

**Estudios de Suelos Aplicados al Desarrollo de Proyectos Geotécnicos y
de Ingeniería Civil**

Manuel Alejandro Santana Ballesteros

**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales
2021**

**Estudios de Suelos Aplicados al Desarrollo de Proyectos Geotécnicos y
de Ingeniería Civil**

Manuel Alejandro Santana Ballesteros

**Trabajo de grado en modalidad de pasantía como prerrequisito para
optar al título de Geólogo**

Asesor Académico:

Santiago Cano Bedoya

Geólogo, Ing. Civil, Esp. Geotecnia

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales

2021

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	10
2.	Objetivos	12
2.1.	Objetivo general.....	12
2.2.	Objetivos específicos	12
3.	Localización.....	13
4.	Marco Teórico	15
4.1.	Métodos Directos	16
4.2.	Métodos Sísmicos.....	20
4.2.1.	<i>Sísmica de Refracción</i>	23
4.2.2.	<i>Sísmica de Reflexión</i>	27
4.2.3.	<i>Down-Hole</i>	27
4.3.	Métodos Eléctricos.....	31
4.3.1.	<i>Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)</i>	35
4.3.2.	<i>Tomografías</i>	38
4.4.	Ensayos de Laboratorio.....	39
4.4.1.	<i>Granulometría</i>	39
4.4.2.	<i>Humedad</i>	41
4.4.3.	<i>Compresión en Roca</i>	42
4.4.4.	<i>Consolidación</i>	43
4.4.5.	<i>Límites de Attelberg</i>	44
4.5.	Clasificación Geomecánica de Macizos.....	48
4.5.1.	<i>Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1976)</i>	48
4.5.2.	<i>Clasificación Geomecánica Sistema Q (Barton, 1974)</i>	49
5.	Geología Regional.....	54

5.1.	Sector de Buga y Palmira	54
5.2.	Sector de Melgar.....	59
5.3.	Sector Bogotá.....	59
6.	Metodología.....	75
6.1.	Etapa de Planeación	75
6.2.	Etapa de Exploración	76
6.3.	Laboratorio.....	91
6.4.	Clasificación Geomecánica de Macizos.....	102
6.5.	Fallas Geotécnicas.....	103
7.	Resultados.....	104
7.1.	Spt y Sondeos Mecánicos.....	104
7.2.	Refracción Sísmica	107
7.3.	Reflexión Sísmica	109
7.4.	Down-Hole	111
7.5.	Tomografía.....	112
7.6.	Sondeos Eléctricos Verticales.....	113
7.7.	Caracterización Geomecánica de Macizos	116
7.8.	Fallas Geotécnicas en los Macizos Rocosos.....	117
8.	Discusión.....	121
9.	Conclusiones.....	123

Lista de Figuras

Figura 1. Localización	14
Figura 2. Barrena helicoidal TRH 1500 BG.	18
Figura 3. Broca con punta de carburo de tungsteno	19
Figura 4. Broca diamantada para perforación geotécnica	19
Figura 5. Ley de Snell	22
Figura 6. Refracción total	23
Figura 7. Esquema método de refracción sísmica	24
Figura 8. Grafica de tiempo de llegada de ondas P contra distancia del geófono de la fuente	25
Figura 9. Esquema del recorrido de rayos reflejados	28
Figura 10. Esquema ensayo Down Hole	28
Figura 11. Geófono Triaxial para ensayos Down-hole	29
Figura 12. Grafica tiempo-profundidad	29
Figura 13. Esquema básico de dispositivo para determinar la resistividad	32
Figura 14. Esquema dispositivo Schlumberger	34
Figura 15. Esquema dispositivo Wenner	34
Figura 16. Resistividad de los principales materiales de la tierra	35
Figura 17. Curvas de resistividades aparentes para 2 y 3 capas	37
Figura 18. Curvas de resistividades aparentes para 2, 3 y 4 capas	37
Figura 19. Tomografía con valores de resistividad aparente y real del terreno	38
Figura 20. Tamices y Tamizadora	39
Figura 21. Curva granulométrica	40
Figura 22. Prensa hidráulica de compresión	42
Figura 23. Consolidómetro	44
Figura 24. Límites de Atterberg	45
Figura 25. Cazuela de Casagrande	46
Figura 26. Curva de flujo de la determinación del límite líquido de un suelo	46
Figura 27. Formación de rollos de suelo de 3mm de diámetro.	47
Figura 28. Esquema falla planar	51
Figura 29. Esquema falla por volcamiento	52

<i>Figura 30. Esquema falla diédrica.</i>	53
<i>Figura 31. Partes y asociación de facies de un río meándrico</i>	58
<i>Figura 32. Zona Urbanizada</i>	65
<i>Figura 33. Esquema movimiento en masa traslacional</i>	67
<i>Figura 34. Esquema movimiento en masa rotacional</i>	69
<i>Figura 35. Esquema de montaje de la medición</i>	81
<i>Figura 36. Montaje de la muestra</i>	98
<i>Figura 37. Esquema tipo de los segmentos que componen la curva de consolidación</i>	99
<i>Figura 38. Tomografías de Refracción interpretadas en PTAR Canoas</i>	107
<i>Figura 39. Perfil de velocidad de onda de corte interpretada en la medición</i>	108
<i>Figura 40. Procesamiento de reflexión mediante sismogramas medidos a partir de método common shot</i>	109
<i>Figura 41. Perfiles de profundidad de basamento rocoso y nivel freático interpretados de las mediciones</i>	110
<i>Figura 42. Perfiles de velocidad de onda interpretados</i>	112
<i>Figura 43. Tomografía eléctrica proyecto PTAR Canoas</i>	113
<i>Figura 44. Curva de resistividades aparentes SEV-1 CELSIA-Melgar</i>	115
<i>Figura 45. Perfiles de resistividad eléctrica real obtenido de los SEV</i>	116
<i>Figura 46. Talud EG 1</i>	117
<i>Figura 47. Talud EG 2</i>	118
<i>Figura 48. Talud EG 3</i>	118
<i>Figura 49. Talud EG 4.1</i>	119
<i>Figura 50. Talud EG 4.2</i>	119
<i>Figura 51. Talud EG 5</i>	120

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Relación de valores para los parámetros de resistencia</i>	16
<i>Tabla 2. Relación de valores para los parámetros de resistencia.</i>	17
<i>Tabla 3. Intervalo de velocidad de la onda P en varios tipos de suelos y rocas</i>	26
<i>Tabla 4. Formato para el cálculo de la resistividad aparente</i>	36
<i>Tabla 5. Criterios de selección del tamaño de la muestra de prueba</i>	41
<i>Tabla 6. Parámetros de clasificación de macizos RMR</i>	48
<i>Tabla 7. Clasificación de macizo según el RMR</i>	49
<i>Tabla 8. Tabla de clasificación de macizos de Barton</i>	50
<i>Tabla 9. Ficha técnica de la maquina usada para sondeos mecánicos</i>	76
<i>Tabla 10. Ficha técnica de la maquina usada para ensayos geoelectricos</i>	87
<i>Tabla 11. Tamaños mínimos de la muestra de acuerdo a los requerimientos establecidos según el tipo de norma y características del suelo</i>	92
<i>Tabla 12. Formato spt y sondeos mecánicos</i>	106
<i>Tabla 13. Tabla SEV-1 Proyecto Celsia-Melgar</i>	114

Lista de Fotografías

<i>Fotografía 1. Muestras de arcilla obtenidas de los diferentes sondeos</i>	<u>56</u>
<i>Fotografía 2. Muestras de arenas obtenidas de los diferentes sondeos</i>	<u>57</u>
<i>Fotografía 3. Muestras de gravas obtenidas de los diferentes sondeos</i>	<u>57</u>
<i>Fotografía 4. Estratos de arenitas masivas</i>	<u>61</u>
<i>Fotografía 5. Arcillolitas abigarradas</i>	<u>61</u>
<i>Fotografía 6. Intercalación de lodolitas y arenitas</i>	<u>62</u>
<i>Fotografía 7. Rellenos antrópicos</i>	<u>63</u>
<i>Fotografía 8. Depósitos de ladera</i>	<u>63</u>
<i>Fotografía 9. Estrías de falla</i>	<u>64</u>
<i>Fotografía 10. Antiguo frente de explotación minero</i>	<u>65</u>
<i>Fotografía 11. Perdida de verticalidad de postes de energía</i>	<u>66</u>
<i>Fotografía 12. Inclinación de los árboles</i>	<u>67</u>
<i>Fotografía 13. Movimientos en masa traslacionales</i>	<u>68</u>
<i>Fotografía 14. Movimiento en masa rotacional numero 1</i>	<u>71</u>
<i>Fotografía 15. Movimiento en masa rotacional numero 2</i>	<u>72</u>
<i>Fotografía 16. Movimiento en masa rotacional numero 3</i>	<u>72</u>
<i>Fotografía 17. Movimiento en masa rotacional numero 4</i>	<u>72</u>
<i>Fotografía 18. Movimiento en masa rotacional numero 5</i>	<u>73</u>
<i>Fotografía 19. Movimiento en masa rotacional numero 6</i>	<u>73</u>
<i>Fotografía 20. Hogbacks</i>	<u>74</u>
<i>Fotografía 21. Escarpe de alta pendiente a lo largo de una línea de falla</i>	<u>74</u>
<i>Fotografía 22. Descripción de muestras en campo</i>	<u>77</u>
<i>Fotografía 23. Cable de datos de los sensores y cable de señal del trigger extendidos</i>	<u>79</u>
<i>Fotografía 24. Montaje sismica de refracción</i>	<u>79</u>
<i>Fotografía 25. Martillo de impacto</i>	<u>80</u>
<i>Fotografía 26. Ensayo Sísmica de Reflexión</i>	<u>83</u>
<i>Fotografía 27. Placa de Nylon</i>	<u>85</u>
<i>Fotografía 28. Introducción de la sonda por la perforación</i>	<u>85</u>
<i>Fotografía 29. Cables de datos del sensor triaxial</i>	<u>86</u>

<i>Fotografía 30. Montaje del arreglo y equipos utilizados</i>	<u>86</u>
<i>Fotografía 31. Montaje línea para Tomografía</i>	<u>89</u>
<i>Fotografía 32. localizacion Sondeo Eléctrico Vertical</i>	<u>90</u>
<i>Fotografía 33. Cables de corriente y de voltaje</i>	<u>91</u>
<i>Fotografía 34. Recipientes con muestras húmedas</i>	<u>93</u>
<i>Fotografía 35. Muestras en proceso de secado</i>	<u>93</u>
<i>Fotografía 36. Enfriamiento de muestras</i>	<u>94</u>
<i>Fotografía 37. Tamaño de la muestra</i>	<u>95</u>
<i>Fotografía 38. Secado de la muestra</i>	<u>95</u>
<i>Fotografía 39. Material retenido en cada tamiz</i>	<u>96</u>

1. Introducción

Conocer la naturaleza, la geología y las propiedades del suelo sobre el cual se va a desarrollar una obra de ingeniería civil o geotécnica es indispensable para realizar el diseño y posterior construcción de la misma. En primer lugar, para llevar a cabo la caracterización de un suelo se ejecuta una campaña de exploración conformada por la aplicación de: métodos directos tales como apiques, caracterización geomecánica de macizos, ensayo de SPT y sondeos, estos últimos deben contar con una profundidad óptima y garantizar un índice de recuperación que permita el desarrollo de la descripción litológica y la realización de los ensayos de laboratorio pertinentes; métodos indirectos como sísmica de reflexión y refracción, down-hole, tomografías eléctricas y sondeos eléctricos verticales.

Concluido el trabajo de campo las muestras son llevadas al laboratorio para realizar ensayos de humedad natural, clasificación granulométrica, consolidación, compresión en roca, límites de Atterberg, corte directo, entre otros; y los datos obtenidos de los métodos geofísicos son procesados e interpretados en la oficina por los profesionales encargados. Con los datos adquiridos a partir de los estudios se desarrolla el modelo geológico -geotécnico, estratigrafía de la zona, caracterización y propiedades geomecánicas del suelo, para posteriormente realizar los diseños y recomendaciones respectivas.

La práctica fue realizada en la empresa SAICON S.A.S. INGENIERIA ubicada en la calle 97 #64-39 en la ciudad de Bogotá, SAICON S.A.S. es una empresa integrada por un grupo de profesionales altamente calificados dedicados a la realización de estudios de campo, diseños, interventoría, consultoría, planeación y estructuración de proyectos de carretera, geotecnia, geofísica, exploración, entre otros. Durante la práctica se ejecutaron actividades de trabajo de campo, procesamiento de datos y ensayos de laboratorio que resultaron necesarias para el desarrollo de proyectos geotécnicos y de exploración, aportando competencias tales como la visión general y detallada de la geología de las zonas de trabajo, que permite proponer y desarrollar una mejor planeación y ejecución de los estudios en campo, obtención de muestras

y datos en campo, toma de decisiones en campo, aplicación de sistemas de información geográfica y software de procesamiento de datos; complementando y fomentando la interdisciplinariedad geólogo- ingeniero civil.

El presente documento abarca las definiciones, procesos, ensayos, metodologías y actividades que se realizaron en el transcurso de la práctica profesional tomada como opción de grado para optar por el título de Geólogo en la Universidad de Caldas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Participar activamente en cada uno de los proyectos que la empresa desarrolla aportando competencias como el conocimiento y entendimiento geológico de las zonas de trabajo, proposición, planeación y ejecución de campañas de exploración y trabajos de campo, uso de sistemas de información geográfica y software especializados, análisis y procesamiento de datos desde una perspectiva geológica-geotécnica que fomente y complemente la interdisciplinariedad geólogo - ingeniero civil en el desarrollo de obras civiles y geotécnicas.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física y geomecánica mente los suelos y las rocas sobre las cuales se ejecutarán los proyectos a partir de trabajo de campo, técnicas geofísicas y ensayos de laboratorio.
- Participar en las propuestas de análisis, diseño y construcción de obras geotécnicas para conseguir una solución integral a las necesidades de los proyectos en busca de fomentar la interdisciplinariedad geólogo – ingeniero civil.
- Apoyar las labores de oficina y de campo que puedan resultar en la ejecución de los proyectos.
- Desarrollo de ensayos de laboratorio según las lineaciones de las normativas ASTM e INV del invias.

3. Localización

La sede principal de SAICON S.A.S INGENIERÍA se encuentra ubicada en la calle 97 # 64-39 en la ciudad de Bogotá, capital del territorio colombiano; sin embargo, los proyectos realizados durante la práctica se desarrollaron en diferentes zonas del territorio colombiano (**Figura 1**) y se dividieron en tres sectores:

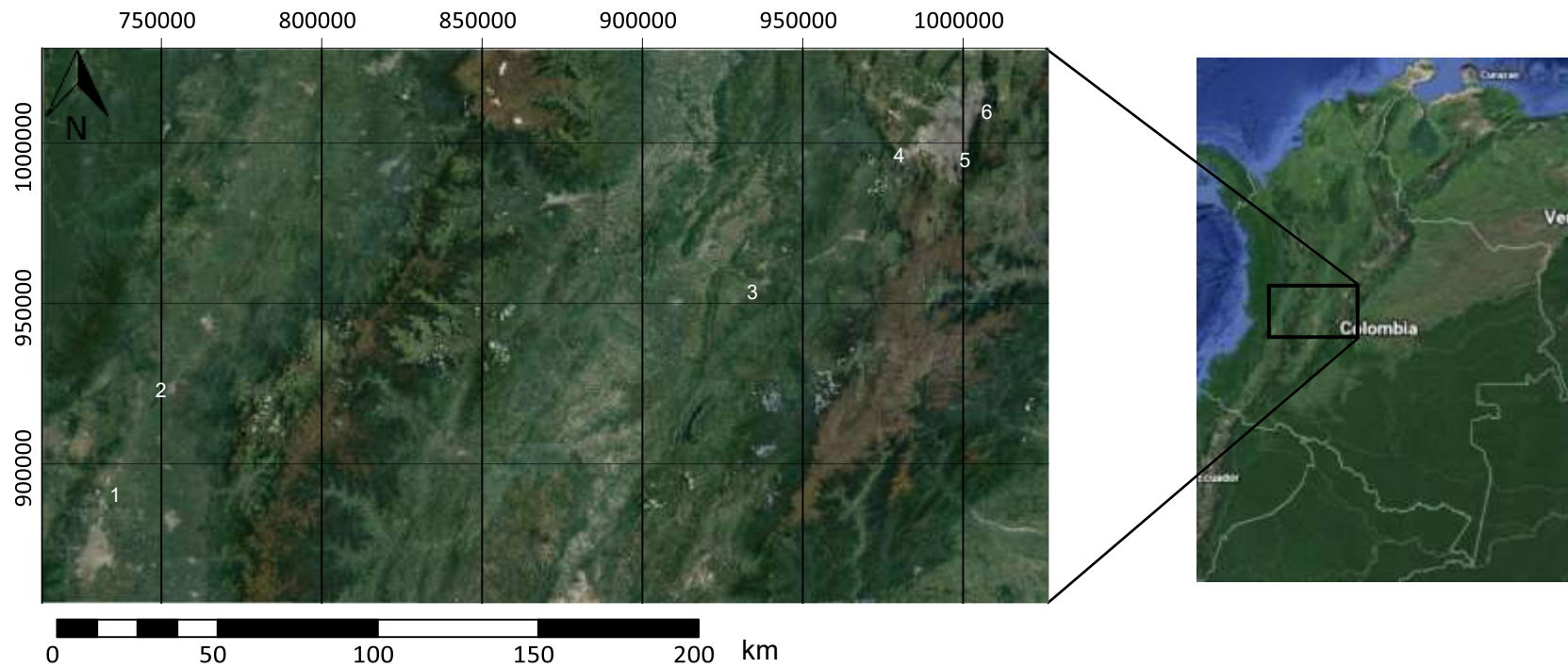
Sector Bogotá: La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada sobre la Cordillera Oriental dentro de la denominada Sabana de Bogotá, en este sector se desarrollaron tres proyectos: Plan de Manejo, Recuperación y Restauración Ambiental Meridiam ubicado en los cerros orientales de la ciudad en la localidad de San Cristóbal; PTAR Canoas desarrollado en el municipio de Soacha al sur de Bogotá en la variante Soacha-La Mesa; y por último el proyecto de restauración y ampliación de la vía que conduce de la ciudad de Bogotá al municipio de La Calera ubicado en la parte nororiental de la ciudad.

Sector de Melgar: El municipio de Melgar se encuentra ubicado en el departamento de Tolima a 91 km al suroriente de Ibagué, la capital del departamento y a 98 km al suroccidente de Bogotá. En este sector se ejecutó un proyecto de estudio de suelos para el desarrollo de un parque fotovoltaico en la vía Melgar-Carmen de Apicalá.

Sector de Buga y Palmira: En este sector se ejecutaron labores de exploración para dos parques fotovoltaicos localizados al sur del departamento del Valle del Cauca, en la ribera oriental del Río Cauca; las áreas de estudio se encuentran en zona rural de los municipios de Buga y Palmira localizados a 26 y 68 km respectivamente al nororiente de la ciudad de Cali, capital del departamento.

Figura 1

Localización.



1. Parque Solar Palmira
2. Parque Solar Buga
3. Parque Solar Melgar

4. PTAR Canoas
5. PMRRA Meridiam
6. Restauración y Ampliación de la vía Bogotá-La Calera

Nota: Localización de los principales proyectos en los que se participó. Las imágenes fueron obtenidas de los softwares Google Earth y SAS Planet y georreferenciadas con el sistema de coordenadas Colombia Bogotá Zone.

4. Marco Teórico

La geotecnia es la rama de la geología que busca determinar y comprender las propiedades físicas de las rocas y suelos que soportaran una cimentación, los primeros pasos de la geotecnia se dieron aproximadamente en el año 2.000 AC en Egipto, donde ya se evidenciaban nociones a cerca de la fricción o rozamiento en el desarrollo de cilindros utilizados a manera de pilotes hincados; los romanos desarrollaron acueductos, puentes, puertos, represas y carreteras.

A partir del siglo XVIII se empiezan a desarrollar avances y a aparecer nuevos conceptos, en 1717 el ingeniero francés Henri Gautier (1660-1737) presento un estudio sobre pendientes naturales de los suelos (ángulo de reposo), y de pesos unitarios en arenas; en 1776 Augustin de Coulomb (1736-1806) utiliza las leyes de la fricción y cohesión de los cuerpos sólidos y en 1856 el ingeniero Henri Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) publicó un estudio sobre la permeabilidad de los filtros de arena y definió el termino de “coeficiente de permeabilidad”. (Llorente, 2015).

Durante la primera mitad del siglo XX, Karl Von Terzaghi (1883-1963) pone el punto de partida para la mecánica de suelos con la publicación de los textos: *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage* en 1925, *Theoretical Soil Mechanics* en 1943 y *Soil Mechanics in Engineering Practice* en 1948; estas obras junto con la celebración del I Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones en Harvard en el año 1936 permitieron que especialistas como Ralph B. Peck (1912-2008), Arthur Casagrande (1902-1981), Alec Westley Skempton (1914-2001) y Laurits Bjerrum (1918-1973) desarrollaran y sentaran las bases de la ingeniería geotécnica, distinguiéndola por primera vez de otras áreas del saber adyacentes. (Llorente, 2015).

Durante los últimos años el termino geotecnia se ha ampliado incluyendo temas como la sísmica, geoelectrica, relación suelo-estructura, entre otros y se han desarrollado una serie de métodos y principios generales para la exploración del subsuelo, los cuales van a ser descritos en este capítulo.

4.1. Métodos Directos

Son aquellos que tienen como objetivo la recuperación de muestras de suelo, entre ellos tenemos el ensayo de penetración estándar (SPT) y los sondeos mecánicos o perforaciones.

4.1.1. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Es un método que consiste en contar el número de golpes (N) requeridos para introducir dentro del suelo un tubo en intervalos de 15 centímetros, con el fin de obtener una muestra representativa del suelo y determinar la compacidad (suelos arenosos, Tabla 1) o consistencia (suelos arcillosos, Tabla 2) del mismo.

Según la norma INV E - 111-O7, la cual está basada en las normas ASTM D 1586 y la AASHTO T 206-03, el peso de la masa y la altura de caída debe ser de 63.5 kg y 76.2 cm respectivamente, y se debe usar un muestreador o tubo partido de 50cm de largo, diámetro exterior de 51mm e interior de 35mm.

Se considera rechazo al aplicar 50 golpes a un tramo de 15 centímetros o 100 golpes en total o cuando después de 10 golpes no haya penetración alguna. Al final se tienen los siguientes datos: N (0-15), N (15-30), N (30-45)

$$N_{spt} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

Tabla 1

Relación de valores para los parámetros de resistencia

Compacidad (Suelo Granular)	Grado de Compacidad	N (S.P.T.)	Resistencia a la Penetración Estática	Angulo de fricción
Muy suelta	< 0,2	<4	<20	< 30
Suelta	0,2-0,4	4-10	20-40	30-35
Compacta	0,4-0,6	10-30	40-120	35-40
Densa	0,6-0,8	30-50	120-200	40-45
Muy Densa	>0,8	>50	>200	>45

Fuente: (ASTM, Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils (ASTM D 1586.), 1996)

Tabla 2*Relación de valores para los parámetros de resistencia.*

Numero de penetración estándar	Consistencia	CL	Resistencia a la compresión simple
< 2	Muy blanda	< 0.5	< 25
2 – 8	Blanda	0.5 – 0.75	25 – 80
8 – 15	Media	0.75 – 1.0	80 – 150
15 – 30	Firme	1.0 – 1.5	150 – 400
>30	Muy Firme	> 1.5	> 400

Fuente: (ASTM, Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils (ASTM D 1586.), 1996)

4.1.2. Sondeos Mecánicos

Es un método de exploración que permite hacer un reconocimiento directo de las características y propiedades de los suelos y rocas en función de la profundidad, por lo general se hace recuperación de testigos para su posterior análisis en laboratorio. En algunos casos permite la observación del nivel freático por medio de la utilización de piezómetros.

Según (Gomez, 2012) los tipos de sondeos más empleados para el reconocimiento geotécnico son los sondeos mecánicos a rotación y percusión

Sondeo a percusión: el principio general consiste en el avance por medio de golpes sucesivos aplicados por la caída de una masa, cuya energía se transmite por un varillaje a un tubo que permite obtener un testigo con continuidad. Este tipo de sondeo presenta ventajas cuando se trata de suelos no coherentes (arenas, limos, gravas), sin embargo, es una metodología lenta y con bajo rendimiento de avance

Sondeos a rotación: este es el procedimiento más extendido para obtener muestras o testigos en cualquier investigación geotécnica, existen dos tipos cuya elección dependerá tanto de los requerimientos del estudio, de las condiciones del terreno, como de la rapidez y economía de cada uno de ellos.

Sondeos mecánicos a rotación con barrena helicoidal: Los sondeos mecánicos a rotación con barrena helicoidal (Figura 2), se emplean en terrenos relativamente blandos y cohesivos, en ausencia de capas cementadas, gravas, o roca en toda la profundidad del sondeo.

Figura 2

Barrena helicoidal TRH 1500 BG.



Fuente:(DirectIndustry, s. f.)

Sondeos mecánicos a rotación con extracción de testigo continuo: Con este sistema pueden obtenerse testigos en cualquier tipo de terreno, permitiendo perforar en cualquier ángulo y obtener testigos continuos en profundidades que pueden alcanzar los 1500 m. Para este método de perforación se utilizan coronas o brocas las cuales pueden ser de dos naturalezas:

Widia: El cuerpo de la corona es en acero y en el borde cortante se incrustan prismas carburo de wolframio con un 10% de cobalto para darle resistencia al choque (Figura 3). Estas son adecuadas para su uso en suelos y en rocas blandas o medias.

Diamantada: las coronas diamantadas tienen un cuerpo de acero que está unido a la matriz. Esta matriz en una aleación metálica que contiene los diamantes, está compuesta por polvo de carburo de wolframio y bronce con pequeñas cantidades de otros metales (Figura 4)

Figura 3

Broca con punta de carburo de tungsteno



Fuente: (Roschendrill.com, 2021).

Figura 4

Broca diamantada para perforación geotécnica



Fuente: (TMG Supplies, 2021).

4.2. Métodos Sísmicos

La sismología se encarga de estudiar los sismos y sus fenómenos conexos, la generación, propagación y registro de las ondas elásticas en la tierra y las fuentes que las producen; a partir del estudio de las ondas se puede observar indirectamente la estructura interior de la tierra, estimar densidades, medir la velocidad de propagación y determinar las propiedades elásticas; para esto se dispone de un punto donde se genera una onda usando fuentes artificiales (martillos, explosiones, tráfico vehicular) o naturales (micro temblores, oleaje, otros) que generen vibraciones en superficie y posteriormente son registradas por sensores (geófonos) instalados a lo largo de tendidos lineales.

En el año 1755 una sucesión de terremotos en Portugal despertó el interés científico, dando inicio al verdadero estudio del origen de los sismos, siendo John Michell en Inglaterra y Elie Bertrand en Suiza los primeros en dar inicio a los estudios de los efectos físicos de los terremotos; A principio de 1800, Cauchy, Poisson, Stokes, Rayleigh, y otros, postulan la teoría de la propagación de ondas elásticas en materiales sólidos. Ellos describen las Ondas de Cuerpo: Primarias y Secundarias (ondas P y S), y las Ondas Superficiales; el físico Strutt (Barón de Rayleigh) en 1885, y el geofísico Love, en 1911, desarrollaron modelos matemáticos para las ondas superficiales que llevan sus nombres. A su vez, en 1910 Alfred Wegener desarrolla la hipótesis de la deriva continental. (Gastiaburu, 2020)

Robert Mallet en 1846 realizó los primeros acercamientos en la sismología aplicada mediante la publicación de un estudio sobre la dinámica de los terremotos, en el que discutía problemas relativos, sugiriendo la idea de generar terremotos artificiales a los que las diferentes rocas debían tener velocidades características distintas. Este se extendió gradualmente a escala de los problemas de ingeniería geotécnica para caracterizar mecánicamente las formaciones superficiales e identificar posibles variaciones de la estratigrafía. Actualmente estos métodos se han convertido en una herramienta de caracterización geotécnica gracias a sus bajos costos y tiempos de ejecución.

Los métodos de refracción y reflexión de ondas se basan en la teoría de ondas, la cual tiene como fundamento el concepto de rayo sísmico. Se denomina rayo sísmico a las líneas normales a los frentes de ondas sucesivas, es decir, la trayectoria de las posiciones ocupadas por un punto dado de frente de onda a lo largo de todo su recorrido. En sismología el rayo sísmico no tiene realidad física, ya que la única realidad en sismología es el frente de onda, sin embargo, para el estudio de los métodos sísmicos se utiliza el concepto de propagación de rayo sísmico, que es matemáticamente equivalente y mucho más cómodo en la práctica. (Figuerola, 1953).

La propagación de los rayos está gobernada por los principios de Huygens y Fermat, y siguen las leyes básicas de la óptica geométrica, ley de reflexión y refracción o ley de Snell.

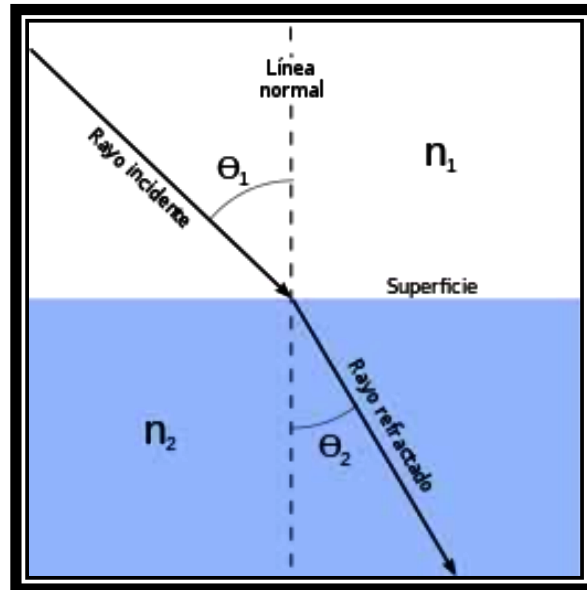
Principio de Fermat: Este principio dice que un rayo dado real sigue de un punto a otro aquel camino que le signifique el tiempo mínimo en su recorrido (Figuerola, 1953). La geometría de las trayectorias seguidas por los rayos está gobernada por este principio.

Principio de Huygens: Establece que cada punto alcanzado por un frente de ondas actúa como una nueva fuente de ondas que se extiende en todas direcciones, si el medio es homogéneo el frente de ondas es esférico, si el medio no es homogéneo cada elemento del frente de onda se traslada paralelamente a si mismo durante determinado tiempo, pero con velocidades distintas a lo largo del frente, por lo que el nuevo frente de onda no sería paralelo al primero (Figuerola, 1953).

Leyes de reflexión y refracción: Un rayo incidente que se propaga de un medio a otro, al llegar a la interfaz entre los dos medios distribuye su energía dependiendo de su ángulo de incidencia y el contraste de las propiedades elásticas de los diferentes medios, dando lugar a dos rayos reflejados y a dos rayos refractados; el rayo incidente, la normal y los rayos reflejados y refractados están en un mismo plano llamado plano de incidencia (Figura 5). Los rayos reflejados tienen un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia, mientras que los rayos refractados se relacionan mediante la ley de Snell. (Figuerola, 1953).

Figura 5

Ley de Snell.



Fuente: (Nebrija.es, 2021)

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ley de Snell})$$

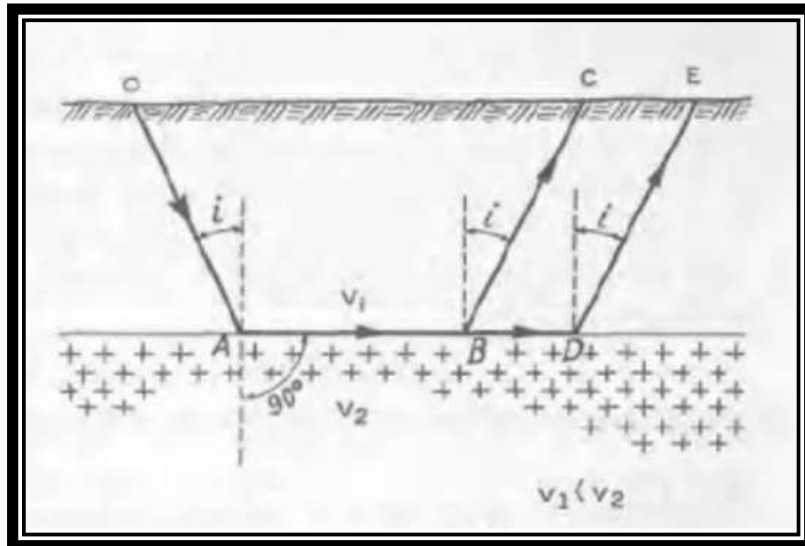
Donde V_1 y V_2 son las velocidades respectivas de los medios 1 y 2

Cuando el ángulo de refracción crea un ángulo de 90° con la normal (ángulo crítico), el rayo refractado AB experimenta la refracción total, propagándose por el contacto de los dos medios. Según el principio de Huygens cada uno de los puntos alcanzado por el frente de onda se convierte en una nueva fuente de ondas, entonces, cada uno de los puntos de contacto ABD generara nuevos frentes de onda que alcanzarán la superficie y podrán ser detectados como se observa en la Figura 6.

Debido a que el $\sin 90^\circ=1$, el ángulo crítico queda definido solamente por las velocidades de los estratos.

Figura 6

Refracción total.



Fuente: (Jose Cantos Figuerola, 1973, p. 203)

Durante la práctica las técnicas utilizadas fueron: reflexión sísmica, refracción sísmica y Down Hole.

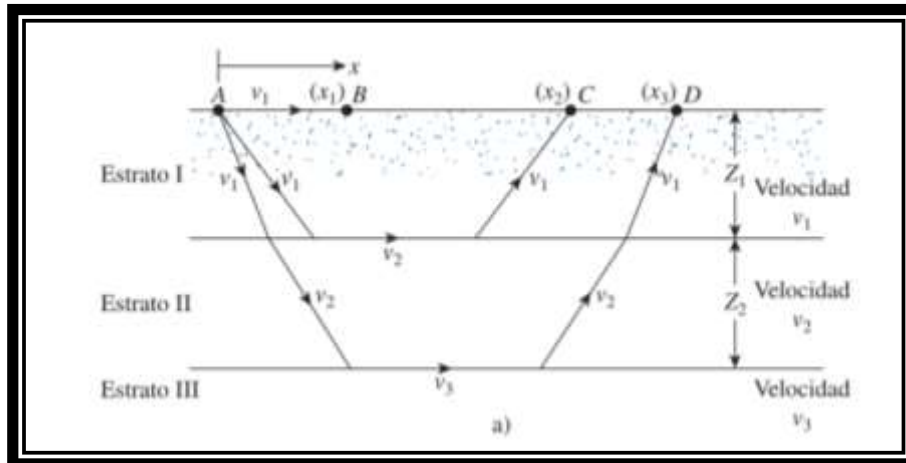
4.2.1. Sísmica de Refracción

La técnica de refracción se basa en generar y registrar las ondas sísmicas que presenten una refracción total a lo largo de los contactos de velocidades distintas en las diferentes capas del suelo, ya que estas son las que proporcionan los recorridos de tiempo mínimo y por tanto las que se registran como primeras llegadas. (Figuerola, 1953)

La Figura 7 es un esquema de un montaje para refracción sísmica, en donde se realizan impactos sobre el punto A y se registra la llegada de las perturbaciones por medio de geófonos en los puntos B, C y D; el impacto genera dos tipos de ondas de esfuerzo: ondas P (ondas de compresión planas) y ondas S (ondas cortantes). Las ondas P viajan más rápido que las ondas S; de aquí que la primera llegada de las ondas estará relacionada con las velocidades de las ondas P en varios estratos. (Das, 2012)

Figura 7

Esquema método de refracción sísmica.



Fuente: (Das, 2011, p. 119)

De los sismogramas medidos se identifican los tiempos de llegada de los diferentes paquetes de ondas y ya que se conoce la distancia a la cual se registra el tiempo de arribo, es posible calcular las velocidades de compresión. Las velocidades se pueden medir directamente en los sismogramas como las pendientes de los primeros tiempos de arribo de las ondas, y los interceptos donde se registran los cambios de pendientes se usan para estimar los espesores de las diferentes capas, habrá tantas capas como cambios de pendientes se identifiquen en el registro.

Para determinar la velocidad de las ondas P y los espesores de estos estratos, en (Das, 2012) se utiliza el procedimiento siguiente:

1. Se obtienen los tiempos de la primera llegada, t_1 , t_2 , t_3 ..., en varias distancias x_1 , x_2 , x_3 ..., desde el punto de impacto.
2. Se traza una gráfica del tiempo t contra la distancia x . La gráfica se verá como la que se muestra en la Figura 8.
3. Se determinan las pendientes de las rectas ab, bc, cd.

$$\text{Pendiente de ab} = 1/v_1$$

$$\text{Pendiente de bc} = 1/v_2$$

$$\text{Pendiente de cd} = 1/v_3$$

4. Se determina el espesor del estrato superior: El valor de x_c se puede obtener de la gráfica, como se muestra en la **Figura 8**.

$$Z^1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V^2 - V^1}{V^2 + V^1}} X_c$$

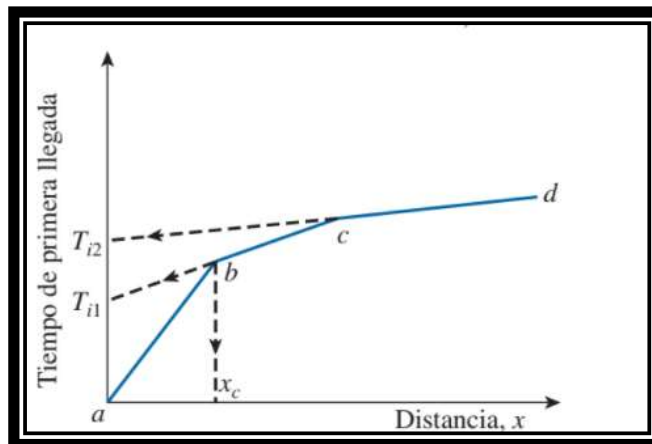
5. Se determina el espesor del segundo estrato:

$$Z^2 = \frac{1}{2} \left[T_{i2} - 2ZI \frac{\sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_3 V_1} \right] \frac{V_3 V_2}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

Aquí, T_{i2} es la intercepción del tiempo de la recta cd en la figura 8, prolongada hacia atrás.

Figura 8

Grafica de tiempo de llegada de ondas P contra distancia del geófono de la fuente.



Fuente:(Das, 2011, p. 119)

Las velocidades de las ondas P indican los tipos de suelo o roca que se encuentran abajo de la superficie del terreno. El intervalo de la velocidad de las ondas P para diferentes tipos de suelos y roca se indican en la Tabla 3.

Tabla 3

Intervalo de velocidad de la onda P en varios tipos de suelos y rocas.

Tipo de suelo o roca	Velocidad de onda P
Suelo	
Arena, limo seco y capa superficial de grano fino	200 – 1000
Aluvión	500 - 2000
Arcillas compactas, grava arcillosa y arena arcillosa densa	1000 – 2500
Loess	250 – 750
Roca	
Pizarra y esquisto	2500 - 5000
Arenisca	1500- 5000
Granito	4000 - 6000
Caliza firme	5000 - 10000

Fuente: (Das, 2011, p. 121)

Según Das (2012) al analizar los resultados de un sondeo por refracción, se debe tener en cuenta dos limitaciones:

1. Las ecuaciones básicas para la determinación del espesor de los estratos se basan en la suposición de que la velocidad de las ondas P son $v_1, v_2, v_3 \dots$
2. Cuando un suelo está saturado debajo del nivel freático la velocidad de las ondas P puede ser engañosa. Las ondas P pueden viajar con una velocidad de aproximadamente 1500 m/s a través del agua. Para suelos secos y sueltos, la velocidad puede ser mucho menor que 1500 m/s. Sin embargo, en una condición saturada, las ondas viajarán a través del agua presente en los espacios vacíos con una velocidad de aproximadamente 1500 m/s. Si no se ha detectado la presencia de agua freática, la velocidad de las ondas P se puede interpretar erróneamente e indicar un material más resistente (por ejemplo, una arenisca) que la real in situ. En general, las interpretaciones geofísicas siempre se deben verificar con los resultados obtenidos de sondeos.

4.2.2. Sísmica de Reflexión

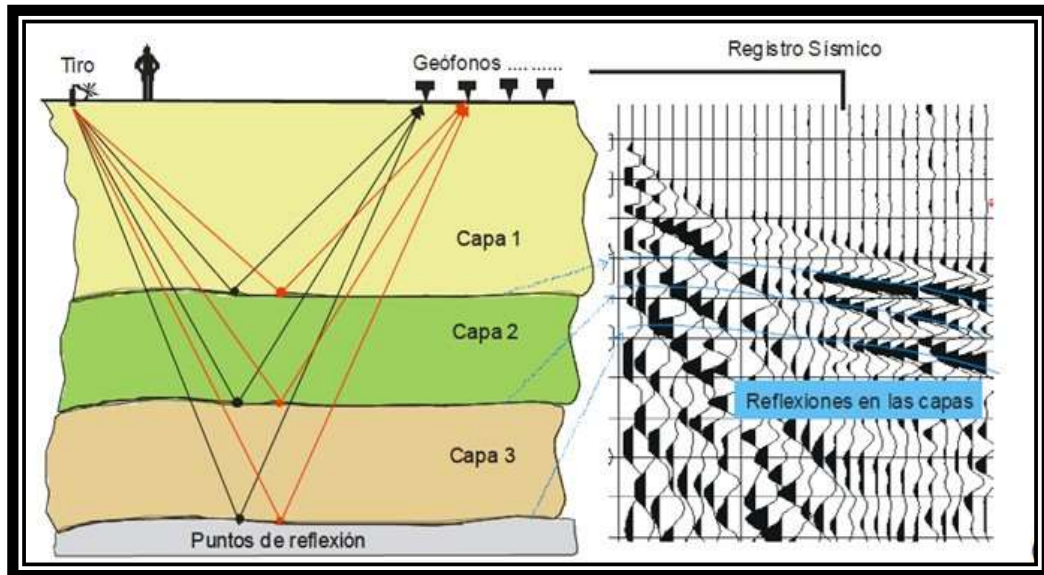
El método sísmico de reflexión busca registrar los tiempos de llegada de las ondas reflejadas en las interfaces del subsuelo con el fin de obtener información en profundidad de las propiedades y forma geométrica de las interfaces como se observa en la Figura 9. La fracción de la energía reflejada en la interfaz de dos medios depende del contraste de la impedancia y del ángulo de incidencia de la onda. (Figuerola, 1953).

4.2.3. Down-Hole

El ensayo de Down Hole permite determinar la variación de la velocidad de propagación de ondas en profundidad, consiste en generar ondas mediante golpes verticales y horizontales en una placa ubicada en superficie de 1 a 3 metros de distancia del pozo (Figura 10) y registrar respectivamente los tiempos de llegada de las ondas de compresión (P) y de corte(S) a través de un geófono triaxial (Figura 11) que es introducido dentro del sondeo, el sensor se baja y se fija cada metro desde la superficie hasta la máxima profundidad alcanzada por el sondeo, realizando impactos en sentido horizontal y vertical en cada punto. Conociendo la geometría fuente-geófonos del dispositivo y los tiempos de llegada de las ondas sísmicas (Figura 12), es posible calcular las velocidades de propagación a distintos niveles de profundidad a lo largo del pozo. (Geodatos, s.f.)

Figura 9

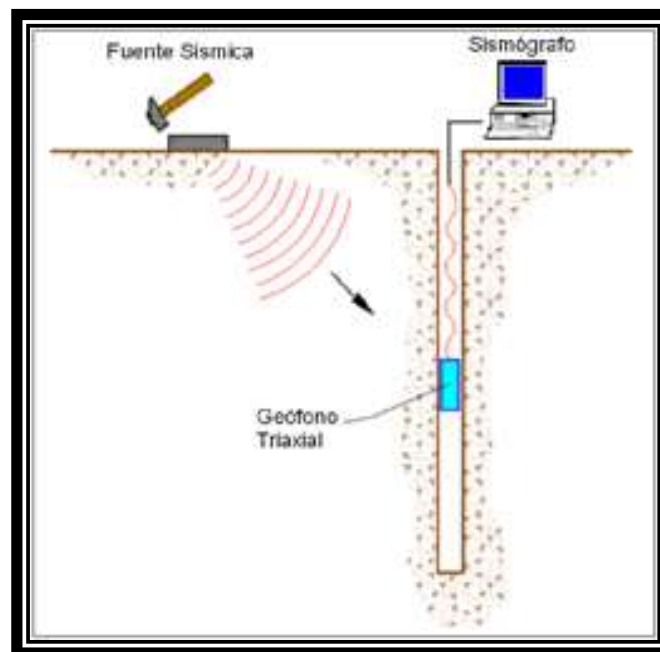
Esquema del recorrido de rayos reflejados.



Fuente: (Geomastersac.com, 2021).

Figura 10

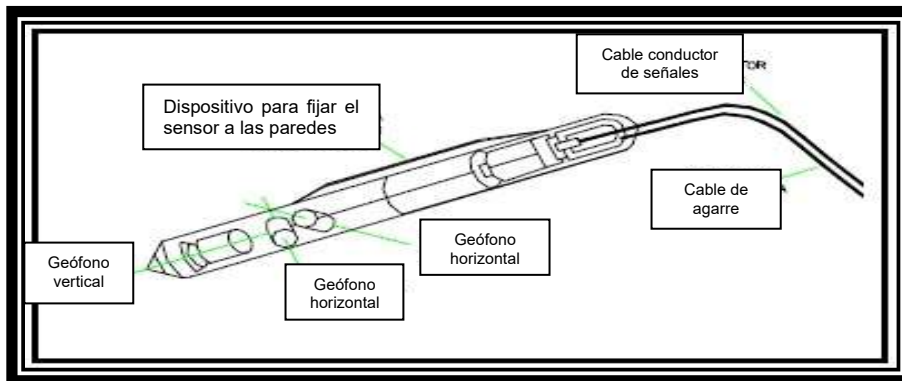
Esquema ensayo Down Hole.



Fuente: (Geodatos.cl, 2021).

Figura 11

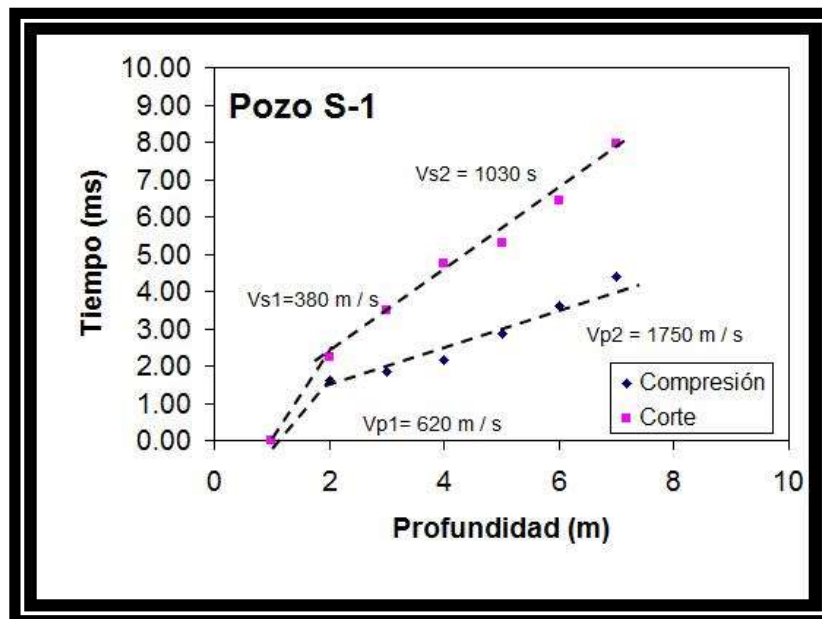
Geófono Triaxial para ensayos Down-hole.



Fuente: (Geodatos.cl, 2021).

Figura 12

Grafica tiempo-profundidad



Fuente: (CIM Group Consultora de Ingeniería, 2021).

Basados en la velocidad de propagación de las ondas de compresión (ondas P) y de cizalla (ondas S); y la densidad de los materiales este ensayo permite estimar los módulos dinámicos de deformación del terreno, tales como, Razón de

Poisson, Módulo de Corte, Módulo de Young, Modulo Volumétrico Dinámico, entre otros (Geodatos.cl, 2021).

Entre las principales aplicaciones destaca:

- Es uno de los métodos geofísicos activos actualmente recomendado para la obtención de la velocidad de propagación de las ondas de corte y con ello la clasificación de suelos.
- Reconocer los contactos entre las distintas unidades litológicas reconocidas hasta la profundidad de investigación.
- Evaluar las características geotécnicas de cada unidad geológica e identificar posibles zonas de falla, de fracturamiento/alteración de rocas, etc.
- Con los módulos que se obtienen, se pueden realizar cálculos del comportamiento sísmico en diversas estructuras u obras civiles, según normativa de diseño vigente.

El método también cuenta con una serie de limitaciones entre las que sobresalen:

- Requiere de una gran precisión en la determinación de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas Para la aplicación del método, la habilitación del pozo debe asegurar la integridad de éste a medida que se ejecuta el ensayo.
- Las lecturas pueden sufrir posibles distorsiones por presencia de fluidos en el sondeo, por lo que se recomendaría algún perfilaje de tipo acústico en el caso de contar con un pozo que presente dicha característica.
- Excesivo o insuficiente impulso al generar la onda, según profundidad en la que es captada por el receptor, puede influir en la calidad de señal/ruido

4.3. Métodos Eléctricos

Los métodos eléctricos basan su aplicación en la inyección de corriente eléctrica en el terreno, con el objetivo de medir propiedades eléctricas de las rocas tales como la resistividad, gracias a su economía y a la facilidad de toma de datos en campo, estos métodos son usados frecuentemente en campos como la minería y la geotecnia con el propósito de determinar la presencia de niveles freáticos, variaciones litológicas, búsqueda de estructuras e identificación de minerales entre otras.

Durante el desarrollo de la práctica académica se utilizaron dos métodos eléctricos, tomografías y sondeos eléctricos verticales. El primero permite a partir de una toma sistemática de valores de resistividad tanto en la horizontal como en profundidad obtener imágenes en dos y tres dimensiones que evidencian la variación de resistividades en el terreno. El segundo método se vale de las diferencias de resistividad aparente del terreno para identificar variaciones litológicas en profundidad.

La interpretación de estos métodos tiene un fundamento, el cual la empresa ha estipulado bajo los siguientes conceptos:

La resistividad indica el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica y es la base de estudio en cualquier metodología utilizada, se designa con la letra ρ y se mide en unidades de ohm-m; la resistividad es directamente proporcional a la resistencia, al área del conductor (área transversal a la dirección de flujo de corriente) e inversamente proporcional a la longitud.

$$\rho = RA/L \quad (1)$$

De acuerdo con la ley de Ohm, la resistencia también se define en términos del cociente de la caída de potencial y la corriente que pasa por el medio, esto es:

$$R = V/I \quad (2)$$

De las ecuaciones (1) y (2) se tiene una nueva expresión para la resistividad en términos de la corriente y la caída de potencial:

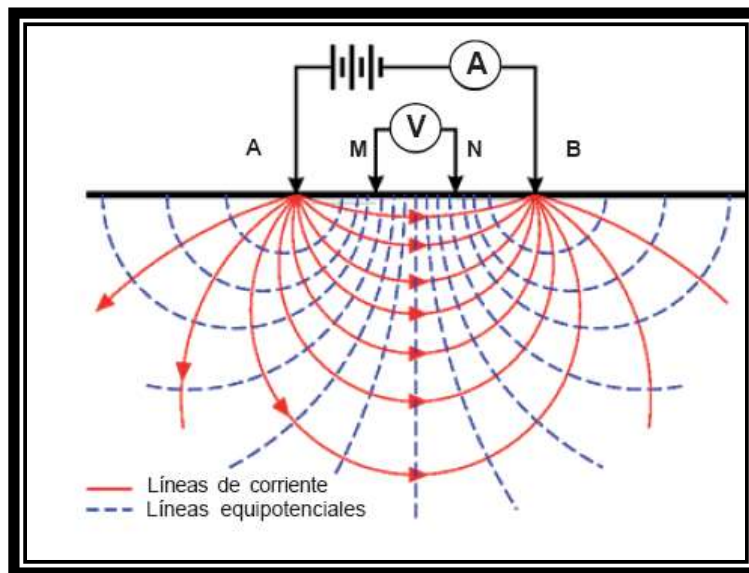
$$\rho = VA / IL \quad (3)$$

Cuyas unidades son ohm-metro (Ω/m). El inverso de la resistividad ($1/\rho$) se define como la conductividad eléctrica de un material (σ), la cual tiene como unidades siemens/metro (S/m) o su equivalente el ohm/metro.

La Figura 13 ilustra el principio fundamental de la medida de resistividad en el subsuelo. El método consiste en inyectar una corriente eléctrica continua a través de los electrodos A y B, y midiendo la diferencia de potencial que existe entre el par de electrodos M y N.

Figura 13

Esquema básico de dispositivo para determinar la resistividad



Fuente: (Geofísica Andina, 2021)

Para un medio homogéneo e isotrópico de resistividad, la diferencia de potencial se calcula como (Orellana, 1982):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4)$$

Donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre los electrodos. La resistividad viene dada por la ecuación:

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

Dónde g es un factor geométrico que depende del arreglo de los electrodos se calcula como:

$$g = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (6)$$

La resistividad calculada mediante la ecuación (5) es conocida como resistividad aparente y es simplemente una medida de la resistividad media ponderada de la resistividad bajo los cuatro electrodos. Si el suelo es homogéneo, la resistividad aparente y la resistividad real son las mismas.

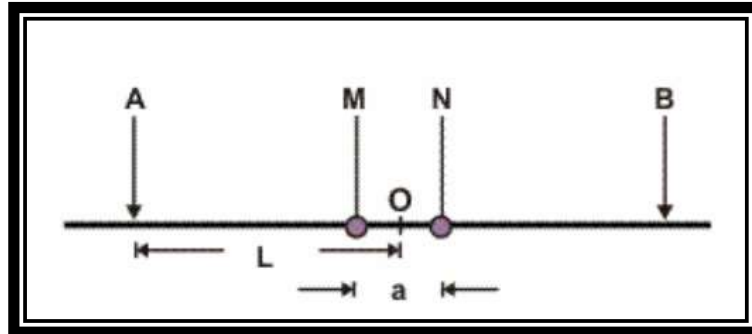
A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes arreglos para la ubicación de los electrodos, sin embargo, muchos de ellos han quedado en desuso dándole mayor importancia a los dispositivos Schlumberger y dispositivos Wenner. (José Cantos Figuerola, 1973, p. 397).

Dispositivo Schlumberger: en este tipo de arreglo los electrodos de voltaje M y N se sitúan simétricamente a lado y lado del centro del arreglo a una distancia a entre sí, y los electrodos de corriente de igual forma se sitúan a una distancia L del centro del arreglo, tal como se observa en la Figura 14.

Dispositivo Wenner: tanto los electrodos de corriente como los de voltaje son ubicados simétricamente a partir del centro del arreglo, sin embargo, para este caso las distancias entre electrodos deben ser la misma, como se observa en la Figura 15.

Figura 14

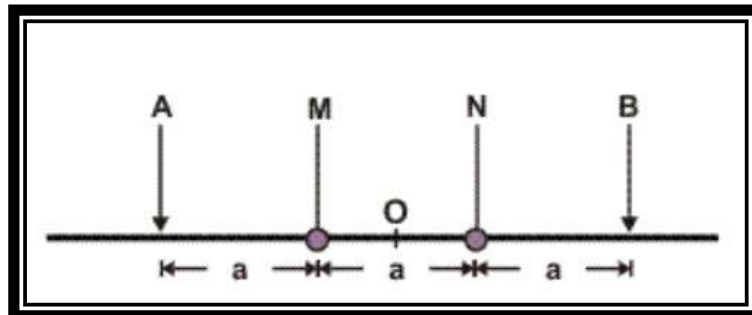
Esquema dispositivo Schlumberger.



Fuente: (Miguel Auge, 2008)

Figura 15

Esquema dispositivo Wenner.



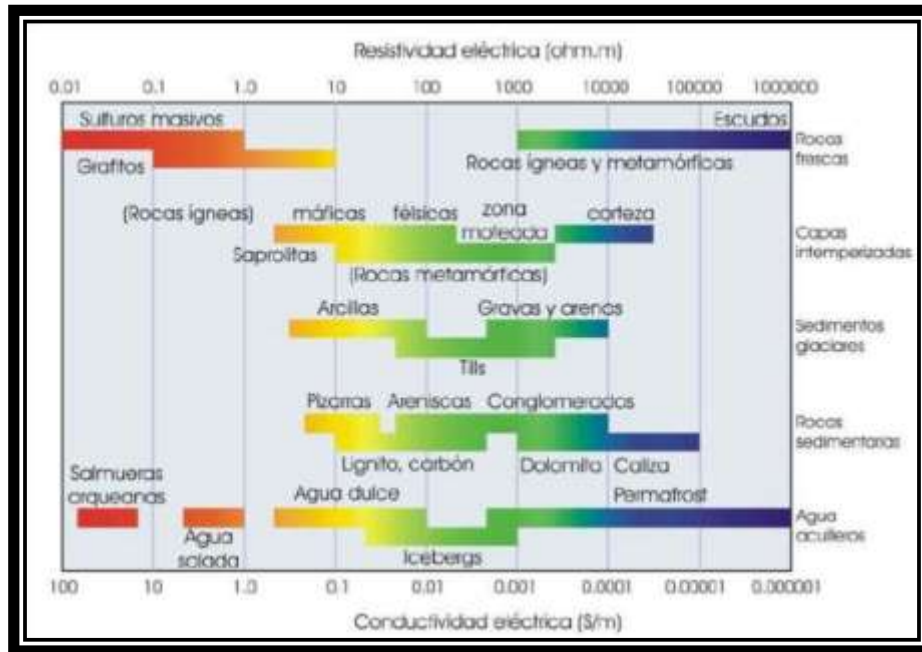
Fuente: (Miguel Auge, 2008)

La variación de la resistividad no solo depende del tipo de roca sino también de características del terreno tales como la porosidad y forma de los poros, el grado de saturación del terreno, salinidad de los fluidos, temperatura, procesos geológicos y presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Es gracias a la estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno lo que permite utilizar este método en la búsqueda de focos de filtración de agua, niveles freáticos, pues un incremento en el contenido de agua del terreno mostrara disminuciones de la resistividad. En la **Figura 16** se presentan los rangos de resistividades típicos para diferentes tipos de rocas y suelos.

Figura 16

Resistividad de los principales materiales de la tierra



Fuente: (Palacky, 1987).

4.3.1. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

El método consiste en determinar un conjunto de datos de resistividad aparente, en donde el arreglo puede ser cualquiera de los mostrados en los esquemas de la

Figura 17 y la **Figura 18** siempre y cuando se mantenga constante el centro del mismo y ampliando la distancia entre electrodos según el arreglo, esto con el objetivo de obtener un modelo de las variaciones de la resistividad en función de la profundidad sobre un mismo eje vertical para poder identificar las diferentes capas del suelo. La profundidad alcanzada por la corriente está directamente relacionada con la separación de los electrodos. (Figueroa, 1973, p. 401)

Los datos obtenidos en campo se organizan en un formato como el de la **Tabla 4**, se genera un modelo o curva de resistividades aparentes y posteriormente se realiza un modelo de inversión para obtener los valores de resistividad real y generar un perfil.

Tabla 4

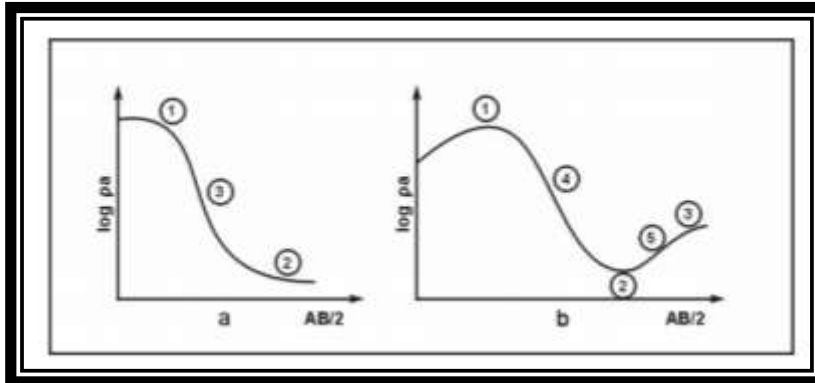
Formato para el cálculo de la resistividad aparente.

SONDEO ELECTRICO VERTICAL								
Proyecto: Operador:			Sondeo					
Tipo de arreglo			Schlumberger			Coordenadas:		
MEDICIONES DE CAMPO								
N°	AB/2	MN/2	K	Voltaje telúrico	DC (medido)	DC (final)	I	pa
	(m)	(m)			(mV)	(mV)	(mA)	
1	1,5	0,5	6,28			0		#;DIV/0!
2	2,5	0,5	18,85			0		#;DIV/0!
3	3	0,5	27,49			0		#;DIV/0!
4	4	0,5	49,48			0		#;DIV/0!
5	5	0,5	77,75			0		#;DIV/0!
6	5	1	37,70			0		#;DIV/0!
7	6	1	54,98			0		#;DIV/0!
8	7	1	75,40			0		#;DIV/0!
9	8	1	98,96			0		#;DIV/0!
10	9	1	125,66			0		#;DIV/0!
11	10	1	155,51			0		#;DIV/0!
12	10	2	75,40			0		#;DIV/0!
13	12	2	109,96			0		#;DIV/0!
14	14	2	150,80			0		#;DIV/0!
15	16	2	197,92			0		#;DIV/0!
16	18	2	251,33			0		#;DIV/0!
17	20	2	311,02			0		#;DIV/0!
18	20	4	150,80			0		#;DIV/0!
19	25	4	239,15			0		#;DIV/0!
20	30	4	347,15			0		#;DIV/0!
21	35	4	474,77			0		#;DIV/0!
22	40	4	622,04			0		#;DIV/0!

Según Auge (2008) la Figura 18 representa la configuración del subsuelo para 2 capas resistivas, en el caso de a y de 3, en el caso de b, donde los puntos más bajos y más altos corresponden a las resistividades aparentes; y la Figura 19 representa esquemáticamente las formas de las curvas de resistividad aparente versus AB/2 para 2, 3 y 4 capas y diferentes relaciones de a en profundidad.

Figura 17

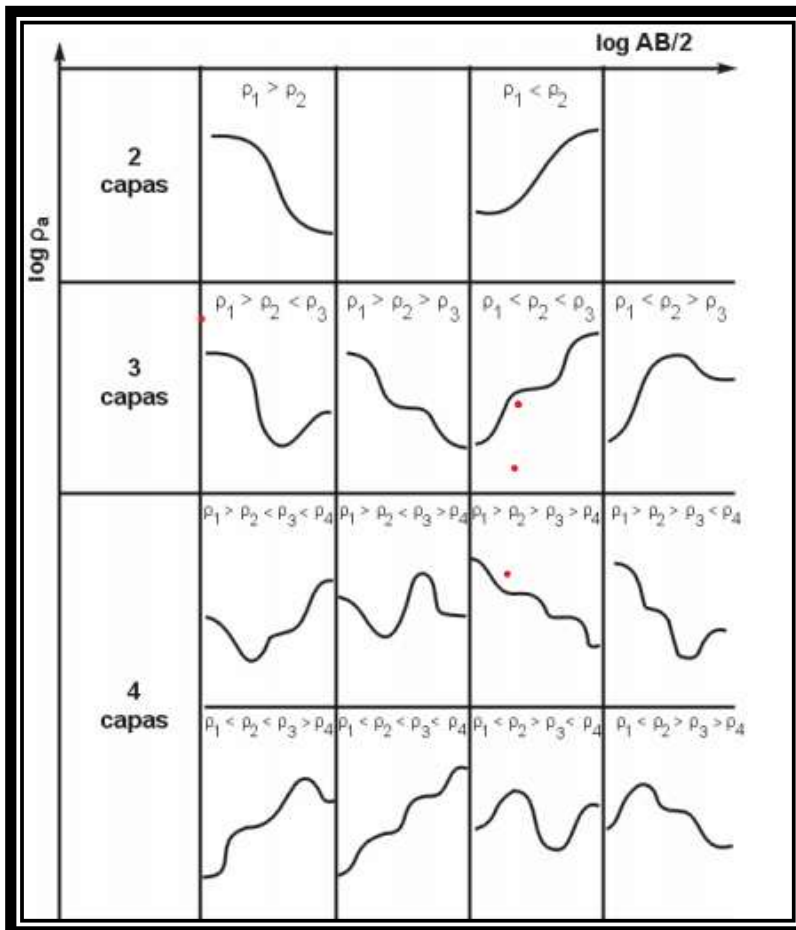
Curvas de resistividades aparentes para 2 y 3 capas.



Fuente: (Auge, 2008).

Figura 18

Curvas de resistividades aparentes para 2, 3 y 4 capas



Fuente: (Auge, 2008).

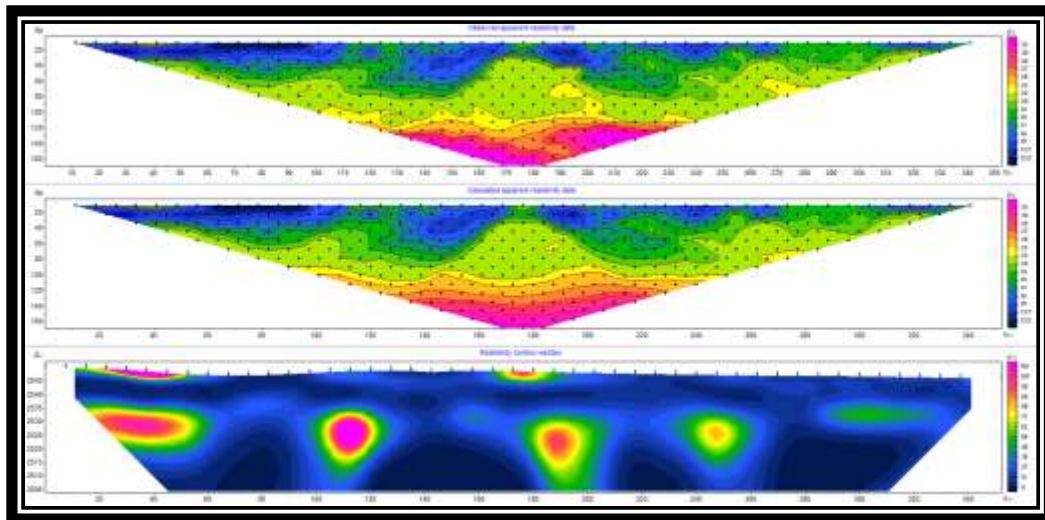
4.3.2. Tomografías

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectrodico usado en la resolución de un amplio abanico de problemas ingenieriles e hidrogeológicos, por medio de la obtención de imágenes del subsuelo donde se representan los valores de resistividades reales. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplican las técnicas de “inversión” (Locke, Tutorial 2D and 3D Electrical Imaging Surveys, 2004).

En la Figura 19 se presenta un ejemplo del proceso de inversión realizado para la generación de la tomografía. En la parte superior observa un pseudoperfil de contornos con los valores de resistividad aparente medidos en campo (pseudosección), posteriormente se genera un modelo de resistividades aparentes calculados numéricamente del modelo con los valores reales de resistividad y se calcula el error comparando las resistividades aparentes y las medidas en campo; a través de este error se modifica el modelo hipotético de resistividades verdaderas, consiguiendo un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que se ajustan a las resistividades aparentes medidas.

Figura 19

Tomografía con valores de resistividad aparente y real del terreno.



Nota: Tomografía con valores de resistividad aparente y real del terreno tomada del proyecto PTAR Canoas.

4.4. Ensayos de Laboratorio.

De acuerdo a las necesidades y objetivos de cada proyecto, se realizan una serie de ensayos de laboratorio que buscan determinar las propiedades geotécnicas del suelo, entre las más utilizadas se encuentran la distribución granulométrica, humedad, compresión, consolidación, plasticidad y resistencia cortante.

4.4.1. Granulometría

Este método consiste en separar y dividir el material mediante una serie de tamices que fraccionan el muestreo según sus diferentes tamaños (varían de 0.074mm hasta 76.2mm) en forma decreciente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); cada fracción obtenida de los diferentes tamices es expresada en porcentaje respecto a la masa inicial del material. Este ensayo se realiza bajo las normas ASTM C 136 –01 y ASTM C 117 –95.

Figura 20

Tamices y Tamizadora.



Fuente: (DirectIndustry, s. f.)

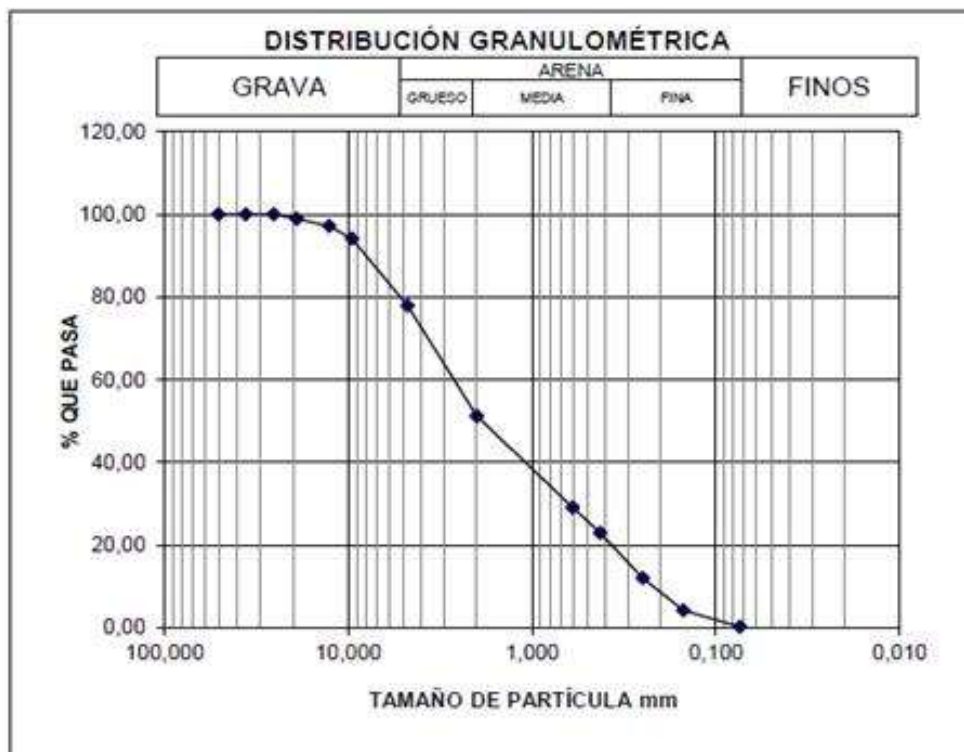
ASTM C 136 –01. “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.” Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso.

ASTM C 117 –95. “Standard Test Method For Materials Finer Than 75 μm Sieve in Mineral Aggregates by Washing” Método de ensayo estándar para material más fino que la malla N° 200 (75 μm) en agregado mineral por lavado.

De acuerdo a la norma ASTM C 136 para el ensayo se deberá escoger una muestra de material en función del tamaño máximo nominal de sus partículas según la **Tabla 5**

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta gráficamente en forma de curva en un papel denominado "log-normal" por tener en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural, donde el porcentaje que pasa es graficado en las ordenadas y el diámetro de las partículas en las abscisas (**Figura 21**)

Figura 21
Curva granulométrica



Fuente: (Palacio-León et al., 2017)

Tabla 5

Criterios de selección del tamaño de la muestra de prueba.

Máximo tamaño nominal (mm)	Mínimo de masa a utilizar (g)
4.75	300
9.5	1000
19	2500
37.5	5000

Fuente: (ASTM International, 2007)

Para la clasificación del suelo en base a su distribución granulométrica se utiliza el diagrama de flujo para la clasificación de suelos de grano grueso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

4.4.2. Humedad.

La humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, entre otras. El contenido de agua o humedad de un material, según la norma ASTM 2216-98 es la razón, expresada como porcentaje, de la masa de agua contenida en los poros, o agua libre, en una masa dada de material con respecto a la masa del material sólido. La humedad es una de las propiedades más significativas para establecer una correlación entre el comportamiento del suelo y sus propiedades.

El método consiste en secar la muestra en un horno a temperatura de 110 +- 5 °C hasta obtener un peso constante, la pérdida de peso durante el secado se considera como agua, el contenido de agua es calculado usando el peso de agua y el peso de la muestra seca, el cálculo se hace de la siguiente manera:

$$W = \left[\frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \right] * 100 = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

Donde:

W= contenido de humedad en %

M_{cws}= peso de recipiente y el espécimen húmedo, g.

M_{cs} peso del recipiente y el peso del espécimen secado, g.

M_c= peso del recipiente, g.

Mw= peso del agua

Ms= peso de las partículas sólidas

4.4.3. **Compresión en Roca**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia uniaxial no confinada o resistencia a la compresión simple en núcleos de roca, el ensayo consiste en la aplicación gradual de una fuerza uniaxial (σ_1) por medio de una prensa hidráulica de compresión (**Figura 22**), hasta que se produzca la rotura del núcleo. Una vez producida la fracturación del núcleo la prensa arroja los datos de los esfuerzos aplicados ($\sigma_1 \neq 0$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) a partir de los cuales se puede obtener σ_c (resistencia a la compresión simple)

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1}{A}$$

Donde:

σ_1 = esfuerzo máximo

A = área promedio de la sección transversal

Figura 22

Prensa hidráulica de compresión



Fuente:(DirectIndustry, s. f.).

Esta prueba se realiza siguiendo los lineamientos propuestos por la norma ASTM D7012-04 "Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures", cumpliendo las siguientes condiciones:

- Razón Largo/Ancho de la probeta debe ser 2.5 a 3.0:1
- Extremos deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- Ancho de muestra debe ser >10 veces el tamaño medio del grano.

4.4.4. Consolidación

La consolidación de un suelo hace referencia a la reducción gradual de volumen del mismo debido a la aplicación de cargas estáticas, pérdida de aire o agua o por un reajuste de la fábrica textural.

Según la norma I.N.V.E 151-07 se refiere al procedimiento para determinar la rata y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se drenan mientras se someten a incrementos controlados de esfuerzo vertical aplicados hasta que todo el exceso de presión de agua en los poros se disipe para cada incremento. La transferencia de carga es acompañada por un cambio en el volumen del suelo igual al volumen de agua drenada, estos datos son registrados para calcular los parámetros que describen la relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos o deformación. La determinación de la rata y magnitud de la consolidación de un suelo permiten tomar decisiones en cuanto al tipo de cimentación a usar en una estructura. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Para el desarrollo de este ensayo se hace uso de un consolidómetro como el que se muestra en la Figura 23

Figura 23

Consolidómetro.



Fuente: (Equipment, 2021)

4.4.5. Límites de Atterberg

Cuando un suelo cohesivo se mezcla con una cantidad excesiva de agua, estará en un estado líquido, la disminución en porcentaje del contenido de humedad al que este suelo en estado líquido pasa a estado plástico se denomina límite líquido. Con un mayor porcentaje de reducción de humedad, este suelo ahora plástico pasara a un estado semisólido y posteriormente a un estado sólido, estos límites se conocen como límite plástico y límite de contracción respectivamente. (Braja M, Das, 2002, p. 35)

Los límites de Atterberg pueden definirse como los límites de los contenidos de humedad que caracterizan los cuatro estados de consistencia de un suelo cohesivo (estado sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso). Fueron originalmente ideados por Albert Mauritz Atterberg (1846-1916) especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen.

En la **Figura 24** se evidencia que el límite entre los estados sólido y semisólido se denomina límite de retracción, el límite entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico y el límite entre los estados plástico y semilíquido, límite líquido.

Figura 24
Límites de Atterberg.



Nota: El esquema relaciona el aumento del porcentaje de humedad con los estados de consistencia del suelo y sus límites.

Fuente: (geologiaweb, s. f.)

Límite líquido: La determinación del límite líquido se realiza bajo los lineamientos de la normativa INV E-125 mediante el uso de la cazuela de Casagrande (**Figura 25**), se colocan muestras de material con diferentes humedades dentro de la cazuela y se hace una ranura en medio de la muestra, se cuenta la cantidad de golpes que fueron necesarios para cerrar la ranura y se grafican los datos de humedad vs cantidad de golpes en una curva de flujo como la de la **Figura 26**; el porcentaje de humedad del límite plástico será el que corresponda a 25 golpes.

Figura 25

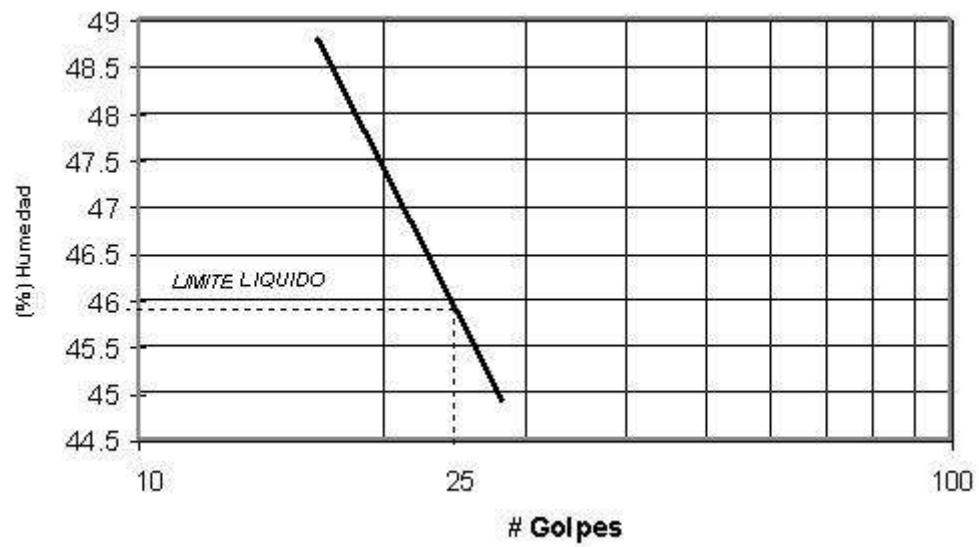
Cazuela de Casagrande.



Fuente:(Equipment, s. f.)

Figura 26

Curva de flujo de la determinación del límite líquido de un suelo

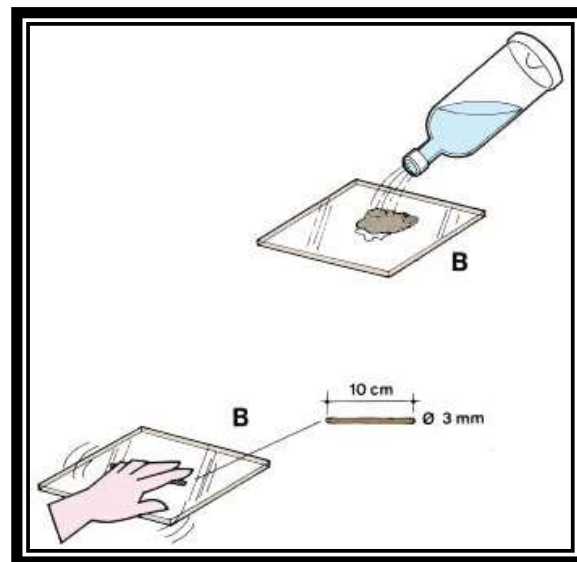


Fuente: (<http://geotecnia-sor.blogspot.com>, 2010)

Limite plástico: Según la norma INV E-126 se denomina límite plástico a la humedad más baja con la cual pueden formarse rollos de suelo de unos 3mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa hasta llegar al punto en que estos cilindros presenten agrietamientos, pero sin desmoronarse (**Figura 27**).

Figura 27

Formación de rollos de suelo de 3mm de diámetro.



Fuente: (<http://www.fao.org>, s. f.)

Índice de plasticidad: Es el rango de contenidos de agua, dentro del cual el suelo se comporta plásticamente, según la norma INV E-126 se puede definir el índice de plasticidad (IP) de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico

$$I_P = L_L - L_P$$

Cuando el límite líquido o el límite plástico no se puedan determinar, el índice de plasticidad se informará con la abreviatura NP (No plástico); así mismo, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informará como No plástico (Invías, 2007, p. 5).

4.5. Clasificación Geomecánica de Macizos.

La clasificación de macizos rocosos sirve para dar una idea preliminar de la calidad del macizo y su variabilidad. Existen dos sistemas ampliamente utilizados en el mundo los cuales incorporan parámetros tanto geológicos como ingenieriles dando como resultado un valor para la calidad del macizo, dichos métodos son:

4.5.1. Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1976)

Los parámetros base de la clasificación se encuentran en la Tabla 6, a cada parámetro se le asigna un factor, que a su vez tiene un rango numérico asignado que depende de las características del parámetro; La suma de los valores encontrados para los seis factores indicara el tipo de macizo rocoso (Tabla 7).

Tabla 6

Parámetros de clasificación de macizos RMR

Parámetros	Factor	Rango
Resistencia a compresión simple de material rocoso intacto	A1	0 – 15
Índice recuperación modificada de testigo o RQD	A2	3 – 20
Espaciamiento entre discontinuidades o fracturas	A3	5 – 20
Estado físico de las discontinuidades	A4	0 - 30
Efectos agua subterránea	A5	0 – 15
Orientación de las discontinuidades	B	(-12) -0

Fuente: (Luis I. González de Vallejo, 2002, p. 232).

Nota: $RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B$

Tabla 7

Clasificación de macizo según el RMR.

Clase de macizo rocoso	Descripción	RMR
I	Macizo rocoso de excelente calidad	81 – 100
II	Macizo rocoso de buena calidad	61 - 80
III	Macizo rocoso de calidad regular	41 - 60
IV	Macizo rocoso de mala calidad	21 – 40
V	Macizo rocoso de muy mala calidad	0 - 21

Fuente: (Luis I. González de Vallejo, 2002, p. 233).

4.5.2. Clasificación Geomecánica Sistema Q (Barton, 1974)

Fue desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974 a partir del estudio de un gran número de túneles, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos de macizo y diseñar sostenimiento para túneles y cavernas subterráneas. (Luis I. González de Vallejo, 2002, p. 508)

El índice Q está basado en la valoración numérica de los parámetros dados por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

RQD: Índice de calidad de la roca

J_n: Índice de diaclasado

J_r: Índice de rugosidad de las discontinuidades

J_a: Índice de alteración de las discontinuidades

J_w: Factor de reducción por presencia de agua

SRF: Factor de reducción por tensiones

Una vez hallado el índice Q a partir de la determinación de los valores de cada parámetro, la Tabla 8 indica la calidad del macizo.

Tabla 8

Tabla de clasificación de macizos de Barton.

Tabla de clasificación final	(Q)
Excepcionalmente malo	<0,01
Extremadamente malo	0,01 – 0,1
Muy malo	0,1 – 1
Malo	1 – 4
Medio	4 – 10
Bueno	10 – 40
Muy bueno	40 – 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	>400

Fuente: (Luis I. González de Vallejo, 2002, p. 508)

4.6. Fallas Geotécnicas en los Macizos Rocosos

El termino falla geotécnica hace referencia a la manera en que un macizo rocoso o masa de suelo pueda fracturarse o romperse a causa de aumento de carga o a la disminución de la resistencia; existen tres tipos de falla geotécnica (planar, por volcamiento y diédrica o en cuña). Para identificar el tipo de falla que se pueda presentar en un macizo rocoso se hace necesario conocer los datos estructurales de las discontinuidades, orientación del talud y el ángulo de fricción del macizo rocoso.

Según Santiago Cano Bedoya (2019) los tipos de fallas y las condiciones para que estas se den son las presentadas a continuación.

4.6.1. Falla Planar

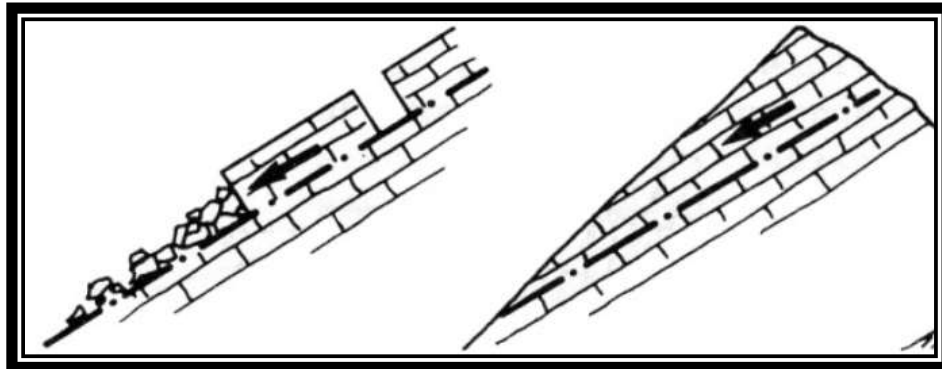
Se da cuando en una masa de roca, ocurre que una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la cara del talud y buza hacia ésta con un ángulo mayor que ángulo de fricción (Figura 28). Las condiciones necesarias para que se dé una falla planar son las siguientes.

- La diferencia entre la dirección de buzamiento de la discontinuidad y la dirección de buzamiento del talud sea menor o igual a 20.
- El ángulo de buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el ángulo de buzamiento del talud.

- El ángulo de buzamiento del talud debe ser mayor que el ángulo de fricción del talud.

Figura 28

Esquema falla planar



Fuente: (Hutchinson, 1988) en (Olarte, 2017)

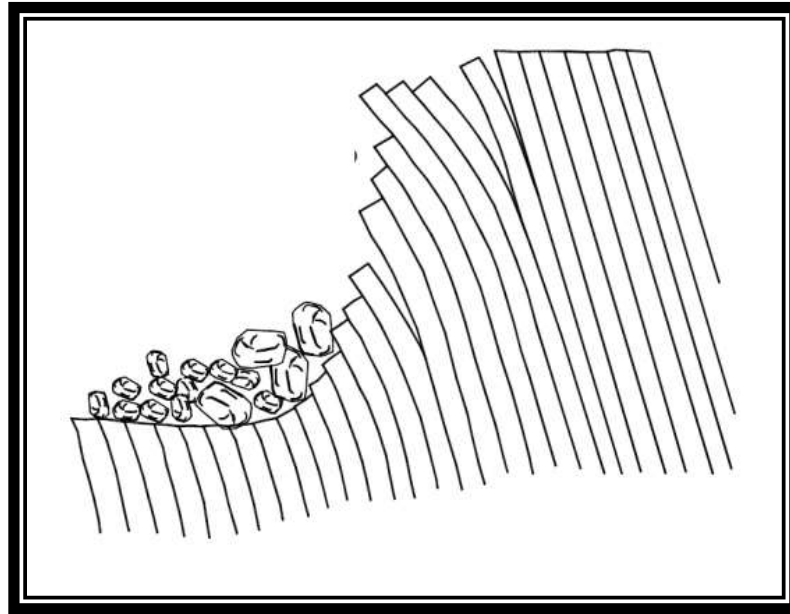
4.6.2. Falla por Volcamiento

Se da cuando hay una rotación hacia delante de uno o varios bloques de roca alrededor de un punto de pivote o giro en su parte inferior, como se observa en la Figura 29. Las condiciones necesarias para que se dé una falla por volcamiento son las siguientes.

- La diferencia entre la dirección de buzamiento de la discontinuidad y la dirección de buzamiento del talud sea menor o igual a 20° .
- El ángulo de buzamiento de la discontinuidad debe ser opuesto al ángulo de buzamiento del talud con diferencia mayor a 80° .
- El ángulo de buzamiento del talud debe ser mayor que el ángulo de fricción del talud.

Figura 29

Esquema falla por volcamiento.



Fuente: (Cruden & Varnes, 1996) en (Olarde, 2017)

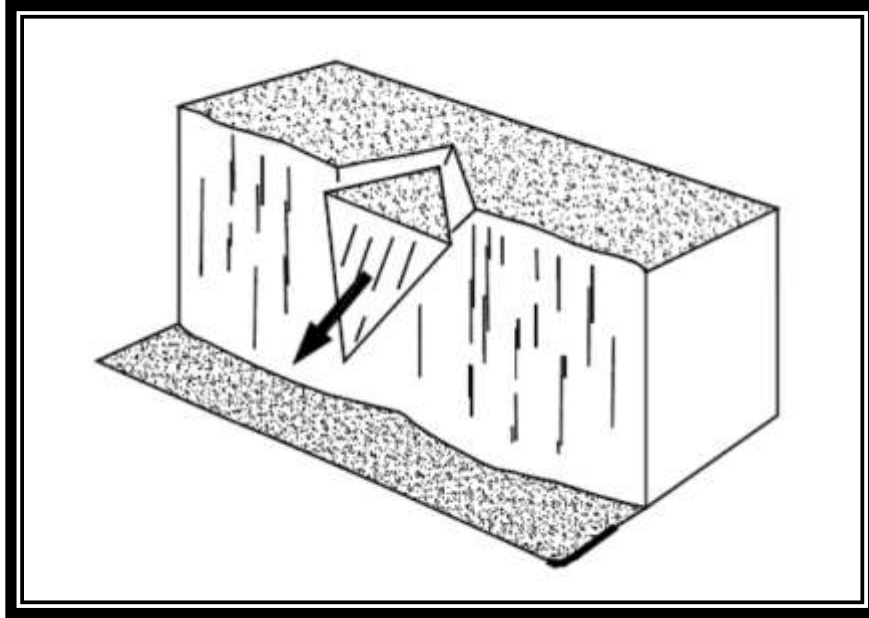
4.6.3. Falla Diédrica

Se da cuando en una masa de roca, hay dos planos de discontinuidad que se interceptan, por lo que el cuerpo se desplaza bien siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos o el buzamiento de uno de ellos, (Figura 30; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las condiciones necesarias para que se dé una falla diédrica son las siguientes.

- La diferencia entre la dirección de buzamiento de la línea de intersección entre los planos de discontinuidad analizados y la dirección de buzamiento del talud sea aproximadamente de 20 (De 15 a 25).
- El ángulo de buzamiento de la línea de intersección entre los planos de discontinuidad analizados debe ser menor que el ángulo de buzamiento del talud.
- El ángulo de buzamiento de la línea de intersección entre los planos de discontinuidad analizados debe ser mayor que el ángulo de fricción del talud.

Figura 30

Esquema falla diédrica.



Fuente: (Cruden & Varnes, 1996) en (Olarte, 2017)

5. Geología Regional

Debido a que los diferentes proyectos trabajados fueron divididos en tres zonas, se realizara una descripción de todas las unidades geológicas aflorantes en cada sector comenzando por la parte más occidental hasta la más oriental del terreno.

5.1. Sector de Buga y Palmira

La zona de trabajo se encuentra ubicada dentro de la cuenca Cauca Patía y estratigráficamente presenta rocas con edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Las cuales son, secuencias metamórficas del Grupo Bugalagrande (McCourt, 1982) y el complejo Rosario (Esquivel et al., 1981) generadas en un ambiente de subducción durante el Paleozoico; basaltos, pillow lavas y diabasas tectonizadas de la Formación Amaime (McCourt et al., 1984) y las metadiabasas del Macizo Ofiolítico de Ginebra generadas por la acreción de la corteza oceánica a la continental durante Mesozoico, que posteriormente da inicio la formación de un arco de islas y con este el ascenso de material magmático que formo el batolito de buga (INGEOMINAS, 1985, p. 12).

Las rocas del arco de islas fueron acrecionadas al bloque continental a lo largo de la falla Cauca-Patía y se encuentran representadas por la intercalación de bloques fallados de la Formación Volcánica, Formación Espinal (Ke) y Formación Cisneros (Kc). Durante el Mioceno, la formación del Graben del Cauca-Patía y la alta actividad volcánica dio paso a la máxima fase de depositación sedimentaria en cuencas fluviales, generando una secuencia de areniscas, conglomerados y localmente lentes volcánicos de origen piroclástico pertenecientes a la Formación La Paila (Nelson, 1957). Finalmente se desarrollaron depósitos cuaternarios ligados a los ríos más importantes (INGEOMINAS, 1985, p. 12).

Geología Estructural

Las rocas existentes en el área han sido sometidas a numerosos eventos tectónicos desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. La superposición de las fases de deformación ha generado un sistema complejo de fallas regionales en las que predominan tres direcciones de fallamiento: N20-30E, N60-70E y N40-50W (Nivia et al., 1997, en Nivia, 2001).

Sistema de fallamiento N20-30E: Es el más antiguo y constituye un cinturón de pliegues y fallas inversas de vergencia hacia el occidente (Alfonso et al., 1994, en Nivia, 2001). Las fallas más importantes de este sistema son el Sistema de Falla Campanario-San Jerónimo, Sistema de Falla Cauca-Almaguer (Falla de Romeral), Sistema de Falla Guabas-Pradera, Falla Palmira-Buga, Sistema de Falla Cali, Fallas Dagua-Calima (Nivia et al., 1997, en Nivia, 2001).

Sistema de fallamiento N40-50W: Se presenta en trazos segmentados dispuestos a manera de echelon, a lo largo de los cuales se identifican movimientos sinestrales que desplazan las trayectorias de las fallas del sistema N20-30E. Las fallas más notables son: Falla de Naranjal, Falla de Las Cañas, Falla de Mulaló (Nivia et al., 1997, en Nivia, 2001).

Sistema de fallamiento N60-70E: Consiste en zonas de cizallamiento compuestas por numerosas fallas locales, a lo largo de las cuales se presentan desplazamientos predominantemente dextrales, del orden de unas decenas de metros (Nivia et al., 1997, en Nivia, 2001).

Geología Local

El área de estudio se encuentra ubicada sobre depósitos aluviales cuaternarios generados por la dinámica del Río Cauca, estos depósitos se encuentran sobre rocas de la Formación La Paila y están conformados por arcillas, arenas y gravas. Debido a la morfología plana de la zona, el Río Cauca es un río meándrico, el cual por sus dinámicas de erosión y depositación genera modificaciones en su cauce a lo largo del tiempo, generando una variación lateral y vertical en las facies y modelos deposicionales.

A partir de los sondeos realizados se pudo observar una variación de materiales en profundidad, basados en las dinámicas y patrones de depositación de un río meandrónico, las arcillas (Fotografía 1) se asocian principalmente con los depósitos de llanura de inundación mientras que las arenas (Fotografía 2) y gravas (Fotografía 3) se asocian más con los depósitos de canal y point-bar. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un esquema de las dinámicas de un río meándrico.

Fotografía 1

Muestras de arcilla obtenidas de los diferentes sondeos.



Fotografía 2

Muestras de arenas obtenidas de los diferentes sondeos.



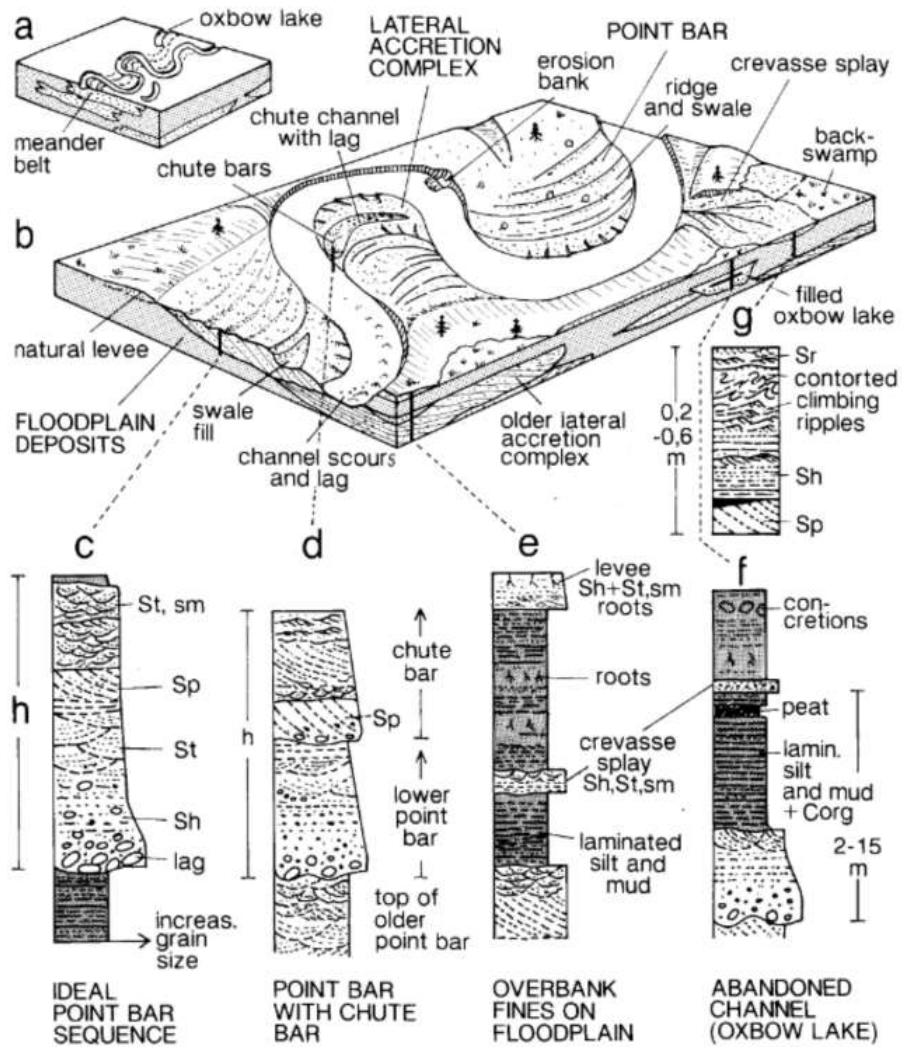
Fotografía 3

Muestras de gravas obtenidas de los diferentes sondeos.



Figura 31

Partes y asociación de facies de un río meándrico.



Fuente: (Andrés Felipe Salazar Ríos, 2018, p. 92)

5.2. Sector de Melgar

Según la plancha 264 – Espinal del Servicio Geológico Colombiano, la zona de trabajo está ubicada sobre depósitos de la unidad Conglomerados del Carmen de Apicalá; la memoria explicativa de la plancha 264 describe la sección estratigráfica de la unidad como una secuencia de niveles conglomeráticos, arenitas lodosas y lodolitas arenosas, con bioturbación y moteamiento prominente, y presentando una alternancia a manera de ciclos.

El contacto inferior de la unidad es fallado con la Formación seca que según De Porta (1965) está conformada por una sucesión lutítica, arcillolitas y arenitas líticas, y discordante sobre rocas sedimentarias del grupo Honda que a la altura del Carmen de Apicalá está compuesto por litoarenitas, lodolitas, arcillolitas y lentes de conglomerados que conforman el núcleo del sinclinal del Carmen de Apicalá. Finalmente, en la zona se presentan una serie de depósitos cuaternarios de gran extensión geográfica, principalmente abanicos, terrazas aluviales altas y bajas, coluviones y aluviones

5.3. Sector Bogotá.

Las unidades geológicas de este sector se encuentran representadas por una secuencia sedimentaria con edades que varían entre el paleozoico, Cretáceo, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario; según el Servicio Geológico Colombiano (2015) durante el Paleozoico se depositaron sedimentos areno-lodosos del Grupo Farallones seguido de una serie de transgresiones y regresiones marinas durante el Cretácico que dieron paso a la depositación de las Formaciones Ubalá, Santa Rosa, Lutitas de Macanal, Las Juntas, Fomeque, Une, Chipaque Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas.

Durante el Paleógeno se desarrollaron la Formación Cacho, la Formación Bogotá y la Formación Regadera en un ambiente fluvial, posteriormente en el Mioceno-Plioceno durante la mayor fase de deformación de la Cordillera Oriental se generaron las Formaciones Tilata y Marichuela, y finalmente, en el cuaternario se

depositaron las Formaciones Río Siecha, Sabana, Chia y depósitos lacustres. (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

Geología estructural

Las principales estructuras que afectan el área de estudio son: la falla de Bogotá la cual según Montoya & Reyes (2005) es una falla inversa con vergencia occidental que bordea los cerros orientales de la sabana, rocas de la Formación Labor-Tierna cabalgan sobre rocas de la Formación Bogotá (Usme) y luego sobre las formaciones Cacho y Guaduas; la falla de rumbo sinistral de San Cristóbal que desplaza el eje del Anticlinal de Bogotá y la Falla Bogotá. Estas dos fallas son las responsables directas del Amplio grado de fracturación y diaclasamiento de las rocas de la zona. También se encuentran pliegues como el Anticlinal de Bogotá, Sinclinal de Teusacá y Sinclinal de Usme.

5.3.1. Geología local del Plan de Manejo de Recuperación y Restauración Ambiental MERIDIAM

El área está conformada en su totalidad por arenitas, lutitas y arcillolitas dispuestas en una secuencia estratigráfica en la que se observa al techo estratos de arenas cuarzosas con biotita y moscovita de hasta 15 metros de espesor, tamaño de grano medio a grueso con matriz arcillosa, desarrollan estructura masiva y gradación normal **Fotografía 4**; en la parte media se encuentran estratos gruesos de arcillolitas abigarradas de colores gris, violeta, naranja y rojo (**Fotografía 5**) junto con estratos de aproximadamente 5 metros de espesor de arenitas de grano medio con desarrollo de estratificación cruzada y estratificación plana paralela; por ultimo a la base se observa una intercalación de arenitas con tamaño de grano fino-medio de entre 30 y 40 centímetros de espesor con estratos de lodolitas negras de 20 a 60 centímetros de espesor (Fotografía 6). Adicionalmente en los núcleos de perforación se observan principalmente estratos de arcillolitas abigarradas de colores morado, verde, gris, café y rojo, estratos de arcillas limo arenosas con oxidaciones de color amarillo, y arenitas de tamaño de grano medio compuestas principalmente por cuarzo, las arcillolitas se

encuentran ampliamente fracturadas y los estratos de arena presentan estructuras como laminación paralela y estratificación inclinada.

Fotografía 4
Estratos de arenitas masivas



Fotografía 5
Arcillolitas abigarradas.



Fotografía 6

Intercalación de lodolitas y arenitas



Dichas unidades litológicas pueden ser correlacionada con la secuencia de sedimentos terciarios compuesto por arcillolitas abigarradas con intercalaciones de arenitas y arenitas arcillosas, y por un conjunto de arenitas de grano grueso intercaladas con arcillolitas abigarradas descritas por Hubach (1931) como se citó en (Servicio Geológico Colombiano, 2015) y quien las definió como la Formación Bogotá.

Según (INGEOMINAS, 2005) la edad de la formación fue analizada por Van Der Hammen a partir de fauna en (Hubach,1957), y se considera de edad Paleoceno, Hubach (1957) le asigna una edad Paleoceno tardío y posiblemente Eoceno. Hoorn (1988) determina una edad Paleoceno Superior Eoceno Inferior.

A partir de información secundaria y observaciones en campo se sabe que la Formación Bogotá está siendo cubierta por rellenos antrópicos (**Fotografía 7**) producto de las actividades mineras, y depósitos coluviales conformados por cantos y gravas angulares a subangulares con matriz arcillo-arenosa (**Fotografía 8**).

Fotografía 7
Rellenos antrópicos



Fotografía 8
Depósitos de ladera.



Geología estructural local

El plano de estratificación de las rocas varía entre S16°W/32°NW Y S35°W/43NW; se presentan múltiples planos de diaclasas, entre los más importantes están: S64W/85NW, N80W/82NE, N53W/65NE, N48W/78NE, N10W/48NE; a partir de estrías de falla (Fotografía 9) se determinó la presencia de una falla inversa con componente en rumbo dextral, con orientación N70°E - N82°E y buzamiento entre 71° y 77° SE; también se observó fracturamiento a lo largo de todas las unidades litológicas siendo las arcillolitas y lutitas las que mayor densidad de fracturas presentaban en comparación con las arenitas.

Fotografía 9

Estrías de falla.



Como resultado del trabajo de cartografía geológica realizado en el proyecto del Plan de manejo de recuperación y restauración ambiental MERIDIAM se obtuvo el mapa del anexo 1.

Geomorfología Local

Se desarrollo una clasificación para los ambientes morfogenéticos denudativo, antrópico y estructural de acuerdo a los parámetros requeridos por el cliente y a la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas Geomorfológicos a escala 1:100.000 (IDEAM, 2013).

Ambiente Antrópico: Dentro de la zona de trabajo se observa claramente la intervención del hombre y la modificación del terreno a causa del mismo, se encontramos una zona urbanizada como se observa en la (Figura 32); también se pueden observar antiguos frentes de explotación de arcilla y arena que eran utilizados para la fabricación de ladrillos Fotografía 10 y zonas de acumulación de escombros o rellenos antrópicos (Fotografía 7).

Figura 32

Zona Urbanizada



Nota: a) Fotografía tomada en campo de Viviendas ubicadas en la parte alta de la zona. b) Imagen tomada del Mapa Híbrido de Mapas Bogotá.

Fotografía 10

Antiguo frente de explotación minero



Nota: Se sabe que es un antiguo frente de explotación por comunicación directa de un habitante de la zona.

Ambiente Denudacional: De acuerdo a las observaciones de campo se determinó que los procesos de movimientos en masa presentes en el área de estudio se generan por una combinación entre las condiciones naturales del terreno como la pendiente y composición litológica, y factores detonantes como el mal manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales y a las modificaciones que ha sufrido el terreno por intervención antrópica. Los principales procesos observados son reptación y movimientos en masa traslacionales y rotacionales.

A lo largo de todo el terreno se observa el fenómeno de reptación evidenciado principalmente en la pérdida de verticalidad de postes de energía (Fotografía 11), y la inclinación de los árboles (Fotografía 12).

Los deslizamientos traslacionales se dan por el movimiento de una masa a lo largo de una superficie de morfología plana asociada con planos de estratificación o fracturas (Figura 33). A lo largo de la zona se encontraron tres movimientos de este tipo (Fotografía 13) los cuales tienen su superficie de falla controlada por el plano de estratificación, con estratos de arenitas en la base y materiales arcillosos desplazándose. Se observa una actividad reciente asociada a las lluvias presentadas los días anteriores a la visita de campo.

Fotografía 11

Perdida de verticalidad de postes de energía.



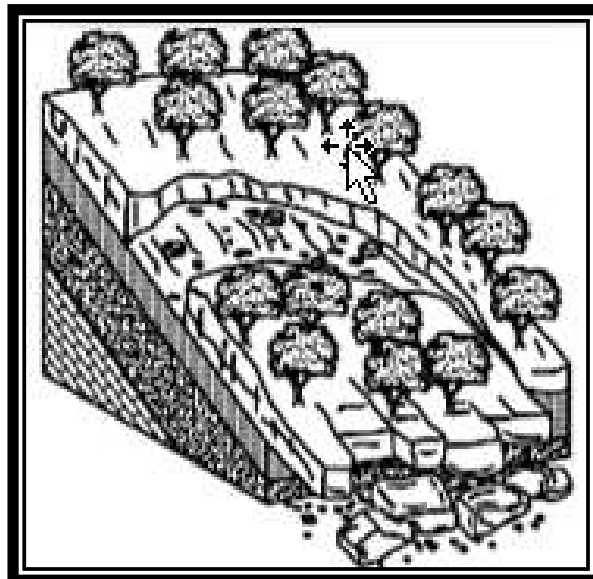
Fotografía 12

Inclinación de los árboles



Figura 33

Esquema movimiento en masa traslacional.



Fuente: (Soto, 2011)

Fotografía 13

Movimientos en masa traslacionales.

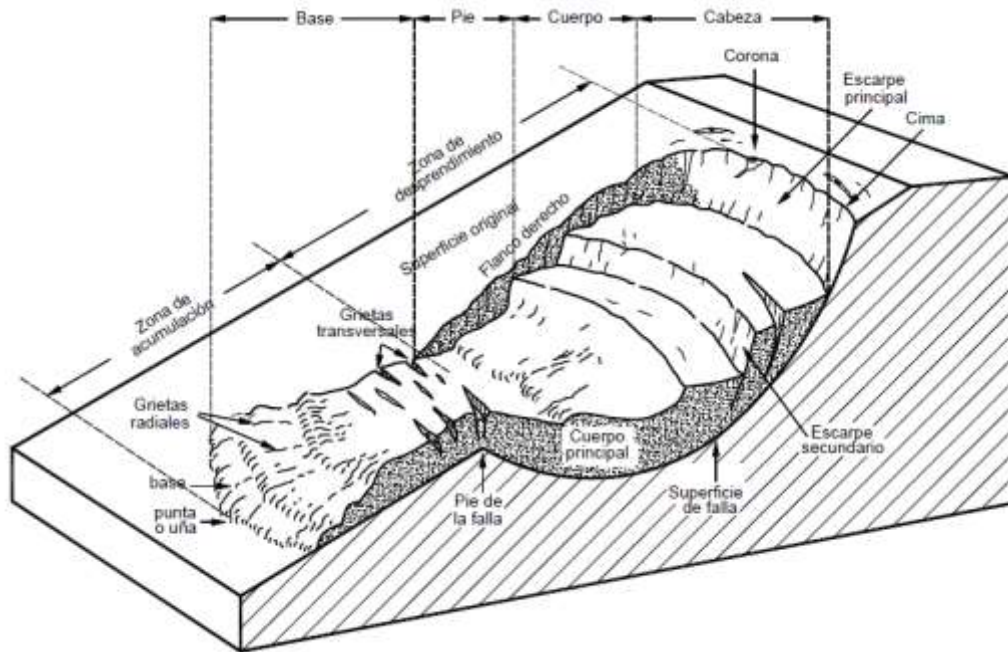


Nota: a y b) Movimiento en masa traslacional 1. c) Movimiento en masa traslacional 2. d) Movimiento en masa traslacional 3.

Los deslizamientos Rotacionales tienen una superficie de falla cóncava hacia arriba y ocurren principalmente en taludes formados por capas gruesas homogéneas de materiales granulares, macizos muy fracturados o rocas altamente meteorizadas, se presentan con un ligero hundimiento de la zona adyacente a la corona y un levantamiento en la pata. La Figura 34 es un esquema en el que se pueden observar las principales características de un deslizamiento rotacional.

Figura 34

Esquema movimiento en masa rotacional



Fuente: (Soto, 2011)

En la zona de estudio se identificaron diferentes movimientos de este tipo en los que se pudieron apreciar sus principales componentes, a continuación, se muestra la descripción de cada uno ellos junto con el registro fotográfico.

- **Movimiento en masa rotacional número uno:** Es uno de los movimientos en masa más grandes y más complejos de la zona, es un movimiento antiguo pero con actividad reciente, presenta una corona y un escarpe principal bien marcado, grietas en la corona e inclinación de los árboles en la corona en contra del movimiento, típico de los movimientos en masa rotacionales, también presenta caída de rocas debido a las familias de diaclasa que afectan la estabilidad de las rocas de la corona y del escarpe.(Fotografía 14).
- **Movimiento en masa rotacional número dos:** Su corona se encuentra a pocos metros de algunas viviendas, es un movimiento antiguo con actividad reciente.

El día 14 de noviembre de 2019, un día antes de la visita de campo, este movimiento tuvo un deslizamiento de masa a causa de las fuertes lluvias, comunicación directa de un habitante del sector. (Fotografía 15).

- **Movimientos en masa rotacional números tres y cuatro:** Son movimientos que se presentan sobre el trazado de la vía y en rellenos antrópicos, desarrollan corona y un escarpe de 40 cm en el movimiento en masa número tres (Fotografía 16) y de 20cm en el movimiento en masa número 4 (Fotografía 17).
- **Movimiento en masa rotacional número cinco:** Movimiento en masa reciente desarrollado sobre un material arcilloso. (Fotografía 18).
- **Movimiento en masa rotacional número seis:** Movimiento activo en el que se observa la corona, el escarpe principal, la zona de desplazamiento y el pie del movimiento. (Fotografía 19).

Como resultado de la identificación y caracterización de los procesos de movimiento en masa de la zona, se elaboró el mapa del Anexo 2.

Fotografía 14

Movimiento en masa rotacional numero 1



Nota: a) corona y escarpe principal. b) Caída de rocas a causa de las diaclasas. c) Grietas en la corona. d) Inclinación de árboles en sentido contrario al movimiento. e) Deslizamiento reciente. f) Imagen general del movimiento

Fotografía 15

Movimiento en masa rotacional numero 2



Nota: Movimiento en masa reciente, en la imagen se puede apreciar el escape dejado por el deslizamiento presentado el 14 de noviembre de 2019.

Fotografía 16

Movimiento en masa rotacional numero 3



Fotografía 17

Movimiento en masa rotacional numero 4



Fotografía 18

Movimiento en masa rotacional numero 5



Fotografía 19

Movimiento en masa rotacional numero 6



Nota: a) Corona del movimiento. b) Escarpe principal. c) Zona de desplazamiento. d) Pie del movimiento o zona de acumulación.

Estructuralmente se encontraron geformas como hogbacks (Fotografía 20) y escarpes de falla de alta pendiente (Fotografía 21).

Fotografía 20

Hogbacks



Fotografía 21

Escarpe de alta pendiente a lo largo de una línea de falla



6. Metodología.

La metodología general utilizada para el desarrollo de las actividades propuestas para cada uno de los proyectos en los que se participó durante el tiempo que duro la practica fue la siguiente:

- Se inicio el desarrollo del proyecto con una etapa de planeación en la que se determinaron las labores de campo, laboratorio y oficina de acuerdo a los requerimientos del cliente.
- Posteriormente se iniciaron las labores de exploración en campo en donde se emplearon métodos directos (spt y sondeos mecánicos) e indirectos (sísmica, sondeos eléctricos verticales, tomografías).
- Las muestras recolectadas fueron debidamente almacenadas, rotuladas y enviadas al laboratorio para realizar los respectivos ensayos.
- Los datos obtenidos en campo fueron llevados a la oficina para su debido procesamiento y análisis.

A continuación, se describirá a detalle cada una de las actividades mencionadas en los pasos anteriores

6.1. Etapa de Planeación

Para dar inicio a esta etapa se tuvo como base los objetivos y requerimientos de cada proyecto, los pasos seguidos en general para esta etapa fueron los siguientes:

- Identificación del área de trabajo, ubicación geográfica, relieve y aspectos geológicos generales, entre otros, haciendo uso de herramientas como Google Earth Pro e información secundaria.
- Determinación de los ensayos a realizar y ubicación de los mismos dentro del área de trabajo, generando una tabla de coordenadas.
- Establecer los ensayos de laboratorio requeridos para hacer la toma de muestras en campo.
- Planear la movilización del personal y equipos a campo.

6.2. Etapa de Exploración

En esta etapa se da inicio a las labores de campo establecidas anteriormente, como primer paso se realiza el reconocimiento de la zona de trabajo y se determina el centro de operaciones, el desarrollo cronológico general de actividades fue el siguiente:

Ensayo de Penetración Estándar y Sondeos Mecánicos: Se utilizó una máquina de perforación mecánica tipo XY-1 la cual permite realizar perforaciones con percusión y rotación hasta profundidades de 50m, sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 9.

En primer lugar, se realiza el ensayo de penetración estándar cuyo equipo está incorporado a la máquina de perforación, posteriormente cuando se dé el rechazo, se empieza con el sondeo mecánico.

Tabla 9

Ficha técnica de la maquina usada para sondeos mecánicos

CARACTERISTICA	INFORMACIÓN	
CAPACIDAD DE PERFORACION (metros)	NQ	60
CAPACIDAD DE PERFORACION (metros)	BQ	80
CAPACIDAD DE PERFORACION (metros)	AW	100
VELOCIDAD DE ROTACION (R/Min)	ADELANTE 90;191;360;600	
MÁX TORQUE (n/m)	1000	
RANGO DE PERFORACIÓN (Angulo)	0-90	
FUERZA DE TRACCIÓN MÁXIMA DEL HUSILLO (KN)	27	
AVANCE DEL HUSILLO (MM)	450	
CAPACIDAD MÁXIMA CON GUAYA SIMPLE (Kn)	20	
EJE INTERIOR (mm)	74	
BOMBA DE ACEITE HIDRÁULICO	VICKERS 5GPM-2500 PSI	
POTENCIA	DEUTZ F2L912,28HP 2300 RPM	
PESO DEL EQUIPO	950 KG	
DIMENSIONES (L*W*H)(mm)	2300*900*1205	

Tanto los ensayos de SPT como las perforaciones se ejecutaron garantizando el mayor porcentaje de recuperación; se realizó la descripción de las muestras bajo los parámetros establecidos por la empresa como se observa en la

Fotografía 22, posteriormente se registró la información en un formato que se archivó física y fotográficamente. Finalmente, las muestras fueron debidamente empacadas para su transporte y almacenamiento en la bodega.

Fotografía 22

Descripción de muestras en campo



Sísmica de Refracción: Para el desarrollo de la prueba se requieren los siguientes materiales:

- Sismógrafo Geometrics GEODE de 24 canales.
- 1 cable con longitud total de 125m y separación máxima de 5m
- 24 geófonos verticales.
- 1 Switch de impacto "Triger".
- 1 cable de 120m para extensión del switch de impacto.

- 1 computador Portátil.
- 1 batería de 12V.
- 1 martillo de impacto de 8 Kg.
- 1 GPS Garmin eTrex 20.

El montaje de la línea se realizó bajo el siguiente protocolo:

- Localización de los puntos inicial y final de la línea. Los puntos son geo-referenciados con GPS.
- Se marcan en terreno los sitios donde se instalan los diferentes geófonos, verificando el espaciamiento y las condiciones del terreno.
- Se instalan 24 geófonos verticales a lo largo de la línea en cada uno de los puntos identificados previamente.
- Se extiende el cable principal que transmite los datos de los sensores y se conectan los geófonos; Se extiende el cable del trigger (Fotografía 23).
- En uno de los extremos de la línea se conecta el sismógrafo, y la máquina de adquisición de datos. Quedando listo el arreglo para el inicio del ensayo (Fotografía 24).
- Con un martillo de impacto se golpea sobre una platina entre tres y cinco veces para sumar las señales con el fin reducir el ruido y potencializar la señal generada por la fuente (Fotografía 25).
- Este procedimiento se realiza a distancias de $0L$, $1/4L$, $1/2L$, $3/4L$ y $1.0L$, siendo L la longitud total de la línea.

Fotografía 23

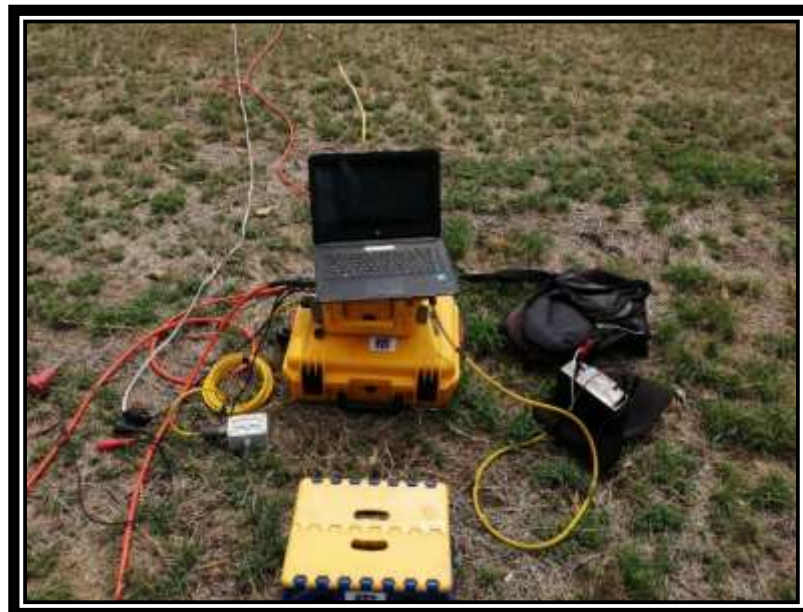
Cable de datos de los sensores y cable de señal del trigger extendidos



Nota: Cable de datos de los sensores y cable de señal del trigger extendidos. Proyecto Pajarito.

Fotografía 24

Montaje sismica de refracción



Nota: Montaje listo para el inicio del ensayo. Proyecto Melgar.

Fotografía 25

Martillo de impacto



Nota: Uso del martillo para el impacto sobre la plantina.

Proyecto Melgar.

Sísmica de Reflexión: Para la realización de la línea se utilizan los siguientes equipos:

- 2 sismógrafos Geometrics GEODE de 24 canales cada uno.
- 2 cable con longitud total de 125m y separación máxima de 5m.
- 1 cable de 120m para extensión del switch de impacto.
- 48 geófonos verticales de 40 Hz.
- 1 computador Portátil.
- 2 baterías de 12V – 9ª y 1 Bateria de 12V -650A
- 1 Blaster para detonación y activación del sismógrafo
- 1 GPS Garmin eTrex 20.
- Barrenador manual para instalación de cargas explosivas.
- Martillo de 14 lbs para hincar el barreno en el terreno.
- 45 cargas explosivas.

- Cable de extensión para detonación.

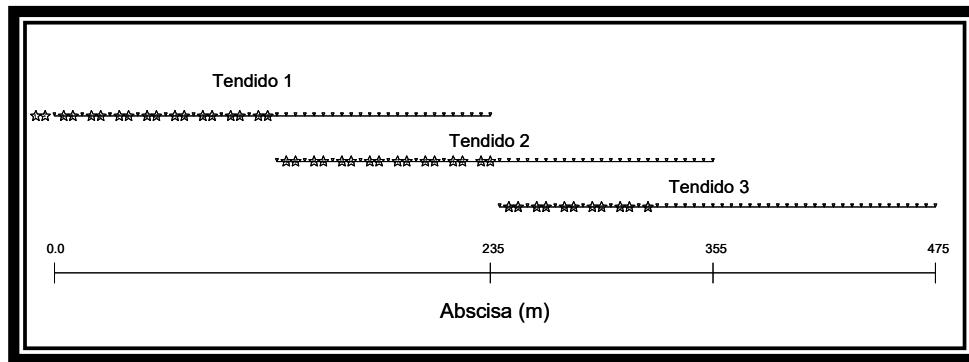
El montaje de la línea de reflexión se realizó siguiendo el mismo protocolo utilizado para el montaje de la línea de refracción sísmica.

Se utilizaron 48 geófonos espaciados a 5.0 m de distancia con el objetivo de obtener datos más detallados. Dado que la medición debía cubrir una longitud mínima en planta de 400m lineales, se realizó la medición mediante técnica “Roll Along” en la cual se va corriendo el tendido en la medida que avanzan las detonaciones. Para la medición se realizaron tres tendidos consecutivos tal y como se muestra en la Figura 35

Las cargas fueron detonadas por parejas separadas a 5.0 m y registradas por los 48 canales activos. Una vez detonada la pareja de disparos se desplaza la detonación 10m y se vuelve a detonar otra pareja de explosivos. En la Figura 35 se presentan las cargas detonadas como estrellas en cada uno de los tendidos.

Figura 35

Esquema de montaje de la medición



Como excitación sísmica se utilizó una carga de 150 gr de clorato, comprimido en un tubo de PVC de 1” de diámetro (**Fotografía 26 a**) y detonado con microfilamento de aluminio. La carga se instaló y detono de la siguiente manera:

- Se realizó un barreno de 1.10m de profundidad y de 1-1/2” de diámetro en cada uno de los lugares propuestos, con el fin de poder colocar la carga hasta la

profundidad máxima de excavación. La perforación del barreno se realizó de forma manual como se observa en la Fotografía 26 b.

- Después se colocó la carga hasta el fondo del barreno y se llenó el hueco con material del terreno excavado. (Fotografía 26 c)
- Se realizó la compactación del material con el fin de que la carga quede completamente confinada dentro del barreno. (Fotografía 26 d)
- En cada uno de los sitios de detonación se deja una extensión de cable con las puntas debidamente expuestas para posteriormente conectar la extensión del blaster que se conecta a un cable y este posteriormente a una batería de 12V y 650 A como se observa en la Fotografía 26 e.
- Finalmente se realizó la detonación de las cargas iniciando por la abscisa -10 y avanzando sucesivamente hasta la abscisa 320 donde se realizó el ultimo disparo

Fotografía 26

Ensayo Sísmica de Reflexión



Nota: Instalación y detonación de cargas. a) carga de clorato comprimida en tubo PVC. b) perforación del barreno de forma manual. c) ubicación de la carga y llenado del hueco. d) compactación del material. e) detonación de las cargas.

Down-Hole: Para la realización del ensayo se utilizan los siguientes equipos:

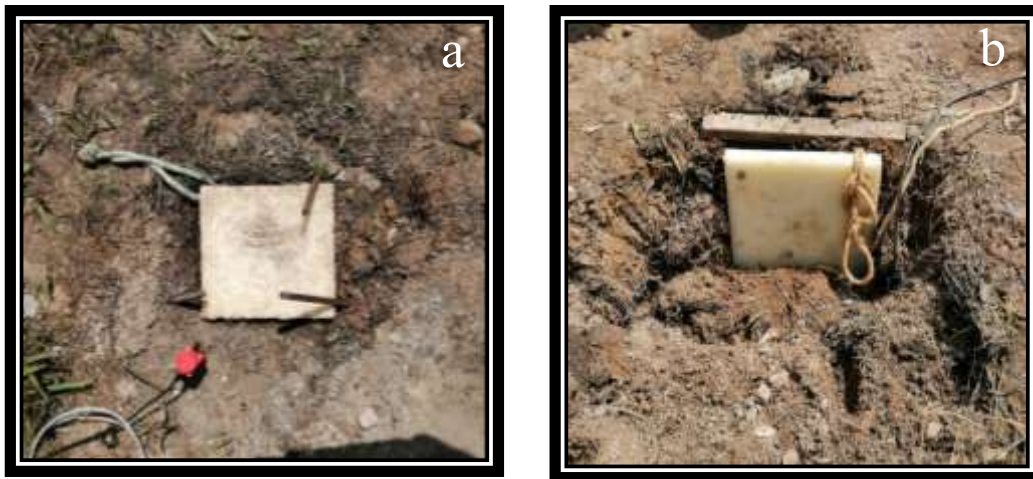
- Sismógrafo Geometrics GEODE de 24 canales.
- 1 computador portátil para adquisición y almacenamiento de datos.
- 1 batería de 12V.
- 1 martillo de impacto de 8 Kg.
- 1 cable de 120m para extensión del switch de impacto.
- 1 Switch de impacto "Triger".
- Sonda de Downhole con geófono de 3 componentes (X, Y, Z).
- 1 GPS Garmin eTrex 20.

La metodología de campo utilizada para el desarrollo del ensayo down hole es la siguiente:

- El cliente previamente realizó una perforación de 12m a 15m de profundidad, instalando un tubo de PVC de 2.5" de diámetro interno en toda la longitud.
- Se hace una trinchera localizada a 90cm de la perforación para instalar una placa de nylon, mediante la cual se generan las excitaciones sísmicas dando golpes verticales (Fotografía 27 a) y horizontales (Fotografía 27 b) en el extremo para generar ondas de compresión y de corte.
- Se introduce una sonda con un sensor triaxial por el tubo de la perforación (Fotografía 28), generando registros metro a metro de los tiempos de llegada de las ondas generadas en superficie.
- La sonda desprende tres pares de pinzas, las cuales son conectadas al cable principal que transmite los datos de los sensores al ordenador. (Fotografía 29)
- Los registros de los golpes son almacenados metro a metro en un ordenador de campo para identificar posteriormente los tiempos de llegada de las ondas de corte y de compresión.
- Finalmente se construye un perfil con la variación de la velocidad y se calculan los parámetros elásticos con base en la teoría de la elasticidad en medios sólidos.

Fotografía 27

Placa de Nylon



Nota: a) Placa de nylon horizontal para generar ondas de compresión. b) Placa de nylon vertical para generar ondas de corte.

Fotografía 28

Introducción de la sonda por la perforación



Fotografía 29

Cables de datos del sensor triaxial.



La Fotografía 30 muestra uno de los montajes realizados para el ensayo de down hole realizado en el municipio de San Eduardo en el departamento de Boyacá.

Fotografía 30

Montaje del arreglo y equipos utilizados.



Tomografía: Los equipos utilizados en el desarrollo de la prueba fueron:

- Equipo de adquisición SUBREME DC 600 con capacidad para conmutar 48 electrodos, sus especificaciones se encuentran en la Tabla 10
- 2 cables con longitud total de 470 m cada uno y separación máxima de 10 m entre electrodos.
- 1 computador Portátil.
- 48 electrodos en acero inoxidable
- 1 batería de 12V.
- 1 GPS Garmin eTrex 20.

Tabla 10

Ficha técnica de la maquina usada para ensayos geoelectricos.



PARÁMETRO	DATO
VOLTAJE DE SALIDA NOMINAL (DC)	145V
POTENCIA DE SALIDA	600 Watt,3,5 Amp.DC
ALARMA DE VOLTAJE DE BATERIA BAJO	10.5 V.+/-0.5 V.
APAGADO DE VOLTAJE DE BATERIA BAJO	10V.+/-0.5 V.
PROTECCION TERMICA	65°C +/-5°C
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	0°C a+40°C
DIMENSIONES UNIDAD CENTRAL	46.2 X 34.0 X 17.0 cm
PESO UNIDAD CENTRAL	6.5 Kg
FUENTE DE ALIMENTACION	Bateria 12V DC
TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO	-10 °C a+ 50 °C
LECTURA DE DATOS	2 Display LCD 7 Segmentos (valores de corriente y voltaje medidos).
CONEXIONES DE SALIDA A ELECTRODOS	4 (A, B, M, N) desde panel frontal y 24 desde cable multielectrodo.

Para el desarrollo de la medición se utilizaron arreglos de 48 electrodos de acuerdo a la longitud de la línea y nivel de detalle requerido, se realizó la línea (Fotografía 31) de acuerdo a una configuración tipo Wenner (Figura 15) en la que la distancia entre los electrodos para cada nivel se mantiene constante en cada medición, el proceso de montaje y toma de datos se realizó de la siguiente manera:

- Localización de los puntos inicial y final de la línea. Los puntos son georeferenciados con GPS.
- Se marcan en el terreno los sitios donde se instalan los diferentes electrodos, verificando el espaciamiento y las condiciones del terreno.
- Se introducen los electrodos de manera vertical a lo largo de la línea en cada uno de los puntos identificados previamente.
- Se extienden dos cables con conexión para 24 electrodos cada uno, los cuales transmiten la señal de corriente en el electrodo A-B y miden la caída de potencial en el electrodo M-N.
- Los extremos de los cables se conectan a la unidad central que es la encargada de generar la corriente y medir el potencial.
- Se completa el montaje, se encienden los equipos y se realizan pruebas antes de empezar con el estudio.
- Como último paso se genera la inyección de corriente al terreno por medio de los electrodos A y B y se registra el voltaje en los electrodos M-N, estos datos son registrados en un archivo creado previamente, este proceso se repite hasta alcanzar la totalidad de los datos requeridos.

Fotografía 31

Montaje línea para Tomografía



Nota: a) Introducción de electrodos en el terreno. b) Extensión de cables. c) Conexión de los electrodos a la unidad central y a los electrodos. d) Culminación del montaje e inicio del ensayo.

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV): Se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales en diferentes proyectos a lo largo del desarrollo de la práctica, estos se desarrollaban mediante arreglos lineales tipo Schlumberger (Figura 14).

El montaje de la línea se realizó de la siguiente manera

- Localización de los puntos inicial y final de la línea. Los puntos son georeferenciados con GPS.
- Se marcan en el terreno los sitios donde se instalan los diferentes electrodos, verificando el espaciamiento y las condiciones del terreno (Fotografía 22).
- Se introducen los electrodos de manera vertical a lo largo de la línea en cada uno de los puntos identificados previamente.

- Se extienden un cable de corriente y uno de voltaje a cada lado del arreglo (Fotografía 33), los cuales transmiten la señal de corriente en el electrodo A-B y miden la caída de potencial en el electrodo M-N. Las mediciones se realizaron hasta alcanzar aperturas máximas de los electrodos MN de 100m y así garantizar profundidades de investigación mínimas de 20m.
- Se completa el montaje, se encienden los equipos y se realizan pruebas antes de empezar con el estudio.
- Como último paso se genera la inyección de corriente al terreno por medio de los electrodos A y B y se registra el voltaje en los electrodos M-N, los datos arrojados son registrados en una hoja de Excel como la de la Tabla 4 , este proceso se repite hasta alcanzar la totalidad de los datos requeridos.
- Una vez terminada la toma de datos, se generaba la curva de resistividades aparentes para su posterior análisis.
 - Posteriormente los datos eran llevados a la oficina donde se realiza el proceso de interpretación a partir de un modelo de inversión para obtener los valores de resistividad real. los cuales son reportados en cada uno de los sondeos eléctricos como modelos unidimensionales de capas.

Fotografía 32



Nota: Localización de la línea e introducción de los electrodos en el terreno.

Fotografía 33



Nota: Extensión de los cables de inyección de corriente (rosados) y de voltaje (amarillos), y culminación del montaje.

6.3. Laboratorio

Se programaron una serie de ensayos para la caracterización geotécnica de la zona y para los análisis geotécnicos, los cuales se listan a continuación:

Humedad: Antes de iniciar el ensayo se deben tener en cuenta las consideraciones de la norma ASTM D 2216 e INV E-122-07 respecto a las cantidades mínimas de material a utilizar en relación al tamaño máximo de las partículas.

La metodología utilizada para el desarrollo del ensayo de humedad es la siguiente:

- Se determino y registro la masa de un recipiente limpio y seco
- Se seleccionaron especímenes de ensayo representativos de acuerdo a la Tabla 11

- Se colocó el espécimen de ensayo húmedo en el recipiente. (Fotografía 34) y se determinó el peso del recipiente y material húmedo. Se debe rotular cada muestra.
- Se colocó el recipiente con material húmedo en el horno (Fotografía 35), secando el material hasta alcanzar una masa constante. El tiempo requerido para obtener una masa constante varía dependiendo del tipo de material, tamaño de espécimen, tipo de horno y capacidad del mismo.
- Se dejó enfriar el recipiente y se registró el peso del recipiente con el material seco. (Fotografía 36)
- Se calculó el contenido de humedad de la muestra.

Tabla 11

Tamaños mínimos de la muestra de acuerdo a los requerimientos establecidos según el tipo de norma y características del suelo.

Máximo tamaño de partículas (pasa el 100 %)	Tamaño de malla estándar	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados a +/- 0,1 %	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados a +/- 1%
2 mm o menos	2.00 mm (N° 10)	20 g	20 g
4.75 mm	4.76 mm (N° 4)	100g	20 g
9.5 mm	9.525 mm (3/8")	500g	50 gr
19.0 mm	19.050 mm (3/4")	2.5 kg	250 gr
37.5 mm	38.1 mm (1 1/2")	10 kg	1 kg
75.0 mm	76.200 mm (3")	50 kg	5 kg

Fuente:(ASTM International, 1998)

Fotografía 34

Recipientes con muestras húmedas



Fotografía 35

Muestras en proceso de secado



Fotografía 36

Enfriamiento de muestras



Granulometría: Para el desarrollo del ensayo de granulometría se siguieron los siguientes pasos:

- Se tomo una muestra representativa, tal y como se observa en la Fotografía 37
- La muestra fue secada a una temperatura de 110 ± 5 °C en el horno hasta presentar una masa constante (Fotografía 38).
- Se realizó el ensamblaje de los diferentes tamices, cuidando que fueran ubicados de menor a mayor diámetro en dirección ascendente.
- La muestra fue colocada en el tamiz de mayor diámetro, el cual variaba de acuerdo al tamaño máximo de partículas en las diferentes muestras.
- El material fue depositado de manera progresiva para evitar la acumulación del mismo en alguno de los tamices.
- La muestra fue puesta en el vibrador mecánico por un espacio de tiempo de 10 a 15 minutos.
- Finalmente las porciones de material retenidas en cada tamiz (Fotografía 39) fueron retiradas teniendo cuidado de dejar limpias las mallas mediante el uso de una brocha evitando la pérdida de material.
- Cada porción de material fue pesado y los datos fueron registrados en una tabla de resultados. Al hacer la sumatoria total de los datos y al ser comparados con el peso inicial de la muestra, el porcentaje de error debía superar el 2%.

- Finalmente se entregaron los datos obtenidos al ingeniero encargado, para que este realizara la clasificación del suelo.

Fotografía 37

Tamaño de la muestra



Fotografía 38

Secado de la muestra



Fotografía 39

Material retenido en cada tamiz



Compresión En Roca: Antes de desarrollar el ensayo, se realizó una descripción general de la roca en cuanto a su litología y estructuras. El procedimiento desarrollado fue el siguiente:

- Se realizó la medición de las dimensiones de la muestra para validar si satisface las condiciones del ensayo.
- Se ubicó el testigo de tal forma que el pistón de la máquina quede paralelo a las caras transversales de la muestra.
- Se da inicio a la prueba mediante la impresión y aumento paulatino de la presión en la prensa hidráulica.
- Una vez falle el testigo, este se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura. Se toma el dato de la presión a la cual se generó el fallamiento.
- Se entregaron los datos obtenidos al ingeniero encargado.

Consolidación: El procedimiento llevado a cabo para la realización de este ensayo es el siguiente:

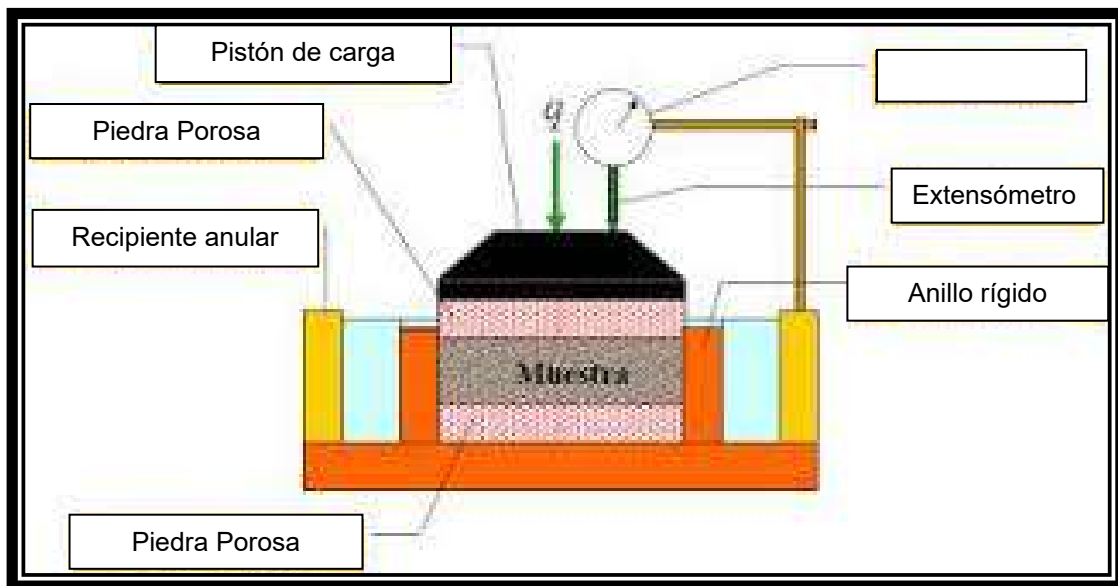
- Se coloca en el interior de la base del molde del consolidómetro la piedra porosa inferior y sobre ésta un papel de filtro
- Se introduce el anillo que contiene la muestra de suelo a ensayar, colocándose sobre la muestra papel de filtro y la piedra porosa superior.
- Después de armado, el consolidómetro se ubica sobre la plataforma del mecanismo de transmisión de cargas, ubicando el cabezal de carga sobre la piedra porosa superior, y se llenan de agua los tubos laterales que comunican con la piedra porosa inferior, comenzando la saturación de la muestra. El esquema del montaje descrito hasta el momento se puede observar en la Figura 36
- Cuando está preparado para iniciar el ensayo, el extensómetro que medirá las deformaciones verticales debe ser puesto en cero, y la palanca de aplicación de carga debe estar en posición horizontal.
- Se aplica una carga en el sistema de tal manera de obtener una presión de 0,10 o 0,25 Kg/cm²(10 o 25 KPa) en la muestra de suelo y se comienza a tomar lecturas de tiempo y deformaciones verticales, para conocer la deformación correspondiente a distintos tiempos. Es útil utilizar la siguiente secuencia: 8 seg, 15 seg, 30 seg, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15min, 30 min, 1 hs, 2 hs, 4 hs, 8hs, 16 hs, 24 hs, etc. Cabe recordar que la barra de suspensión frontal tiene una multiplicación mecánica de 1 a 40, mientras que la barra de suspensión posterior tiene una relación de 1 a 10. Las mediciones se realizan hasta que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero, o sea cuando se haya sobrepasado la consolidación primaria y se encuentra la consolidación secundaria.
- Luego de obtenida la lectura final de un escalón, se prosigue el ensayo aplicando cargas, registrándose lecturas de tiempo y de deformaciones verticales como en el punto anterior. Se sigue aplicando incrementos de carga hasta que en la gráfica de compresibilidad esté en el tramo recto o virgen.

Luego se podrá descargar en dos o tres decrementos de carga hasta la presión inicial.

- Luego de retirada toda la carga, se deja que la muestra expanda hasta que no se registre expansión en el extensómetro por un período de 24 hs.
- Al terminar la prueba, se quita el extensómetro y se desarma el consolidómetro. Se seca el agua del anillo de la consolidación y de la superficie de la muestra, para registrar el peso del conjunto. Luego de secado en horno se conoce el peso seco de la muestra (W_d), con lo que se puede calcular peso específico seco final (γ_d).
- Finalmente, el consolidómetro arroja una tabla de deformación vs $\log(t)$, de la que se observan los tramos de consolidación inicial, primaria y secundaria (Figura 37) y de la que se puede extraer el coeficiente de consolidación por medio del uso de diferentes métodos como el de Casagrande o el de Taylor.

Figura 36

Montaje de la muestra



Fuente: (Poblete 2006).

- Una vez colocada la muestra en el anillo del consolidómetro, se pesa el conjunto, y como el peso del anillo es conocido, se puede determinar el peso húmedo de la muestra (W_h). Calculando previamente la humedad de la

muestra, se puede obtener el peso seco (W_d) y con ello la altura de sólidos (h_s) y el peso específico seco inicial (γ_d), utilizando las siguientes expresiones:

$$h_s = \frac{W_d}{A * G_s * Y_w}$$

$$Y_d = \frac{W_d}{V}$$

Donde:

W_d = Peso del suelo en seco en el anillo

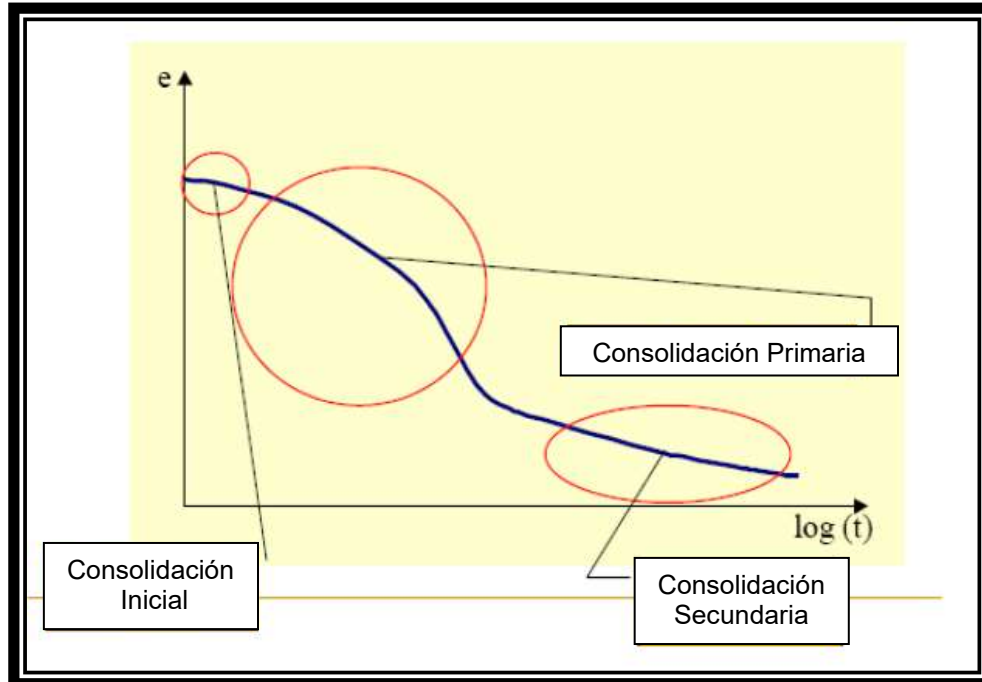
G_s = Peso específico relativo de los sólidos

γ_w = Peso específico del agua

V = Volumen del anillo

Figura 37

Esquema tipo de los segmentos que componen la curva de consolidación.



Fuente: (Poblete 2006).

Limite Liquido

El procedimiento utilizado para la realización de este ensayo, es el contemplado en la norma INV E 125-07 y aplicado de la siguiente manera:

- Se toma una muestra que pese aproximadamente 100 g. de una porción de material que pase el tamiz de 0.425 mm (No.40), obtenido de acuerdo con el método descrito en las normas INV E – 106 e INV E – 107.
- Se coloca la muestra de suelo en la vasija de evaporación y se mezcla con agua destilada, agitándola, amasándola y tajándola con una espátula en forma alternada y repetida, se realizan adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml hasta formar una pasta uniforme de consistencia dura.
- se coloca una cantidad adecuada de esta mezcla en la cazuela y se comprime y extiende con la espátula para nivelarla y a la vez, dejarla con una profundidad de 10 mm en el punto de su máximo espesor.
- Se divide el suelo en la cazuela de bronce con una firme pasada del ranurador a lo largo del diámetro y a través de la línea central de la masa del suelo, de modo que se forme una ranura limpia.
- Se levanta y golpea la cazuela girando la manija, a una velocidad de dos (2) revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de cerca de 13mm (0.5"). Se anota el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.
- Se repite la operación anterior agregando agua al suelo para ponerlo en un estado de mayor fluidez, el objeto de este procedimiento es obtener una muestra de tal consistencia que el número de golpes requeridos para cerrar la ranura sea de 25.
- Una vez lograda la consistencia deseada, se saca una porción de suelo y se coloca en un recipiente adecuado. Se pesa y se anota el valor. Se coloca el suelo con el recipiente dentro del horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar tan pronto como se haya enfriado antes de que pueda haber absorbido humedad higroscópica. Se anota esta masa, así como la pérdida de masa debida al secamiento y la masa del agua.

Limite Plástico

Para el desarrollo de este ensayo se tuvo en cuenta el procedimiento descrito por la norma I.N.V. E – 126 – 07. Se puede hacer uso de una porción del material que haya quedado del ensayo de limite líquido, La muestra debe tomarse en una etapa del proceso de amasado en que se pueda formar fácilmente con ella una esfera, sin que se pegue demasiado a los dedos al aplastarla, los pasos a seguir son los siguientes:

- Tomar una porción de suelo de 1,5 a 2 gramos y amasarla sobre el vidrio con la palma de la mano con solo la presión necesaria para formar un rollo de diámetro uniforme de 3mm en toda su longitud.
- Cuando el diámetro del rollo llegue a 3 mm, se divide en seis u ocho trozos. Se juntan los trozos y se aprietan entre los pulgares y dedos de ambas manos formando una masa uniforme de forma elipsoidal y se enrolla de nuevo.
- Se repite este procedimiento, partiendo, juntando, amasando y enrollando hasta que el rollo de 3 mm de diámetro se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no pueda ser rotado para formar el rollo.
- Se unen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente previamente pesado. Se tapa el recipiente inmediatamente.
- Se determina el contenido de humedad del suelo en los recipientes de acuerdo con la norma INV E – 122 y se anotan los resultados.
- Se realiza el ensayo entre 2 y 3 veces y se promedian los resultados; las diferentes pruebas no deberán exceder el 2% de diferencia.
- Se calcula el Límite Plástico, expresado como el contenido de agua en porcentaje de la masa de suelo seca al horno, de la siguiente manera

$$L.P = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de suelo seco al horno}} * 100$$

- Se registra el Limite Plástico, aproximado al número entero más cercano.

Índice de Plasticidad

Es la diferencia entre los límites líquido y plástico, es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico: $IP = LL - LP$

6.4. Clasificación Geomecánica de Macizos

La caracterización geomecánica de macizos fue utilizada para el proyecto realizado en la vía que conduce del municipio de La Calera a Bogotá. Para el desarrollo de este trabajo se realizó la siguiente metodología:

- Se identificaron los puntos de mayor interés para el proyecto haciendo uso del programa Google Earth Pro, generando una tabla de coordenadas que fueron posteriormente ingresadas a un GPS.
- Se elaboro un formato de caracterización geomecánica con las características requeridas por la empresa, basado en el sistema de clasificación mecánica de BARTON 1974. Anexo 1
- Se realizo el desplazamiento a la zona de trabajo, se hizo una contextualización geológica local, identificando principalmente los tipos de rocas presentes.
- Posteriormente se tomaron los datos estipulados en la tabla, tales como: rumbo, buzamiento y dirección de buzamiento de planos de estratificación, fallas, diaclasas y fracturas, además de otras características como la humedad, continuidad de los planos, rugosidad, abertura y rellenos, entre otros.
- Se genero un registro fotográfico de los datos más relevantes de cada estación.
- Como paso final se entregó la información recolectada en campo para su debido procesamiento por parte de la empresa contratante.

6.5. Fallas Geotécnicas

Durante el desarrollo del proyecto del Plan de manejo de recuperación y restauración ambiental MERIDIAM llevado a cabo en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá fue necesario realizar el análisis mecánico de algunos taludes con el objetivo de determinar si eran o no propensos a algún tipo de falla geotécnica. Para el desarrollo de esta actividad se realizó la siguiente metodología:

- Identificación de los puntos críticos haciendo uso del programa Google Earth Pro.
- Se dio inicio a la labor de campo tomando datos de orientación y pendiente del talud; rumbo, buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades y toma de muestras para la determinación del ángulo de fricción.
- Estando en campo se hizo la identificación de algunos taludes que no habían sido contemplados inicialmente, a los cuales también se les realizó la toma de datos.
- Las muestras tomadas en campo fueron enviadas al laboratorio para la determinación del ángulo de fricción.
- Se realiza el procesamiento de los datos a partir del uso del programa Dips.
- Una vez graficados los planos dentro del estereograma, se realizó el análisis de cada uno de los taludes.

7. Resultados.

Para la presentación de los resultados se tomará la misma secuencia establecida durante el marco teórico y la metodología independientemente del proyecto al cual pertenezca la información.

7.1. Spt y Sondeos Mecánicos.

Una vez tomados los datos en campo, se llevaron a la oficina para ser digitalizados en un formato como el de la Tabla 12 el cual se entregó al cliente como producto final de los ensayos.

El formato contiene un membrete con el nombre del proyecto, fecha, coordenadas, altura y número del sondeo, además de datos propios del ensayo tales como: profundidad, tipo de muestra, descripción, % de recobro, RQD y SPT. También se entregó un registro fotográfico metro a metro de la muestra y descripción de la misma en campo.

Tabla 12

Formato SPT y Sondeos Mecánicos.

REGISTRO DE PERFORACIÓN															
		Proyecto: Celcia-Buga				fecha: 02/03/2020									
		Localización: Este: 76°18'54.42" Norte: 3°55'48.4"				03/03/2020									
Profundidad (m)	Tipo Muestra	DESCRIPCIÓN	Muestra	Nivel Freático	% Recobro	RQD	SPT	SPT N medido en campo							
								10	20	30	40	50	Rechazo		
0,5	SPT	Arcilla gris oscura de humedad media y plasticidad baja	1		80		8	◆							
1,0	SPT	Arcilla gris oscura de humedad media y plasticidad baja	2		90		9	◆							
1,5	SH	Arcilla gris de humedad media y consistencia baja	3												
2,0	SPT	Arcilla gris claro de humedad media, plasticidad baja y consistencia baja.	4		84		9	◆							
2,5	SPT	Arcilla limo-arenosa color café de humedad alta y consistencia baja.	5		88		8	◆							
3,0	SPT	Cambio de limo arenoso a arena limosa de grano fino de color gris, humedad alta y consistencia baja.	6		100		4	◆							
3,5	SPT	Arena limosa color gris y naranja de grano fino, humedad alta y consistencia baja.	7		72		8								

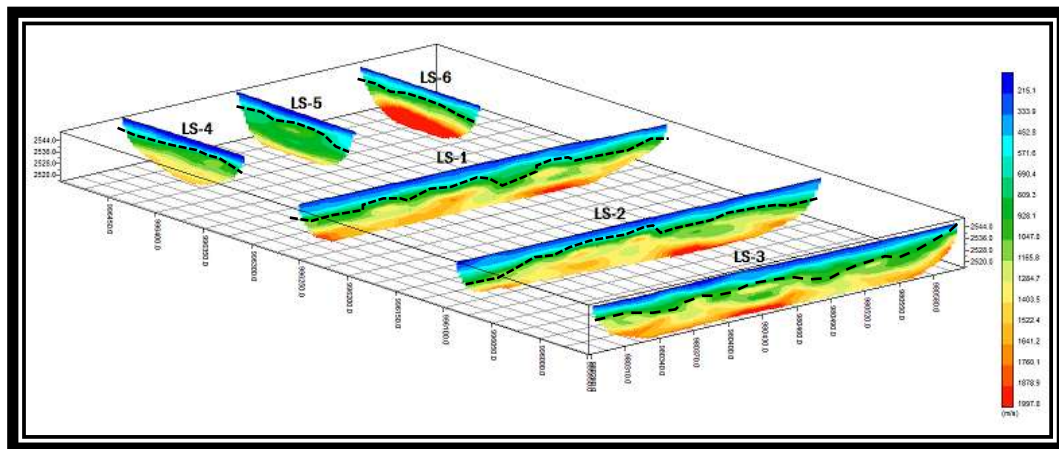
7.2. Refracción Sísmica

La interpretación de los datos se realiza haciendo uso de la técnica Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) para la cual se utiliza el software SURFACE PLUS V8.3 de la firma Geogiga Technology Corporation. Este paquete permite hacer varios tipos de transformaciones para identificar la curva de dispersión, e invertir el modo fundamental y los modos superiores mediante técnicas avanzadas de optimización.

Como resultado del procesamiento de los datos por parte del especialista, se generó el diagrama tridimensional de la Figura 38, en el que se presentan los perfiles de refracción con los valores de velocidad de onda de compresión, y en el que se puede observar la presencia de dos capas notablemente diferenciadas, la primera es caracterizada por V_p inferiores a 650 m/s y que se asocian a materiales fisurados y parcialmente saturados, y otra con V_p cercanos a los 1500 m/s que se asocian a la refracción generada por el nivel freático.

Figura 38

Tomografías de Refracción interpretadas en PTAR Canoas

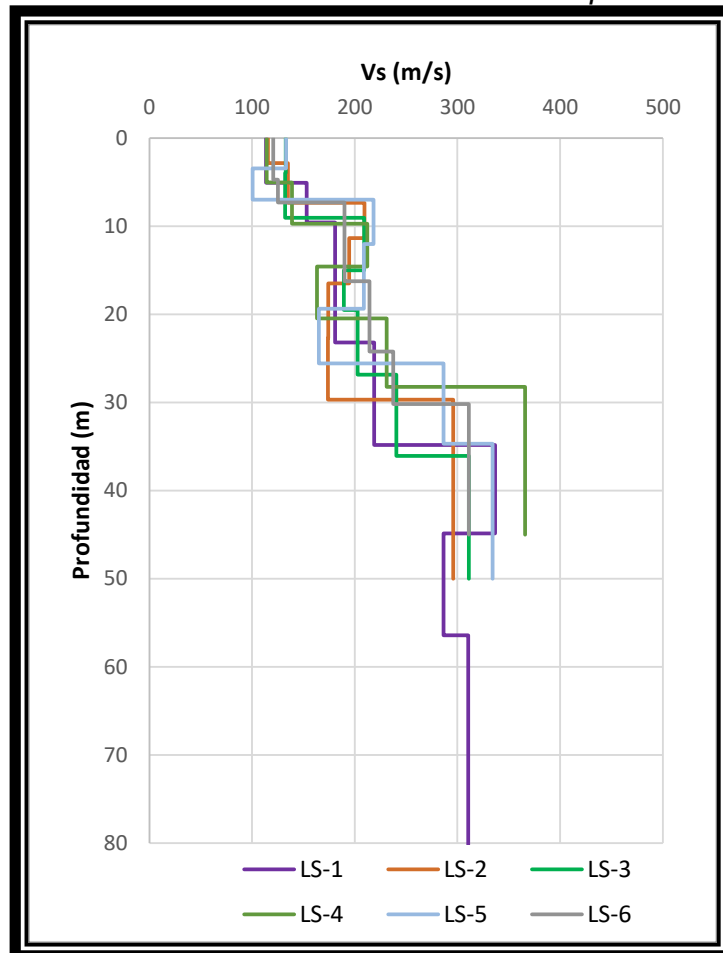


De la Figura 38 se puede concluir que el nivel freático se encuentra a profundidades variables de 8 a 10 metros de profundidad. Debido a que las capas profundas alcanzadas por del estudio presentan velocidades de compresión inferiores a las del agua, es imposible ver cambios estratigráficos más profundos con esta metodología.

En la Figura 39 se presenta el perfil de Vs interpretado en las líneas de refracción sísmicas realizadas en el proyecto PTAR Canoas, se puede observar que las seis líneas presentan un patrón generalizado en el que superficialmente se muestran valores de Vs inferiores a 150 m/s en los primeros 7.0m de profundidad, de 190 m/s desde los 10 m y aproximadamente hasta los 25 metros de profundidad, y luego se observan aumentos súbitos de las velocidades asociadas a la presencia de lentes de arenas densas. En ninguna de las mediciones se aprecia la presencia de basamento rocoso hasta los 50m de profundidad.

Figura 39

Perfil de velocidad de onda de corte interpretada en la medición



7.3. Reflexión Sísmica

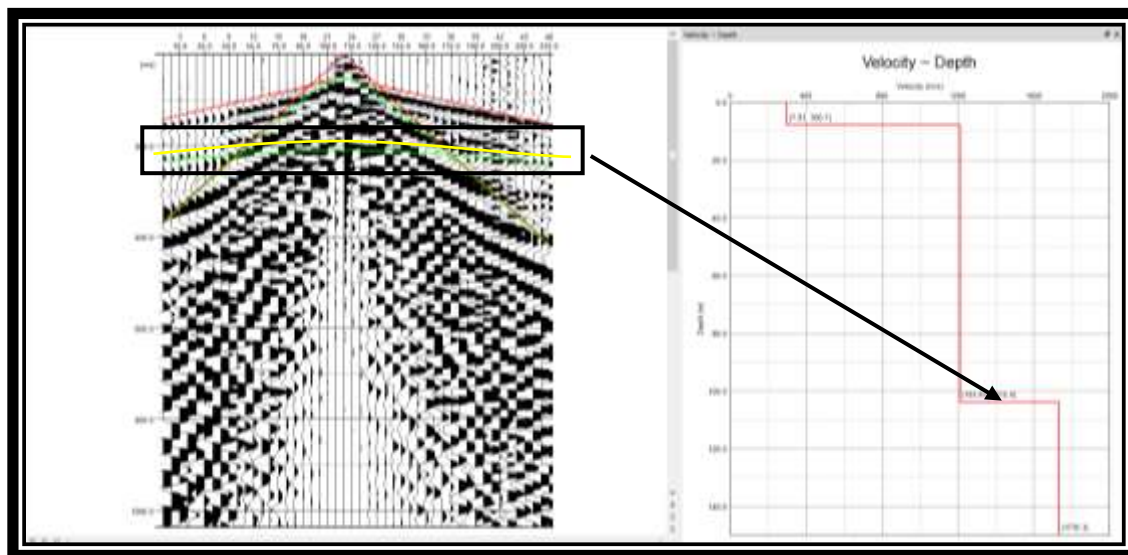
Los datos obtenidos en campo fueron procesados y analizados por un especialista mediante el uso del Software EFit V-9.12 perteneciente a la Compañía Geogiga, con licencia de SAICON SAS. Se utilizó la metodología del Common Shot, interpretando cada uno de los registros por separado de manera que se resalten los reflectores.

Se simula un perfil de velocidades y se calculan las reflexiones que resulten, se deben calibrar las velocidades de onda de compresión (refracciones) y posteriormente con estas velocidades se ajustan los espesores de los estratos para calibrar las reflexiones que claramente se observan en el sismograma como hipérbolas concavas hacia abajo.

La Figura 40 representa el shot 17 de la reflexión sísmica realizada en el proyecto PTAR CANOAS en la cual se observa una línea amarilla que representa la reflexión generada por el basamento del depósito a una profundidad de 103 metros.

Figura 40

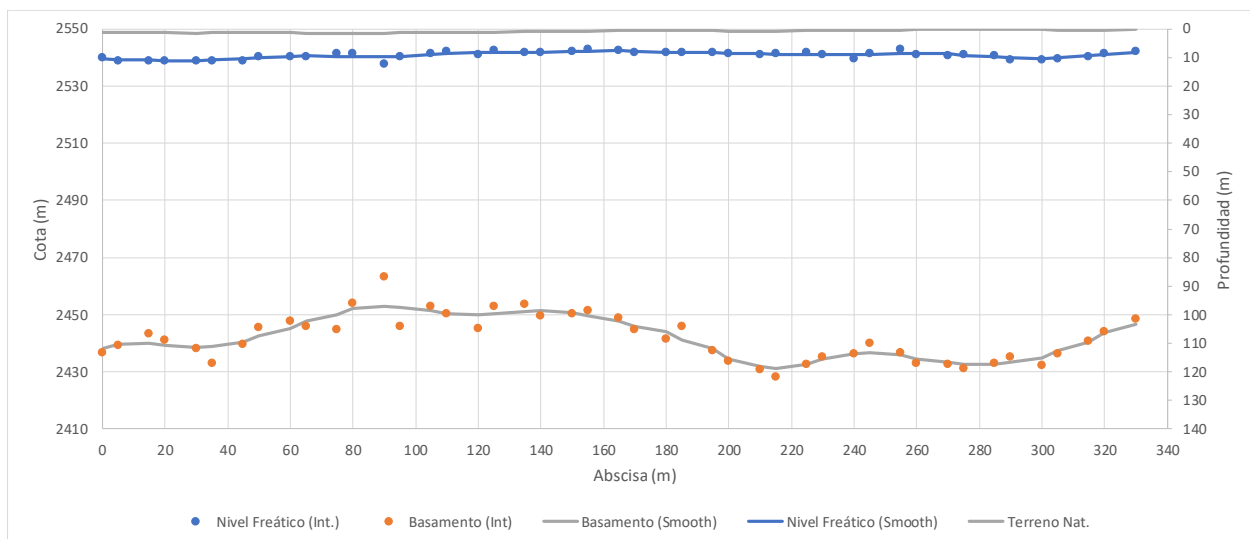
Procesamiento de reflexión mediante sismogramas medidos a partir de método common shot.



Con el objetivo de evaluar la profundidad y distribución del basamento rocoso el especialista realizó la modelación para cada uno de los disparos construyendo un perfil punto a punto en profundidad con los contactos interpretados. En la Figura 41 se observa una línea azul que hace referencia a la capa superficial que se encuentra por encima del nivel freático con una velocidad promedio de 340 m/s, asociada a arcillas de consistencia media a blanda. Se observa una fluctuación del nivel freático entre 8.5 y 10.5m de profundidad lo cual es coherente con los registros de las perforaciones y los piezómetros de hilo vibrátil instalados en la zona. Bajo el nivel freático, las velocidades de ondas de compresión están influenciadas por la condición de saturación, por lo cual exhiben valores de V_p relativamente altos para estos depósitos, y cercanos a la velocidad del agua, presentando velocidades promedio de 1380 m/s. y finalmente bajo el reflector del basamento los valores de V_p superan los 1700m/s

Figura 41

Perfiles de profundidad de basamento rocoso y nivel freático interpretados de las mediciones



De la Figura 41 se puede concluir que el basamento se encuentra a una profundidad que varía entre los 100 y los 120 metros de profundidad

7.4. Down-Hole

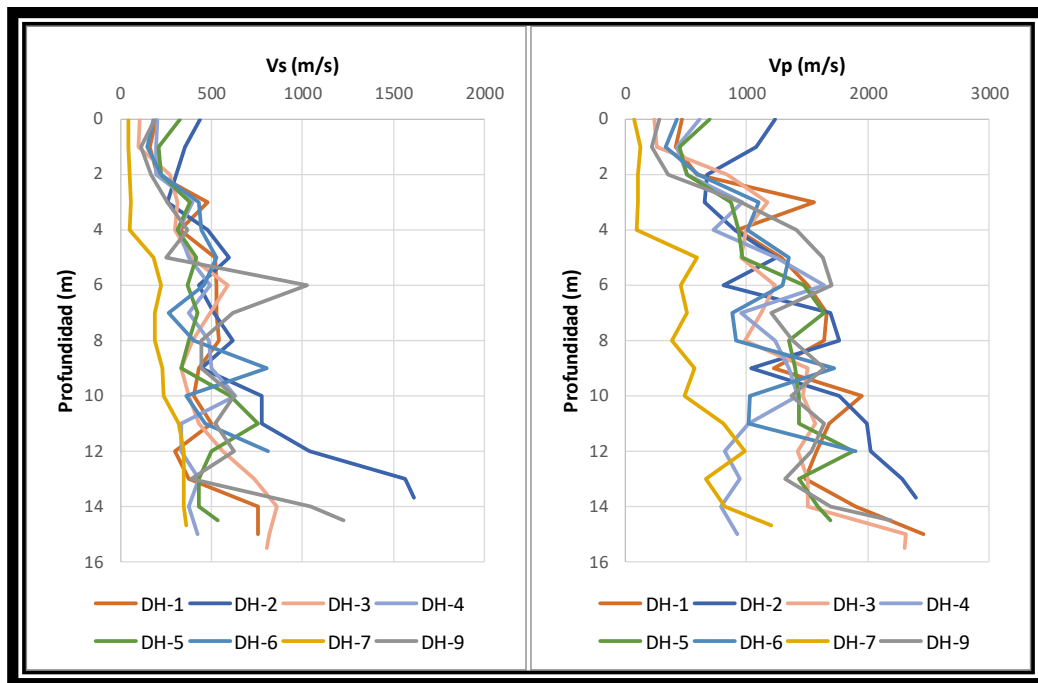
Para la toma de datos del presente ensayo se trabajó bajo la recomendación de la norma ASTM-D7400, 2008, haciendo uso de impactos verticales y laterales con el uso del martillo para la generación de ondas predominantes de compresión y de corte respectivamente. Conociendo el tiempo de llegada de las ondas S y P, y la profundidad a las que se realizó el ensayo se puede hacer uso de diferentes métodos para la obtención de un modelo de la disposición de las estructuras en profundidad.

El programa PS-Log de Geogiga permite calcular la estructura de V_s y V_p . Tras el procesamiento de los datos por parte del especialista encargado, se obtuvieron los perfiles de la Figura 42 en los que se puede observar que los valores de V_s tienen dominio en el rango de 250 a 600 m/s con aumentos locales de velocidad relacionados con la presencia de grandes bloques de rocas embebidos en una matriz areno-arcillosa, entre los datos resalta el resultado del perfil del DH-7 en el que se observan velocidades inferiores a los 50 m/s en los primeros metros de la medición, estas velocidades se asocian con una amplia capa de cobertura orgánica observada en la zona.

Para el perfil de V_p se observa un aumento constante de las velocidades con la profundidad, después del rango de 2 a 4 metros de profundidad y a excepción del DH-7, todos los registros superan los 1000m/s y se mantienen por encima de esta velocidad.

Figura 42

Perfiles de velocidad de onda interpretados



7.5. Tomografía

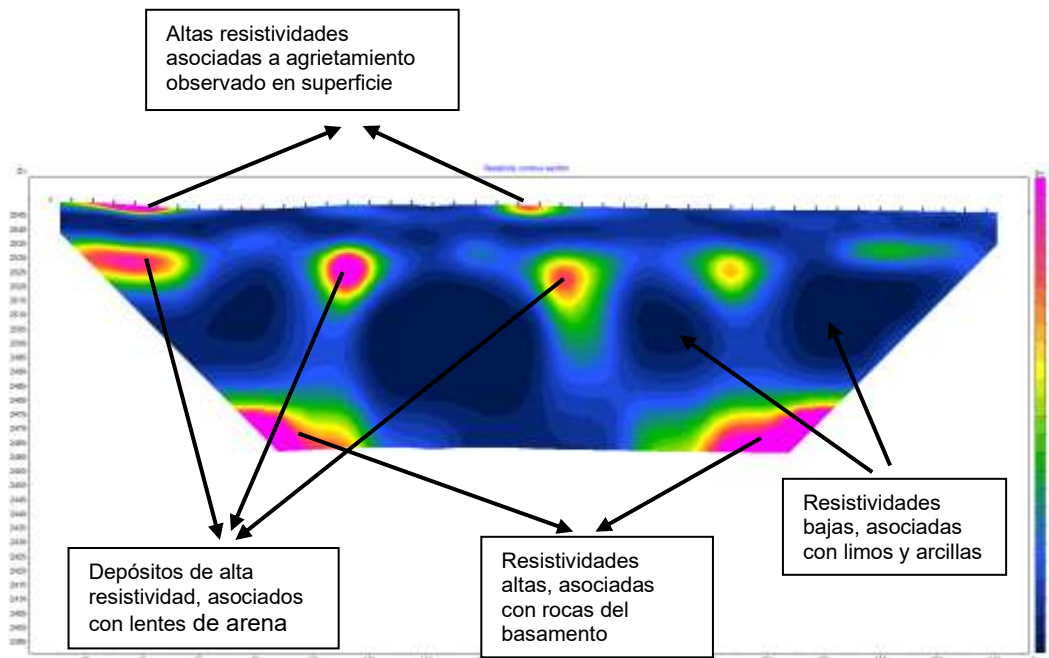
Como se mencionó anteriormente las tomografías utilizan los valores de resistividad aparentes medidos con los dispositivos geo eléctricos, para que por medio de técnicas de inversión se generen imágenes del subsuelo donde se represente los valores de resistividad real. Los datos obtenidos en campo son procesados por programas que permiten hacer dicha inversión.

La Figura 43 corresponde a una tomografía eléctrica tomada dentro del proyecto PTAR CANOAS, en la que se observa que las resistividades del terreno oscilación entre 9 y 116 ohm/metro; de acuerdo a la geología local de la zona y a la Figura 16, estos valores están acordes a los rangos esperados para depósitos de arenas y arcillas. En la tomografía podemos observar que en la superficie del terreno se observan zonas de alta resistividad que fueron asociadas con arenas y arcillas agrietadas; a profundidades entre los 20 y los 45 metros se observa una secuencia discontinua de alta resistividad que probablemente corresponde a un lente de arena;

entre 45 y 65 metros se observan valores de resistividad mucho menores, que oscilan entre 9 y 26 ohm/metro, las cuales pueden estar asociadas a limos y arcillas con cierto grado de saturación; y finalmente entre 60 y 80 metros se encuentran resistividades predominantemente altas, superiores a los 71 ohm/metro los cuales fueron asociados con el basamento rocoso.

Figura 43

Tomografía eléctrica proyecto PTAR Canoas



7.6. Sondeos Eléctricos Verticales.

Los Sondeos Eléctricos Verticales se realizaron mediante arreglos lineales tipo schlumberger realizando 22 mediciones por cada sondeo hasta alcanzar aperturas máximas de electrodos MN DE 100m y garantizar profundidades de investigación mínimas de 20 metros, en la **Tabla 13** fueron registrados los datos obtenidos por el SEV 1 del proyecto Celcia-Melgar, y posteriormente se generó un modelo de distribución vertical de la resistividad aparente en profundidad como se observa en la Figura 44

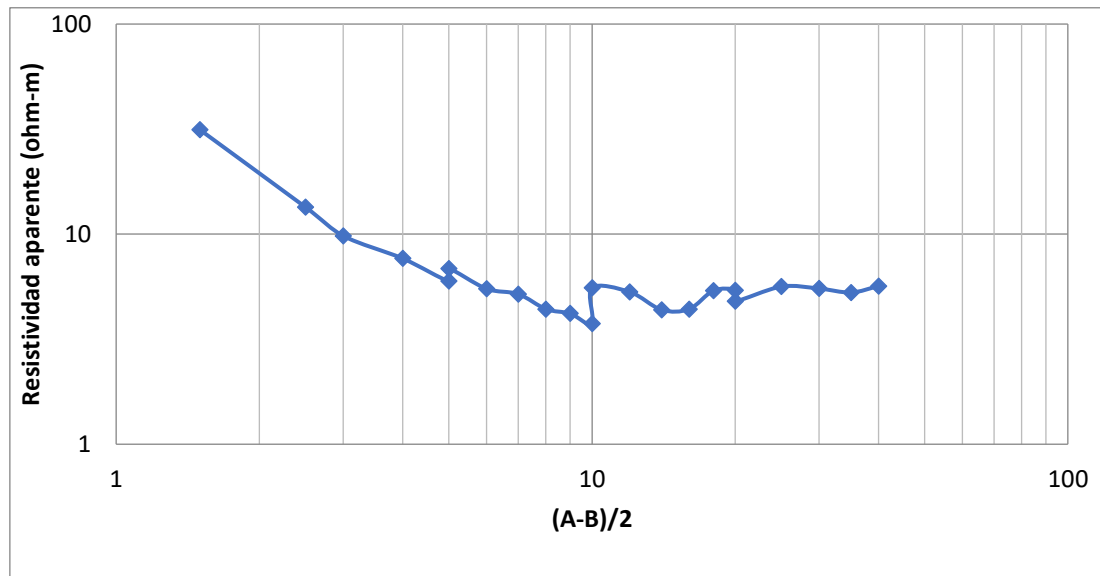
Tabla 13

Tabla SEV-1 Proyecto Celsia-Melgar

			SONDEO ELECTRICO VERTICAL				FMT:0011	
							Fecha: 27/11/2019	
Proyecto:			Celsia-Melgar			Sondeo		SEV-1
Operador:						Coordenadas:		E
Tipo de arreglo:			Schlumberger					N
MEDICIONES DE CAMPO								
N°	AB/2	MN/2	K	Voltaje telurico	DC (medido)	DC (final)	I	pa
	(m)	(m)			(mV)	(mV)	(mA)	
1	1,5	0,5	6,28	-9,5	1189	1198,5	240	31,4
2	2,5	0,5	18,85	-9,5	168,7	178,2	250	13,4
3	3	0,5	27,49	-9,4	83,4	92,8	260	9,8
4	4	0,5	49,48	-9,8	32	41,8	270	7,7
5	5	0,5	77,75	-9,9	7,8	17,7	230	6,0
6	5	1	37,70	21	61	40	220	6,9
7	6	1	54,98	18	42	24	240	5,5
8	7	1	75,40	15	37	22	320	5,2
9	8	1	98,96	13	29	16	360	4,4
10	9	1	125,66	12	23	11	330	4,2
11	10	1	155,51	11	18	7	290	3,8
12	10	2	75,40	-3	11	14	190	5,6
13	12	2	109,96	-3	11	14	290	5,3
14	14	2	150,80	-4	7	11	380	4,4
15	16	2	197,92	-4	2	6	270	4,4
16	18	2	251,33	-5	1	6	280	5,4
17	20	2	311,02	-6	-2	4	230	5,4
18	20	4	150,80	15	22	7	220	4,8
19	25	4	239,15	14	26	12	510	5,6
20	30	4	347,15	15	25	10	630	5,5
21	35	4	474,77	17	23	6	540	5,3
22	40	4	622,04	18	23	5	550	5,7

Figura 44

Curva de resistividades aparentes SEV-1 CELSIA-Melgar

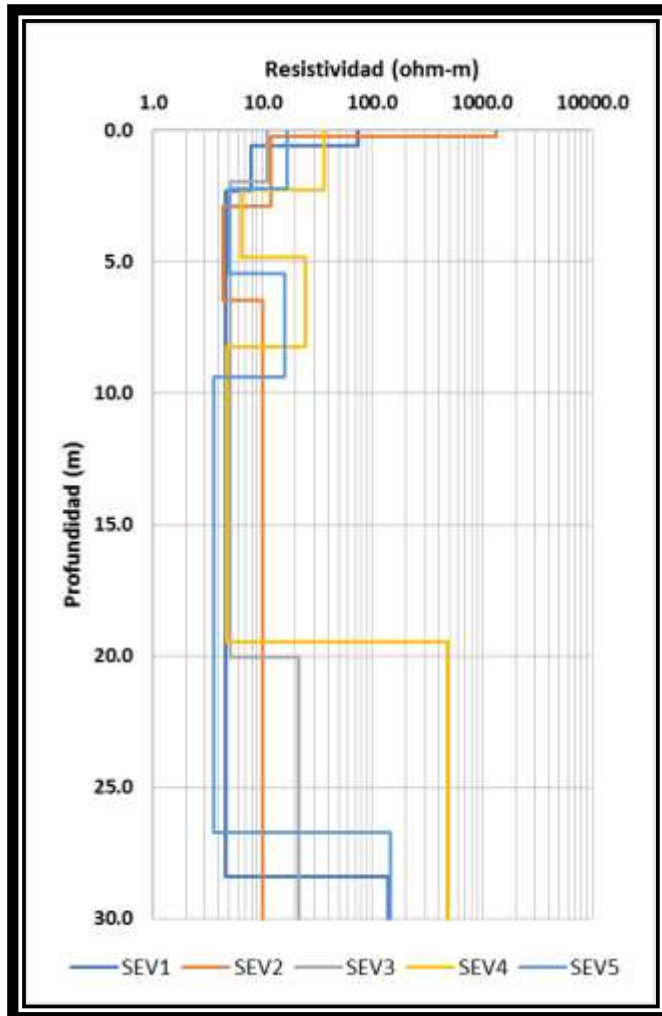


Nota: Esta curva de resistividades aparentes se genera en campo

La curva de resistividades aparentes generada en campo da una idea sobre la cantidad de capas presentes en el terreno, sin embargo, con los datos de resistividad aparentes se debe realizar un modelo inversión para obtener los valores de resistividad real y generar un perfil como el de la Figura 45. Una vez determinados los valores de resistividad real, se determina el tipo de material presente con ayuda de los rangos de resistividad presentados por (Palacky, 1987) para diferentes tipos de materiales térreos.

Figura 45

Perfiles de resistividad eléctrica real obtenido de los SEV



7.7. Caracterización Geomecánica de Macizos

En el anexo 3 se presentan los registros de los 10 taludes evaluados para el proyecto de mejoramiento y ampliación de la vía que conduce de la ciudad de Bogotá al municipio de la Calera.

7.8. Fallas Geotécnicas en los Macizos Rocosos

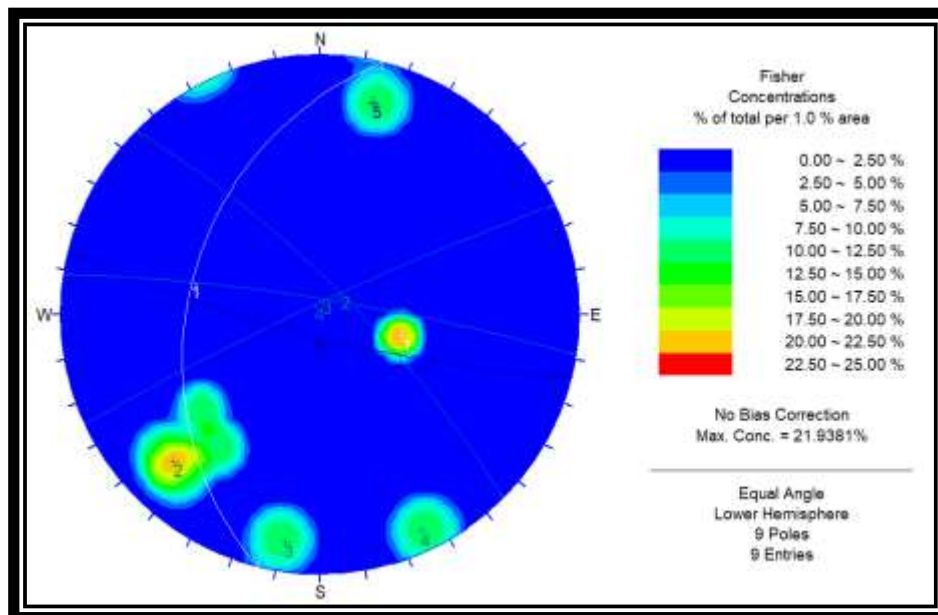
Los datos estructurales obtenidos a partir de las labores de campo para el desarrollo del proyecto del Plan de manejo de recuperación y restauración ambiental MERIDIAM fueron procesados por el programa Dips de Rocscience. Este programa permitió hacer una proyección estereográfica de datos estructurales pertenecientes a estratificación, fallas, diaclasas y orientación del talud. Una vez graficados los planos dentro del estereograma, se realizó el análisis de cada uno de los taludes:

- Estación Geomecánica 1 (EG1), Figura 46.
- Estación Geomecánica 2 (EG2), Figura 47.
- Estación Geomecánica 3 (EG3), Figura 48.
- Estación Geomecánica 4.1 (EG4.1), Figura 49.
- Estación Geomecánica 4.2 (EG4.2), Figura 50.
- Estación Geomecánica 5 (EG5), Figura 51.

CONVENCIONES	
Estratificación	
Talud	
Falla	
Diaclasas	

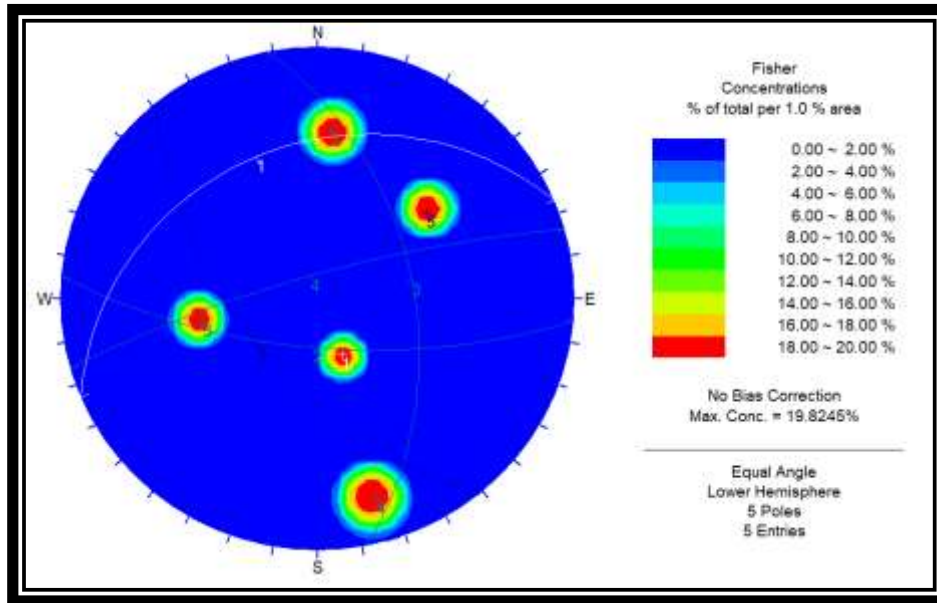
Figura 46

Talud EG 1



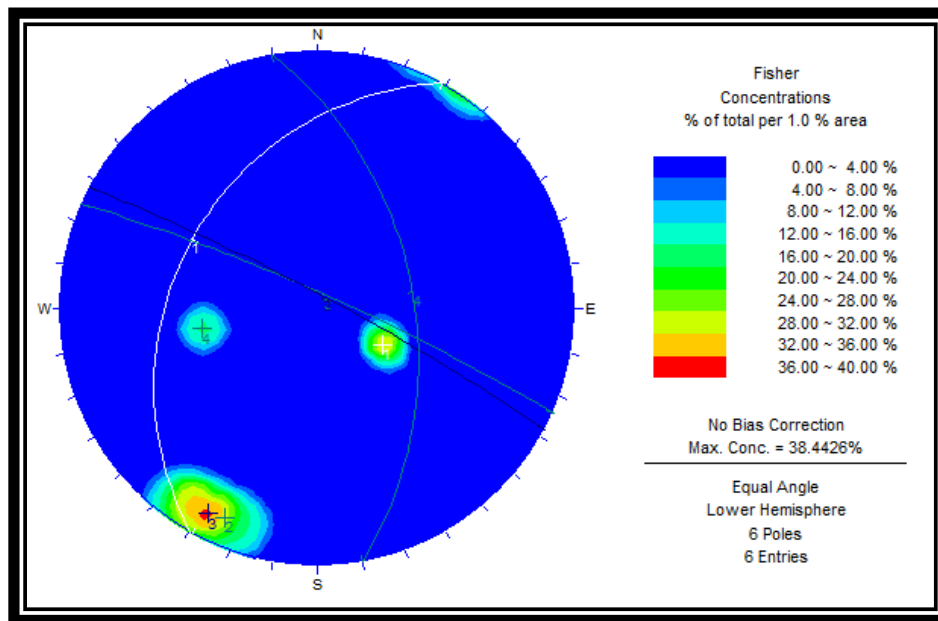
Nota: Este talud puede presentar falla de tipo planar a lo largo del plano de falla encontrado, respecto al plano de estratificación el talud es estable.

Figura 47
Talud EG 2



Nota: Este talud puede presentar falla de tipo planar respecto al plano de diaclasas número 2.

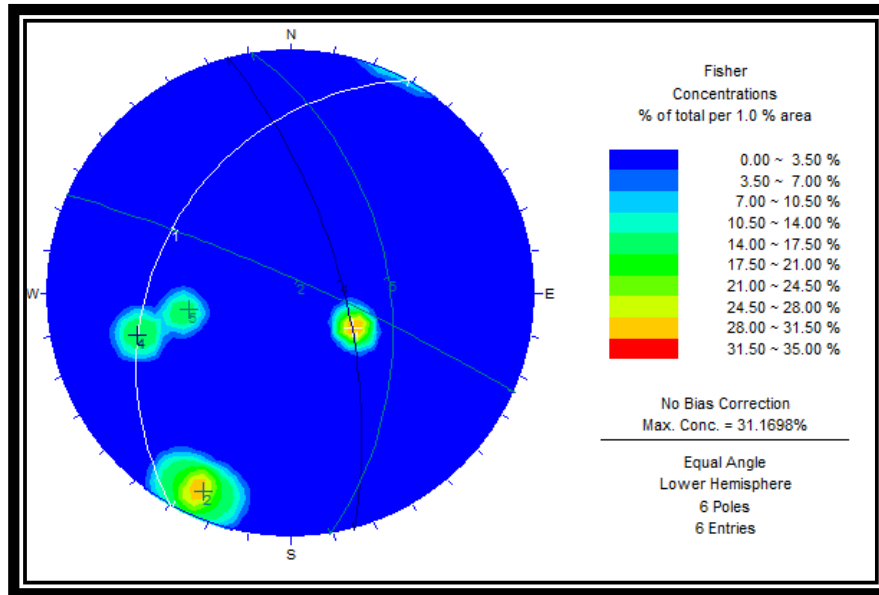
Figura 48
Talud EG 3



Nota: Este talud presenta las condiciones necesarias para desarrollar falla diédrica con los planos 2 y 4 que corresponden a familias de diaclasas

Figura 49

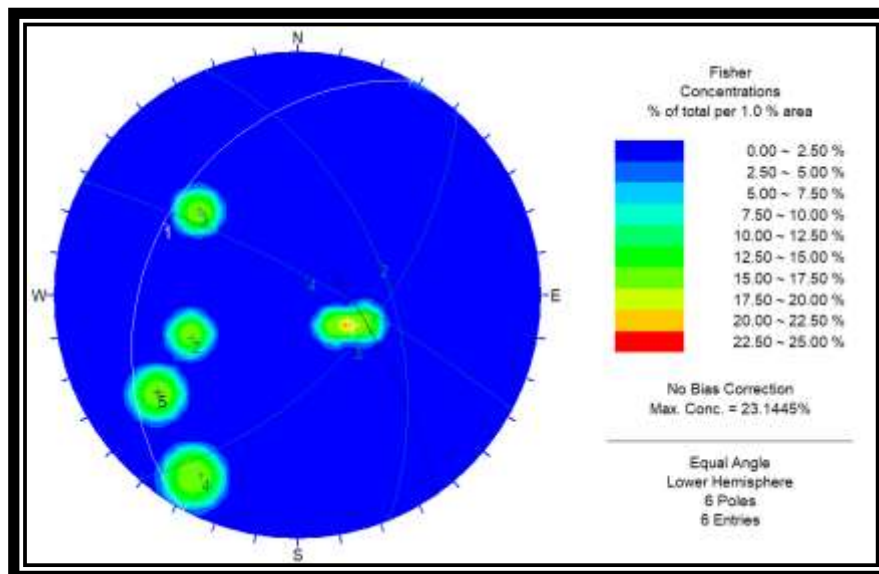
Talud EG 4.1



Nota: Este talud presenta las condiciones para generar fallamiento planar respecto al plano numero 2 (familia de diaclasas), y fallamiento diédrico respecto a los planos 1 y 4.

Figura 50

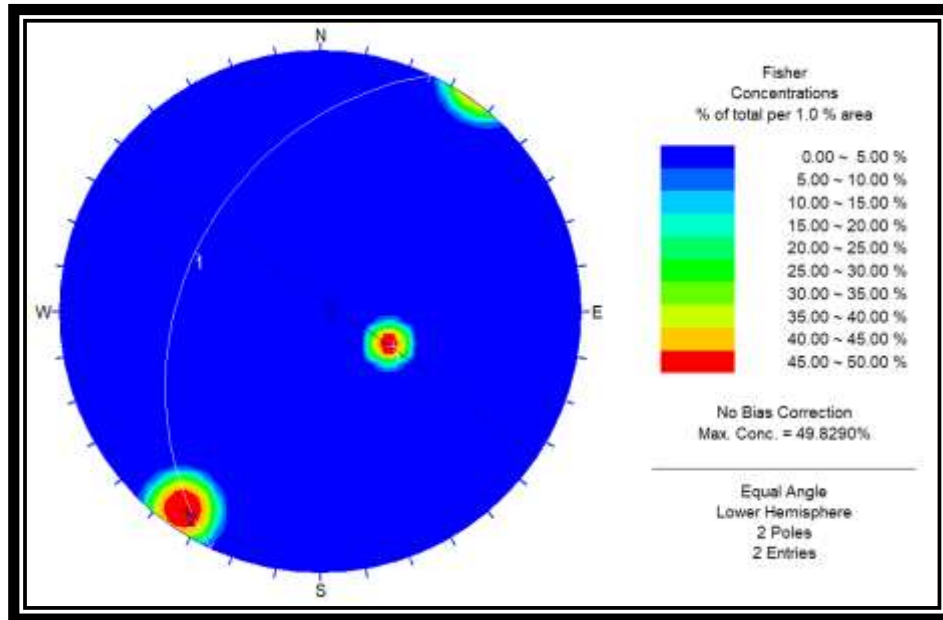
Talud EG 4.2



Nota: Este talud puede presentar falla planar respecto al plano número cinco perteneciente a una familia de diaclasas, sin embargo, el ángulo de buzamiento de la discontinuidad es ligeramente mayor que el ángulo de buzamiento del talud.

Figura 51

Talud EG 5



Nota: Este talud puede presentar fallamiento de tipo diédrico.

8. Discusión.

La geotecnia es una disciplina que aborda el estudio de materiales geológicos desde una perspectiva ingenieril, evaluando mediante la aplicación del conocimiento científico las propiedades físicas y comportamientos mecánicos de los suelos y las rocas, dicho esto, la geotecnia es una rama que concierne y reúne conocimientos tanto de la geología como de la ingeniería civil, las cuales deben trabajar en conjunto en la búsqueda de una correcta interacción entre el terreno y las diversas obras civiles y geotécnicas (carreteras, puentes, túneles, edificio, estabilización de taludes y demás) construidas sobre él. De acuerdo a lo anterior el estudio y desarrollo de una obra geotécnica precisa del conocimiento y habilidades de un geólogo, sin embargo, antes del desarrollo de la practica la empresa no contaba con uno, realizando ciertos procedimientos no de la mejor manera.

El conocimiento y entendimiento tanto de la geología local como de los procesos geológicos mediante los cuales se forman las rocas y depósitos que conforman cada una de las zonas de trabajo permite contribuir al planteamiento e identificación de manera más acertada y de acuerdo a los requerimientos de cada proyecto los puntos de interés en los que se desarrollaran los estudios, garantizando una campaña de exploración más eficiente y optimizando los recursos de la empresa.

De manera general y como se observa en la metodología de trabajo, las labores de campo inician con ensayos directos (spt y sondeos mecánicos) y posteriormente se desarrollan los ensayos indirectos (Sísmica de refracción y reflexión, down hole, tomografías y sondeos eléctricos verticales); Se recomienda replantear el orden en que se realizan los ensayos en las campañas de exploración, iniciando con métodos indirectos los cuales abarcan áreas más extensas y arrojan datos generales de la zona de trabajo y seguir con ensayos directos que permiten obtener datos más puntuales e ir disminuyendo cada vez más la incertidumbre, obteniendo información más detallada y de mayor valor.

De acuerdo a los objetivos y requerimientos de cada proyecto se puede utilizar un conjunto de metodologías u otras, pero de manera general se recomienda iniciar con sísmica de reflexión cuando se requiere observar estructuras profundas

como se hace en el proyecto PTAR Canoas para determinar la geometría y profundidad del basamento, si no es necesario examinar a tanta profundidad o un método más económico puede lograr el mismo objetivo, se recomienda iniciar con sísmica refracción y sondeos eléctricos verticales para obtener variaciones en profundidad de la velocidad de ondas sísmicas y de resistividades respectivamente; si se presenta una anomalía compleja y se precisa de información más detallada o se requiera de una imagen para identificar estructuras, proceder a realizar una tomografía.

Una vez terminados los ensayos indirectos, identificar los puntos de mayor interés y proceder a realizar los ensayos de spt y los sondeos mecánicos; si el proyecto lo requiere se puede instalar una tubería especial que recubra la perforación y permita realizar ensayos de down hole para obtener información más detallada de la variación de la velocidad de ondas en profundidad, o utilizar elementos como el piezómetro para determinar niveles freáticos con exactitud o inclinómetros para monitorear si el talud se está desplazando.

A los ensayos directos (spt y sondeos mecánicos) se brinda especial apoyo debido a que los encargados de realizar la descripción y procesamiento de las muestras en campo son los perforadores, quienes, a pesar de ser capacitados para tomar información preliminar de cada sondeo, no tienen las competencias técnicas suficientes; las muestras son analizadas una vez llegan al laboratorio, complementando la información tomada previamente en campo y se diligencia un nuevo formato para la entrega final.

Por otra parte, y de manera complementaria a las actividades realizadas por la empresa previo al desarrollo de la práctica, se implementó la caracterización geomecánica de macizos basados en los parámetros de Barton 1974 en el proyecto de mejoramiento y ampliación de la vía que conduce de la ciudad de Bogotá al municipio de la Calera y cartografía geológica, mapeamiento de movimientos en masa y análisis para posibles fallas geotécnicas en macizos rocosos para el proyecto PMRRA Meridiam.

9. Conclusiones

- Se participó en los proyectos realizados por la empresa, haciendo parte de las diferentes etapas de estos (planeación, exploración, laboratorios y procesamiento de datos), logrando una sinergia entre los conocimientos aportados y los procesos y metodologías ya establecidos por la empresa.
- Se realizaron aportes y estudios geológicos tales como geologías generales y detalladas basadas en información primaria y secundaria, toma de datos para la clasificación geomecánica de macizos según la clasificación de BARTON 1974, análisis de fallas geotécnicas en los macizos rocosos, mapas geológicos y morfodinámicos, ensayos de laboratorio, y demás de acuerdo a los requerimientos de los diferentes proyectos, además del desarrollo de técnicas directas (ensayos de spt y perforaciones mecánicas) e indirectas (sísmicas y eléctricas) con el fin de caracterizar los suelos y rocas de los mismos.
- La obtención de muestras y datos de calidad es el principal objetivo de las campañas de exploración, por ende, se debe tener mucha precisión y rigurosidad a la hora de realizar los procedimientos de los diferentes métodos aplicados tanto en campo como en el laboratorio, pues es a partir de estos que se determinan los parámetros bajo los cuales se van a tomar decisiones.
- Debido a que muchas veces un solo ensayo no brinda ni la certidumbre ni la información suficiente, se hace necesaria la aplicación de diversos métodos para correlacionar y complementar la información. En un estudio de refracción sísmica, cuando las capas subyacentes al nivel freático presentan velocidades de onda menores a la velocidad de compresión del agua, es imposible ver cambios estratigráficos en profundidad teniéndose que valer de perforaciones mecánicas, sondeos eléctricos verticales y tomografías para obtener más información.
- Gracias a la facilidad de ejecución y economía, las sísmicas de refracción, sondeos eléctricos verticales y tomografías son los métodos más ampliamente utilizados.

- La sísmica de reflexión fue utilizada en el proyecto PTAR Canoas con el objetivo de determinar la profundidad y geometría del basamento ya que los demás ensayos por su alcance y nivel de detalle no lograron llegar a tal profundidad.
- Para el proyecto del Plan de manejo de recuperación y restauración ambiental MERIDIAM se determinó que los movimientos en masa identificados (traslacionales, rotacionales y reptación) son generados principalmente por el mal manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, por la intervención antrópica y en menor proporción por las condiciones naturales del terreno (litología y pendiente).

Bibliografía

Agencia Nacional De Hidrocarburos, C. (s.f.). *Estratigrafía de la Formación La Paila, un potencial Reservorio de Hidrocarburos en la Cuenca Cauca-Patía.*

Andrés Felipe Salazar Ríos. (2018). *Estratigrafía Física.*

Arias, M. E. (2002). La Prospección Geoeléctrica y Electromagnética en dos Dimensiones y su Aplicación en la Hidrogeología. *Revista Geológica de America Central*, 21-26.

ASTM International. (1998). *Método de Prueba Estándar para la Determinación en Laboratorio del Contenido de Agua (Humedad) de Suelos y Rocas por Masa. (ASTM D-2216.)*

ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C 136 –01).*

ASTM. (1996). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils (ASTM D 1586.).* New York.

Auge, D. G. (2008). *Metodos Geoelectricos para la prospeccion de agua subterranea.* Universidad de Buenos Aires.

Braja M, Das. (2002). *Soil Mechanics Laboratory Manual* (6th ed.).

CIM Group Consultora de Ingeniería. (2021). Down Hole Seismic Testing. *CIM Group - Consultora de Ingeniería.* <http://cim-group.net/servicio/down-hole-seismic-testing-2/>

Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7th ed.). Cengage Learning Editores, S.A.

DirectIndustry. (s. f.). *TRH 1500 BG - Barrena helicoidal by RABAUD* | DirectIndustry.

Recuperado 2 de junio de 2021, de

<https://www.directindustry.es/prod/rabaud/product-41260-1319069.html>

Equipment, U. M. T. (s. f.). *Aparatos Manual y Motorizado para Límite Líquido*

(Casagrande)—*Clasificación de Suelos*. Utest Material Testing Equipment.

Recuperado 7 de junio de 2021, de [https://www.utest.com.tr/es/25739/Aparatos-](https://www.utest.com.tr/es/25739/Aparatos-Manual-y-Motorizado-para-L-mite-L-quido-Casagrande)

[Manual-y-Motorizado-para-L-mite-L-quido-Casagrande](https://www.utest.com.tr/es/25739/Aparatos-Manual-y-Motorizado-para-L-mite-L-quido-Casagrande)

Equipment, U. M. T. (2021). *Consolidación—Mecánica de Suelos*. Utest Material

Testing Equipment. <https://www.utest.com.tr/es/25748/Consolidaci-n>

Figuerola, J. C. (1953). *Tratado de geofísica aplicada*. Madrid.

Gastiaburu, D. Q. (2020). *Ingeniería Sismoresistente*. Perú.

Geodatos.cl. (2021). *Geofísica, Exploración, Ingeniería, Método ReMi*. Geofísica,

Exploración, Ingeniería, Método ReMi. <http://www.geodatos.cl/downhole.php>

Geodatos, S. G. (s.f.). *GEODATOS*. Obtenido de Geofísica de Avanzada:

<http://www.geodatos.cl/downhole.php>

Geofísica Andina. (2021). *Sondaje Eléctrico Vertical (SEV)—Geofísica Andina*

geofísicos ingeniería. *Geofísica Andina*.

<https://geofisicandina.com/index.php/sondaje-electrico-vertical-sev/>

geologiaweb. (s. f.). ▷ *Límites de Atterberg [Índice de Plasticidad Explicación*.

Recuperado 7 de junio de 2021, de [https://geologiaweb.com/ingenieria-](https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/limites-atterberg/)

[geologica/limites-atterberg/](https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/limites-atterberg/)

Geomastersac.com. (2021). *Estudio Refracción Sísmica*.

[http://www.geomastersac.com/servicios-geof%C3%ADsicos/estudio-refraccion-](http://www.geomastersac.com/servicios-geof%C3%ADsicos/estudio-refraccion-sismica.html)

[sismica.html](http://www.geomastersac.com/servicios-geof%C3%ADsicos/estudio-refraccion-sismica.html)

Gomez, J. H. (2012). *Utilizacion de Tecnicas de Sondeos en Estudios Geotecnicos*.
MADRID.

<http://geotecnia-sor.blogspot.com>. (2010, noviembre 19). Apuntes de Geotecnia con
Énfasis en Laderas: Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg - Límite
Líquido. *Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas*. http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html

<http://www.fao.org>. (s. f.). 8. *Consistencia del Suelo*. Recuperado 7 de junio de 2021, de
http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/!17650!x6706s08.htm

IDEAM. (2013). *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas Geomorfológicos a escala 1:100.000*. Bogotá.

Ingeominas. (2000). *Plancha 264 - Espinal*. Bogotá.

Ingeominas. (2002). *Geología de la plancha 264 Espinal*. Bogotá.

Ingeominas. (2002). *Geología de la plancha 303 COLOMBIA Departamentos de HUILA, TOLIMA Y META*. Bogotá.

Ingeominas. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.

Ingeominas, I. C. (1985). Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar de la
Plancha 261 TULUÁ. BOGOTÁ.

Ingeominas, I. C. (1985). Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar de la
Plancha 280 PALMIRA. BOGOTÁ.

Ingeominas. (1985). *Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar de la Plancha 261 Tuluá* (p. 14).

- INVE, 1. (2010). *Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido*.
- INV E 111-07 (2010). *Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido*
- Invías. (2007). *Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos*.
- Jose Cantos Figuerola. (1973). *Tratado de Geofísica Aplicada* (2nd ed).
- Llorente, G. G. (2015). *Contribución al conocimiento de los primeros geotécnicos del siglo XX*. Madrid.
- Locke, M. H. (2004). *Tutorial 2D and 3D Electrical Imaging Surveys*. New York.
- Luis I. González de Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Miguel Auge. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea* (p. 30). Universidad de Buenos Aires.
- Nebrija.es. (2021). *Reflexión y refracción*. 17.
- Olarte, J. M. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. *Libros del Servicio Geológico Colombiano*.
<https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/36/31/381-1>
- Palacio-León, Ó., Chávez-Porras, Á., & Velásquez-Castiblanco, Y. L. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Tecnura*, 21(53), 96-106.
- Palacky, G. J. (1987). Clay Mapping Using Electromagnetic Methods. *First Break*, 295-306.

Roschendrill.com. (2021). *Punta de punta de carburo de tungsteno.*

<http://www.roschendrill.com/core-bits/diamond-core-drill-bits/tungsten-carbide-tip-bit.html>

Santiago Cano Bedoya. (2019). *Comportamiento Mecánico de Vertientes y Macizos Rocosos.* Clase de Geotécnia, Universidad de Caldas.

Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Geología de la Plancha 228 Bogotá Noreste.* Bogota.

Soto, J. R. (2011). *Proteccio y Estabilizacion de Taludes .* VALDIVIA – CHILE.

TMG Supplies. (2021). *Brocas con diamante saca nucleo para perforacion geotecnia.*

Tmggeotech.com. <https://tmggeotech.com/brocas-diamantadas-saca-nucleos-perforacion-geotecnia.php>