), partiendo de datos de

refracción sísmica. En: Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. Vol. 23. No. 2 (2008); p. 83-93.

HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando; GOMEZ CRISTANCHO, Jenny Carolina; PARDO NARANJO, Oscar Eduardo. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. En: Revista de Facultad de Ingeniería UPTC. Vol. 21. No. 32 (Ene-Jun 2012); p. 21-40.

IDU, Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público, para Bogotá DC [en línea] DU ET 2011 versión 3.0. [25 de Octubre de 2014] Disponible en: (http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/espec_tecnicas_cabezote.jpg).

MORENO RUIZ, Carlos Andrés. Comportamiento dinámico de Turbas y su efecto en la propagación de las ondas sísmicas. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. 2003.

MOYA, Julio. SALAZAR, Ricardo. GOMEZ, Gustavo; Excavaciones en condiciones complejas, No.1, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.

RODRÍGUEZ ORDOÑEZ, Jorge Alberto. Análisis de Interacción Suelo o Estructura para Refuerzo de Suelos Fisurados [en línea] 2006. [10 de abril de 2014] Disponible en: (<http://ingenieriayuniversidad.javeriana.edu.co/DefRev0902Suelo.pdf>).

STOKOE, K; DARENDELI, M; GILBERT, R. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping curves.

UNIVERSIDAD DE CASTILLA, Materia orgánica, España [en línea] [25 de Octubre de 2014] Disponible en: (http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Tema03/Tema_03_Suelos_3_4.htm).

VUCETIC, Mladen; DOBRY, Ricardo. Effect of soil plasticity on cyclic response (Articulo), American Society of Civil Engineers, 1991.

ANEXO A PLANO TOPOGRÁFICO FINCA “LA SANTA MARÍA”
ANEXO B PLANO UBICACIÓN DE EXPLORACIÓN
ANEXO C REGISTROS DE PERFORACIÓN
ANEXO D RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO
ANEXO E ESTIMATIVO DE PARÁMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT
ANEXO F RESULTADOS DE ENSAYO DE LÍMITES
ANEXO G RESULTADOS DE ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO
ANEXO H RESULTADOS DE ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL
ANEXO I RESULTADOS DE ENSAYO DE CONTENIDO ORGÁNICO
ANEXO J RESULTADOS DE ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA
ANEXO K RESULTADOS DE ENSAYO DE PESOS UNITARIOS
ANEXO L RESULTADOS DE ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN
ANEXO M RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA
ANEXO N RESULTADOS DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO
ANEXO O RESULTADOS DE ENSAYO DE TRIAXIAL ESTÁTICO
ANEXO P RESULTADOS DE ENSAYO DE TRIAXIAL DINÁMICO