

**IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN PARA
MATERIALES CON COMPORTAMIENTO COMPLEJO DE LA CÁRCAVA DEL
SECTOR SUR-ORIENTAL DE LA CIUDAD DE TUNJA**

Andrés Felipe López Garrido

Julián Darío Rodríguez Botía

Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja
División De Arquitectura E Ingenierías - Facultad De Ingeniería Civil
Tunja, 2023

**IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN PARA
MATERIALES CON COMPORTAMIENTO COMPLEJO DE LA CÁRCAVA DEL
SECTOR SUR-ORIENTAL DE LA CIUDAD DE TUNJA**

Trabajo de Grado para Obtener el Título de Ingeniero Civil

Andrés Felipe López Garrido

Julián Darío Rodríguez Botía

Director:

Ing. Msc Geotecnia. Andrés Felipe Bernal Villate

Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja
División De Arquitectura E Ingenierías - Facultad De Ingeniería Civil
Tunja, 2023

Nota de Aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma Director del Proyecto

Firma Decano Facultad de Ingeniería Civil

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado a todos aquellos allegados que de una o de otra forma contribuyeron a este logro, nuestro más sincero agradecimiento.

A nuestras familias, cuyo amor, apoyo y sacrificio han sido el fundamento sobre el cual construimos nuestros sueños. Gracias por su paciencia, por sus palabras de aliento en momentos difíciles y por celebrar cada uno de nuestros logros de forma sincera.

A nuestros seres queridos, por sus mensajes de apoyo y compañía durante momentos de intenso trabajo.

A nuestros docentes, por sus enseñanzas y consejos a lo largo de la carrera, los cuales nos sirvieron bastante en el desarrollo de ese proyecto.

AGRADECIMIENTOS

En este largo proceso académico, queremos expresar nuestra profunda gratitud a todas las personas que han hecho parte del proceso, las cuales nos acompañaron y brindaron su apoyo en la realización de esta tesis, la cual representa un logro personal para cada uno de nosotros.

En primer lugar, queremos agradecer a Dios, por permitirnos culminar nuestro trabajo de manera satisfactoria y sin presentar ningún tipo de percance en el camino.

De igual forma, agradecemos a nuestro director de tesis, el Ingeniero Andrés Felipe Bernal Villate, por su gran aporte en este trabajo investigativo, guiándonos en este proceso y compartiendo su experiencia y conocimiento para lograr plasmar las ideas y así poder presentar un trabajo con calidad. Su compromiso con nuestro éxito académico ha sido una inspiración y un motivador constante.

Agradecemos a nuestras familias, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento en momentos de cansancio y estrés, que ayudaron a que no desfalleciéramos en el intento y siguiéramos adelante en el camino hacia el éxito.

Por último, agradecer al personal de laboratorio de la Universidad Santo Tomás, por su conocimiento, ayuda y supervisión durante el desarrollo de la parte experimental de este proyecto.

Con gratitud,

Andrés Felipe López Garrido y Julián Darío Rodríguez Botía.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS.....	14
RESÚMEN.....	17
ABSTRACT	18
INTRODUCCIÓN.....	19
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	20
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	20
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. MARCO TEÓRICO	22
4. MATERIALES Y MÉTODOS	37
5. GENERALIDADES.....	39
5.1. LOCALIZACIÓN	39
4.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	41
4.3 GENERALIDADES.....	48
4.3.1 Generalidades del Sector	48
4.3.2 Tipo de Material.....	48
4.3.3 Normatividad	50
6. ACTIVIDADES	52
5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR.....	52
5.2 TOPOGRAFIA REGIONAL Y LOCAL	52

5.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	53
5.4 HIDROGRAFÍA.....	53
5.5 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA.....	53
5.5.1 Exploración Directa.....	53
5.5.2 Ensayos de Campo	54
5.5.3 Ensayos de Laboratorio	54
5.5.4 Caracterización Geotécnica y Comportamientos Esperados ...	54
5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
7. EXPLORACIÓN.....	56
6.1 USO DE SUELO.....	56
6.2 TOPOGRAFÍA	57
6.2.1 Topografía Regional.....	57
6.2.2 Topografía Local	58
6.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	61
6.3.1 Geología Regional.....	61
6.3.2 Geología Estructural y Tectónica	65
6.3.3 Geología Local	66
6.4 HIDROLOGÍA.....	68
6.5 PRECIPITACIÓN Y CLIMA	70
6.5.1 Metrología de la Unidad Hidrológica	72
6.6 AMENAZAS PRESENTES	73
6.6.1 Amenaza en Zona Urbana	73
6.6.2 Amenaza en Zona Sísmica	74
6.6.3 Amenaza de Inundación	74

8.	INVESTIGACIÓN DEL SUELO	76
	7.1 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	76
	7.2 RESULTADOS DE LABORATORIO	78
	7.3.1 Sondeo 1	79
	7.3.2 Sondeo 2	82
	7.3.3 Sondeo 3	84
	7.3.4 Sondeo 4	87
	7.3 PERFIL GEOTÉCNICO	89
	7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
	7.4.1 Granulometría	90
	7.4.2 Contenido Granulométrico	95
	7.4.2.1 Sondeo 1	96
	7.4.2.2 Sondeo 2	96
	7.4.2.3 Sondeo 3	97
	7.4.2.4 Sondeo 4	98
	7.4.3 Variación de la Humedad y Límites de Atterberg	99
	7.4.4 Condiciones de Humedad de Saturación	104
	7.4.5 Cohesión Mediante Ensayo de Corte Directo	108
	7.4.6 Ángulo de Fricción	109
	7.5 COMPORTAMIENTOS ESPERADOS	110
	7.5.1 Potencial de Expansión de Suelos Finos	111
	7.5.2 Potencial de Expansión y Consolidación del Material Natural	115
	7.6 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS Y SUELOS FINOS	116
	7.7 SELECCIÓN DE PORCENTAJES DE LOS ADITIVOS	119

9.	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DEL SUELO	121
	8.1 ANÁLISIS CON HIDROXIDO DE CALCIO (CAL).....	121
	8.2 ANÁLISIS DE CEMENTO GRIS TIPO I	129
	8.3 VARIACION DE PARÁMETROS MECÁNICOS DEL MATERIAL	136
10.	ANÁLISIS DE EXPANSIÓN	137
	9.1 ANÁLISIS DE RESISTENCIA	138
	9.2 ANÁLISIS DE CONSOLIDACIÓN	139
11.	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN.....	140
	10.1 DOSIFICACIÓN DE LA MUESTRA	145
12.	CONCLUSIONES	146
13.	RECOMENDACIONES.....	148
14.	GLOSARIO	149
15.	REFERENCIAS	153
16.	ANEXOS.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Criterios para clasificar Suelos en el Ensayo de Pinhole.....	23
Figura 2. Tipos de Material	25
Tabla 3. Evaluación de Potencial de Expansión	28
Figura 4. Índice de Expansión	29
Figura 5. Agrietamiento por Movimiento Céntrico.....	31
Figura 6. Agrietamiento por Movimiento Perimetral.....	31
Figura 7. Agrietamiento por Movimiento Cíclico	32
Figura 8. Diagrama de Planificación.....	38
Figura 9. Localización.....	39
Figura 10. Ubicación Zona de Estudio, Tunja.....	40
Figura 11. Zona de Estudio.	41
Figura 12. Ubicación de los Sondeos en la Zona de Estudio.	42
Figura 13. Afectación Sondeo 1	43
Figura 14. Afectación Sondeo 1	44
Figura 15. Afectación Sondeo 2	45
Figura 16. Afectación Sondeo 3	46
Figura 17. Afectación Sondeo 4	47
Figura 18. Material Presente en los Sondeos.....	49
Figura 19. Usos de Suelo Zona de Estudio	56
Figura 20. Usos de Suelo Zona de Estudio	57
Figura 21. Topografía Regional	58
Figura 22. Topografía Local.....	59

Figura 23. Ubicación de los Sondeo y Perfil	60
Figura 24. Altimetría Zona de Estudio	60
Figura 25. Tectónica y Geología Estructural.....	63
Figura 26. Geología Local	67
Figura 27. Hidrografía del Municipio.....	69
Figura 28. Precipitación Promedio Multianual Tunja	71
Figura 29. Variación Climática Tunja.....	71
Figura 30. Mapa de Isoyetas Municipio de Tunja	72
Figura 31. Amenazas Zona Urbana Municipio de Tunja.....	73
Figura 32. Amenaza Sísmica Municipio de Tunja.....	74
Figura 33. Amenaza de Inundación Municipio de Tunja.....	75
Figura 34. Exploración del Suelo.....	77
Figura 35. Perfil Geotécnico del Sitio de Estudio.....	89
Figura 36. Curva Granulométrica Sondeo 1 Muestra 3	91
Figura 37. Curva Granulométrica Sondeo 1 Muestra 5	91
Figura 38. Curva Granulométrica Sondeo 2 Muestra 4	92
Figura 39. Curva Granulométrica Sondeo 2 Muestra 6	92
Figura 40. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 1	93
Figura 41. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 4	93
Figura 42. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 6	94
Figura 43. Curva Granulométrica Sondeo 4 Muestra 3	94
Figura 44. Curva Granulométrica Sondeo 4 Muestra 6	95
Figura 45. Perfil Granulométrico Sondeo 1.....	96
Figura 46. Perfil Granulométrico Sondeo 2.....	97

Figura 47. Perfil Granulométrico Sondeo 3.....	98
Figura 48. Perfil Granulométrico Sondeo 4.....	99
Figura 49. Variación de Humedad y Limites Sondeo 1.....	100
Figura 50. Variación de Humedad y Limites Sondeo 2.....	101
Figura 51. Variación de Humedad y Limites Sondeo 3.....	102
Figura 52. Variación de Humedad y Limites Sondeo 4.....	103
Figura 53. Variación de Humedad de los Cuatro Sondeos.....	104
Figura 54. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 1	105
Figura 55. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 2	106
Figura 56. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 3	107
Figura 57. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 4	108
Figura 58. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 1	113
Figura 59. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 2	113
Figura 60. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 3	114
Figura 61. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 4.....	114
Figura 62. Consolidación y Expansión en Condición Natural	116
Figura 63. Clasificación General del Tipo de Arcilla Según Limites de Consistencia	117
Figura 64. Clasificación Detallada del Tipo de Arcilla Según Limites de Consistencia	119
Figura 65. Ficha Técnica Cal Empleada.....	122
Figura 66. Probeta 1 (5% de Cal)	123
Figura 67. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cal)	124
Figura 68. Probeta 2 (10% de Cal)	125

Figura 69. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cal)	126
Figura 70. Probeta 3 (15% de Cal)	127
Figura 70. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cal)	128
Figura 72. Ficha Técnica Cemento Empleado.....	129
Figura 73. Probeta 1 (5% de Cemento).....	130
Figura 74. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cemento)	131
Figura 75. Probeta 2 (10% de Cemento).....	132
Figura 76. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cemento)	133
Figura 77. Probeta 3 (15% de Cemento).....	134
Figura 78. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cemento)	135
Figura 79. Variación de la Expansión con Agregados	137
Figura 80. Análisis de Resistencia.....	138
Figura 81. Método de Inyección	140
Figura 82. Distribución Refuerzo de Micropilotes	141
Figura 83. Perforación	141
Figura 84. Micropilotes	142
Figura 85. <i>Instalación de Tubería Fija</i>	142
Figura 86. Mezcla	143
Figura 87. Recubrimiento de la Tubería	143
Figura 88. Compactación del Cemento	144
Figura 89. Inyección del Cemento	144

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas de los Sondeos.....	47
Tabla 2 Normas INVIAS.....	50
Tabla 3. Normas Aplicadas.....	51
Tabla 4. Aportación Microcuencas.....	68
Tabla 5. Cantidad y ensayos realizados por sondeo.	78
Tabla 6. Columna Estratigráfica Sondeo 1	81
Tabla 7. Columna Estratigráfica Sondeo 2	83
Tabla 8. Columna Estratigráfica Sondeo 3	86
Tabla 9. Columna Estratigráfica Sondeo 4	88
Tabla 10. Medida en mm de la malla de los Tamices	90
Tabla 11. Resistencia al Corte Directo Material Natural	109
Tabla 12. Variación de Densidad Relativa	110
Tabla 13. H9.1-1 Clasificación de Suelos Expansivos	111
Tabla 14. Potencial de Expansión de los Suelos	111
Tabla 15. Condiciones de Presión de Expansión de los Suelos	112
Tabla 16. Condición de Expansión del Material Natural	116
Tabla 17. Clasificación General del Tipo de Arcilla.....	118
Tabla 18. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cal)	124
Tabla 19. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cal)	126
Tabla 20. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cal)	128
Tabla 21. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cemento)	131
Tabla 22. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cemento).....	133

Tabla 23. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cemento).....	135
Tabla 24. Comparación del Potencial de Expansión.....	136
Tabla 25. Resistencia al Corte Directo con Aditivos	136
Tabla 26. Análisis de Consolidación	139
Tabla 27. Dosificación.....	145

Es importante aclarar que la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, no asume la responsabilidad directa del contenido, los resultados o las conclusiones del trabajo de grado. La autoría intelectual recae en los autores del presente trabajo Andrés Felipe López Garrido y Julián Darío Rodríguez Botía. La Universidad Santo Tomás seccional Tunja, a través de sus docentes y tutores, brinda orientación y apoyo, pero no se hace responsable de los hallazgos o las opiniones expresadas en el trabajo nombrado "IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN PARA MATERIALES CON COMPORTAMIENTO COMPLEJO DE LA CÁRCAVA DEL SECTOR SUR-ORIENTAL DE LA CIUDAD DE TUNJA".

RESÚMEN

En los últimos treinta años, Tunja ha presentado un aumento en su crecimiento urbano y poblacional, lo que ha llevado a la ocupación de zonas naturales no aptas para la construcción según lo indica la Alcaldía de Tunja, procuraduría y curadurías. Un ejemplo de ello son las zonas con presencia de materiales de comportamiento complejo como sectores de cárcavas ya que son materiales susceptibles a presentar una erosión severa y además de esto podrían generar un riesgo inminente en las edificaciones y estructuras presentes y a las futuras construcciones en estas zonas.

Este trabajo está orientado en analizar métodos para la estabilización de suelos con comportamiento complejo mediante la implementación de aditivos como son la cal y el cemento, con el objetivo de minimizar el impacto que genera el proceso de carcavamiento en las zonas aledañas a la cárcava de Cooservicios, en donde se pueden implementar como agentes estabilizantes, para la mitigación del impacto en suelos con estas características con la intención de prevenir posibles afectaciones arquitectónicas, estructurales o funcionales, que ocasionan asentamientos o fenómenos de expansión que puedan afectar la integridad de las edificaciones.

Es importante tener en cuenta la conservación del medio ambiente y el bienestar de los habitantes del sector, lo que hace que este se vuelva un tema de gran importancia y se busque la forma de implementar métodos que sean funcionales, y viables, para estabilizar el material presente en una zona de cárcava, ya que actualmente la forma más común es hacer un relleno con escombros, o materiales no seleccionados, generando con esto, una pérdida en la homogeneidad de los materiales, además de la presencia diferentes porosidades, que pueden ocasionar afectaciones representativas en épocas de altas precipitaciones, ya que el terreno se encontraría en su nivel máximo de saturación, donde todos sus niveles de vacío están ocupados por agua afectando indirectamente a las estructuras presentes en el sector. Otro factor que influye en el crecimiento de las cárcavas es el arrojo de basuras y desechos, ya que estos impiden el flujo normal del agua, produciendo estancamientos en algunos sectores, creando surcos en el terreno y aumentando su impacto ambiental.

Palabras Clave: Cárcava, erosión, edificación, estabilización, mitigar, escombros, impacto ambiental.

ABSTRACT

In the last thirty years, Tunja has shown an increase in its urban and population growth, which has led to the occupation of natural areas not suitable for construction as indicated by the Mayor's Office of Tunja, the attorney general's office and guardianships. An example of this are areas with the presence of materials with complex behavior such as gully sectors since they are materials susceptible to severe erosion and in addition to this they could generate an imminent risk in the present buildings and structures and in future constructions in these areas.

This work is aimed at analyzing methods for the stabilization of soils with complex behavior through the implementation of additives such as lime and cement, with the objective of minimizing the impact generated by the excavation process in the areas surrounding the Cooservicios gully. , where they can be implemented as stabilizing agents, to mitigate the impact on soils with these characteristics with the intention of preventing possible architectural, structural or functional effects, which cause settlements or expansion phenomena that may affect the integrity of the buildings.

It is important to take into account the conservation of the environment and the well-being of the inhabitants of the sector, which makes this become an issue of great importance and a way to implement methods that are functional and viable to stabilize the material is sought. present in a gully area, since currently the most common way is to fill with rubble, or unselected materials, thereby generating a loss in the homogeneity of the materials, in addition to the presence of different porosities, which can cause damage. representative in times of high rainfall, since the land would be at its maximum level of saturation, where all its void levels are occupied by water, indirectly affecting the structures present in the sector. Another factor that influences the growth of gullies is the dumping of garbage and waste, since these impede the normal flow of water, producing stagnation in some sectors, creating furrows in the ground and increasing its environmental impact.

Keywords: Gully, erosion, building, stabilization, mitigate, debris, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

Los suelos son parte fundamental de la ingeniería civil, ya que son el medio para construir infraestructura como son edificaciones, carreteras, puentes, muros de contención, sin embargo, de acuerdo a factores como, su génesis, procesos medioambientales, como también agentes químicos, pueden verse alterados de forma física o mecánica, dando origen a suelos con características especiales que pueden ser expansivos o dispersivos, que son denominados materiales de comportamiento complejo, los cuales ante la aplicación de cargas, variación en su contenido de agua, o alteración de niveles de esfuerzo, pueden llegar a presentar cambios geo mecánico, afectando edificaciones que se encuentren apoyadas sobre estos materiales.

Una situación particular que se tiene a nivel regional y local, es la presencia de materiales expansivos los cuales al entrar en contacto con el agua, por precipitaciones y posterior infiltración, generan una alteración química del suelo, provocando con esto un cambio volumétrico, el cual, al presentarse de forma cíclica, puede llegar a generar la contracción y expansión del material, afectando sus características mecánicas, y a mediano plazo, dando origen a un fenómeno de dispersión, el cual es el agente generador de las geoformas conocidas como cárcavas, las cuales son concavidades formadas por el flujo de agua que va arrastrando parte del material hasta la parte más baja, haciendo que el terreno pierda consistencia debido a la presencia de suelos expansivos y dispersivos, volviendo este un suelo vulnerable.

Los suelos expansivos presentan cambios de volumen cuando están en contacto del agua por infiltración o por agua escorrentía, los cuales presentan contracciones durante periodos secos y expansiones en momentos donde sobrepasa su saturación. Por otro lado, los suelos dispersivos se desintegran en partículas finas al estar en contacto con el agua, generando la pérdida de cohesión y resistencia.

Este trabajo de grado tiene como objeto, identificar alternativas de estabilización para materiales con comportamiento complejo en la cárcava del barrio Cooservicios y sectores aledaños, siguiendo un proceso de caracterización del material e identificación de sus características físico – mecánicas para posteriormente analizar la viabilidad de la implementación de agregados como son el cemento y la Cal para posteriormente conocer con cuál de los dos agregados se obtienen mejores resultados.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La ciudad de Tunja, debido a la geomorfología que presenta, y disposición de los materiales en superficie (intercalaciones de arena y arcillas), cuenta en diferentes sectores con suelos de comportamiento complejo, principalmente suelos expansivos y dispersivos, que a través del tiempo, han ocasionado procesos de carcavamiento, destacando tres zonas de gran importancia; el sector norte (Sector Asís), Sector Sur – occidental (Barrio Paraíso), y el Sector Sur oriental (Barrio Cooservicios), donde el aumento poblacional ha sido el causante de ocupación de estos terrenos de forma parcial para el desarrollo urbanístico, también utilizadas como zonas de disposición de escombros y desechos de construcción, o como sitios de invasión, generando con esto un riesgo inminente ante procesos de inundación, movimientos, deslizamientos, entre otros. La problemática que se presenta en estos sectores es la afectación a las edificaciones cimentadas sobre materiales que son complejos ya que tienen una tendencia natural a expandirse y contraerse al estar en contacto con el agua además que se presenta un fenómeno de dispersión, lo que provoca daños como fisuras, agrietamientos y asentamientos en las edificaciones y otro tipo de construcciones.

Como resultado en el área de estudio, las edificaciones, vías y estructuras construidas en la zona aledaña a la Cárcava de Cooservicios, han presentado grandes asentamientos lo que ha provocado daños estructurales como agrietamientos y generando inseguridad para los habitantes de este sector.

1.1. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto tiene como objeto evaluar y encontrar una alternativa viable para la estabilización de las propiedades químicas y mecánicas del material que se encuentra presente en la zona aledaña de la cárcava del barrio Cooservicios, las cuales están compuestas por suelos altamente expansivos y dispersivos, los cuales son los que tienen un límite líquido superior al 50%, para esto, se propone la adición de cal o cemento que puedan contribuir a la mitigación del impacto de estos suelos.

Al implementar estas alternativas de disminución del impacto en los sectores afectados, se busca generar un bienestar a los habitantes del sector y una conservación del medio ambiente, esto al evitar riesgo de asentamientos o daños estructurales que se presenten en construcciones realizadas en estos sectores.

También se busca promover la aplicación de estas técnicas de reducción de impacto en otros sectores que estén compuestos por este tipo de suelos y estén siendo afectados. De esta manera, se podría llevar a cabo proyectos de construcción de forma más segura y sostenible, sin poner en riesgo la integridad de las estructuras y de las personas a largo plazo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de los materiales encontrados en zonas aledañas a la cárcava del barrio Cooservicios con el fin de establecer el método de estabilización óptimo para mejorar las propiedades del suelo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una identificación en campo de los materiales presentes en la cárcava del barrio Cooservicios, mediante exploración para establecer la tipología de materiales y secuencia estratigráfica.
- Realizar una caracterización geotécnica de los materiales presentes en la zona de cárcavas, con el propósito de determinar su comportamiento, frente a las cargas producidas por edificaciones y cambios de precipitación.
- Identificar la mezcla requerida para la estabilización más adecuada mediante diferentes proporciones de cal y cemento, que garantice un comportamiento óptimo y seguro de las edificaciones.

3. MARCO TEÓRICO

Según el Manual Técnico de estabilización de Cárcavas en Cuencas Hidrográficas, las cárcavas son una consecuencia de la acumulación en gran cantidad de agua en zonas específicas, donde el escurrimiento superficial es más rápido, y esto produce erosión y remoción de terreno. Estas se forman por falta de control o estructuras adecuadas para la evacuación del agua escorrentía, lo que produce daños en zonas aledañas, aumentando deslizamientos y erosiones del terreno.

En el presente manual, se presenta una clasificación de cárcavas según su tamaño donde se evidencian tres tipos: pequeña no mayor a un metro de profundidad, medianamente profundas contemplando profundidades entre 1 – 5 metros y profundas siendo mayores a 5 metros de profundidad. También un aspecto a tener en cuenta es que las cárcavas son activas o no activas, de corte vertical recto, inclinado o con caída suave en sus taludes, siendo más fácil de estabilizar cuando tienen un talud inclinado que recto.

El principal objetivo de estabilizar una cárcava es disminuir la velocidad de agua escorrentía para reducir así el poder erosivo y evitar el incremento de su profundidad y anchura. De acuerdo al tamaño de la cárcava también hay que tener en cuenta factores de relleno (material vegetal, rocas, etc...) siguiendo las curvas de nivel de acuerdo a la pendiente del terreno, aguas arriba de la cárcava.

Otro aspecto a tener en cuenta mencionado en el manual es realizar un reconocimiento del área de trabajo para así identificar si en la zona se presentan ríos, arroyos, vías de comunicación, bosques y matorrales, pastizales o por el contrario construcciones u obras civiles. (Soto A, Osiris O, 2001) [1]

Villada D, Cifuentes R, Ayala R, Doering H, Müller K, llevaron a cabo investigaciones en el año 1997 en la ciudad de Cali con el propósito de controlar la erosión de barrancos. Estas investigaciones se centraron en el uso de vegetación, como *Brachiaria Dictyoneura* y *Desmodium Ovalifolium*, las cuales demostraron una notable resistencia. Después de 330 días desde la siembra, se observó un promedio de 54,5 cm de longitud de tallo en estas plantas. Se llevaron a cabo pruebas en dos ubicaciones diferentes: la vereda San Pablo, situada a una altitud de 1100 m.s.n.m en el municipio de Buga, y la vereda Porvenir.

Ambas plantaciones se realizaron en taludes de una cárcava sin ningún tipo de vegetación para así poder analizar las diferencias presentadas en los dos tipos de suelos con cada una de las leguminosas. En el municipio de Buga con *Desmodium Ovalifolium* no se presentó ningún desarrollo vegetativo mientras que en el caso del municipio de Dagua con la semilla *Brachiaria Dictyoneura* depende más de la parteo geomecánica del suelo. Para estas plantaciones fueron utilizados abonos como micorriza y gallinaza donde en el municipio de Buga los mejores resultados se obtuvieron con gallinaza mientras que en Dagua se encontraron mejores resultados con micorriza.

Haciendo un análisis de los resultados y viendo que tan optima es su aplicación, se evidencia que ambos materiales resisten las condiciones climáticas en el área de estudio, pero en la relación de costos sale un precio muy elevado para su aplicación teniendo en cuenta el año de estudio y el incremento de precios en la actualidad. Se recomienda

identificar otros métodos de estabilización más eficaces y baratos que garanticen una mejor relación costo beneficio. (Villada D, Cifuentes R, Ayala R, Doering H, Müller K, 1997) [2]

También están los suelos dispersivos, estos se componen por arcillas que resisten a la erosión lo cual permite circular agua a través de estos debido a su baja permeabilidad, sin embargo, algunos de estos suelos presentan dispersión y son susceptibles a hacer arrastrados por el agua escorrentía creando conductos y generando asentamientos; todo esto depende de la mineralogía presente, el agua que se infiltre y las propiedades químicas que tenga la arcilla.

La diferencia que se encuentra entre las arcillas dispersivas y las resistentes a la erosión depende de los cationes que se disuelven en el agua y están adheridos a la capa de difusión que tiene la partícula. En las arcillas que son dispersivas se encuentran los cationes de Sodio (Na), y en las ordinarias predomina el Calcio (Ca), Potasio (K) y Magnesio (Mg).

Para identificar suelos dispersivos es necesario realizar un laboratorio conocido como ensayo de Pinhole, para analizar la existencia de arcillas dispersivas en suelos empleados para material de construcción de obras civiles, en la cual se pasa agua destilada a través de un agujero con un diámetro de 1mm con diferentes cargas hidráulicas. El resultado que se obtiene del ensayo se evalúa por medio de la turbidez que tenga el agua, velocidad de flujo y el diámetro del agujero al final, teniendo estos datos se tienen unos criterios de clasificación como se presenta en la tabla.

Clasificación	Carga de agua (plgd)	Tiempo de ensayo para una carga dada (min)	Gasto de agua a través de la muestra (ml/s)	Color del agua al final del ensayo	Tamaño del agujero al final del ensayo (diam. aguja)
D1	2	5	>1,5	Muy turbia	2
D2	2	10	>1,0	Turbia a débil	2
ND4	2	10	<0,8	Débil, pero claramente visible	1,5
ND3	7-15	5	>2,5	Débil, pero claramente visible	2
ND2	40	5	>3,5	Clara o escasamente visible	2
ND1	40	5	<5,0	Cristalina	Sin erosión

Figura 1. Criterios para clasificar Suelos en el Ensayo de Pinhole

Fuente: (González Y, 2008)

Teniendo en cuenta la gran cantidad de obras construidas en suelos dispersivos es necesario buscar la forma de estabilizarlos, de esta forma eliminar la propiedad que produce la dispersividad de las arcillas. Con base en esto, se buscan aditivos como cemento, cal que son viables para su aplicación.

El cemento a través del tiempo ha utilizado para estabilizar suelos dispersivos, en la investigación se cita un estudio realizado por Indraratna en el 2008, en el cual el suelo está mezclado con el aditivo, teniendo buenos resultados cuando se alcanzan grados mayores al 95% de compactación en comparación con el peso específico seco.

En el caso del uso de Cal se tienen dos tipos, La cal viva se emplea en casos donde es necesario disminuir la humedad del suelo, para fines de compactación u otro uso. La hidratación de la cal viva produce gran cantidad de calor, la cual hace que el suelo se seque.

La cal hidratada es insoluble y al ser mezclado con agua es una suspensión. Sin embargo, cuando migran los iones de calcio desde las partículas de cal, hacia las arcillas se produce aglomeración y floculación, que, en el transcurso de varias horas, se reduce el índice plástico.

Teniendo en cuenta la investigación podemos concluir que los aditivos más efectivos son el cemento y la cal (viva o hidratada), también existen otros métodos naturales como el uso del yeso y la zeolita, pero hasta el momento debe seguir siendo estudiada su efectividad para la implementación. (González Y, 2008) [3]

La investigación realizada por Caicedo B, Patarroyo A, en la ciudad de Bogotá (Cundinamarca) enfocada en la caracterización de suelos con propiedades expansivas que poseen alta sensibilidad a cambios de humedad, determina que cualquier modificación o afectación que se produzca en la superficie del suelo se verá reflejada en el suelo de cimentación.

En los resultados obtenidos se encontró la importancia de la caracterización al principio en el estudio de materiales y suelos. En esta investigación de caracterización de suelos con propiedades expansivas se utilizaron muestras idénticas para realizar el proceso de caracterización; pues hubo una gran diferencia en la curva de intrusión y extrusión como lo fue en la distribución de tamaños de poros.

Cabe resaltar que estos resultados son relevantes en la investigación para entender que hay una variabilidad y puede existir en los estudios de materiales, incluso al usarlos en muestras muy similares en cuanto a propiedades físicas. Siendo así, se nombra que las diferencias halladas pueden estar relacionadas con factores como el cambio del contenido de agua y su densidad, ya que estas pueden influir considerablemente en las propiedades del material.

Se encontró una variación de expansión del suelo con respecto al tiempo, pues durante seis años se hizo el seguimiento de cuán expansivo es el suelo, se llegó a observar que al haber transcurrido dos años el suelo tuvo una expansión considerablemente alta y durante los siguientes 4 años fue disminuyendo, pero sin embargo llegó a expandirse casi el doble de lo que ya estaba expandido.

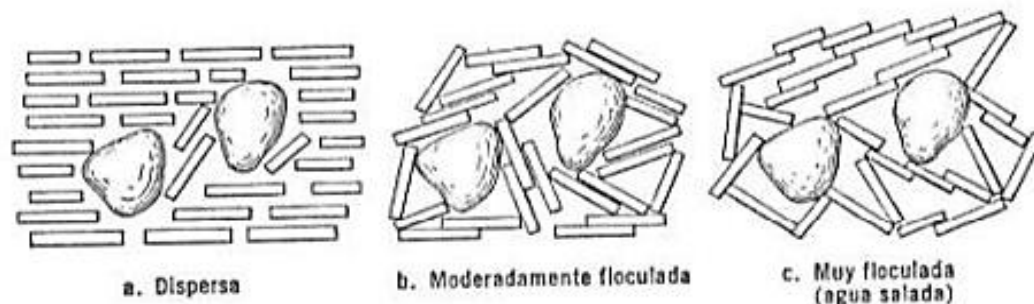


Figura 2. Tipos de Material

Fuente: (Sowers G. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 1972)

Dado lo anterior se puede concluir que es de gran importancia considerar el cambio de las propiedades físicas de las muestras en los estudios de materiales y realizar múltiples mediciones y de esta manera obtener una caracterización más confiable.

Este artículo sugiere que la elección debe ser cuidadosa en cuanto a condiciones experimentales y el análisis estadístico adecuado podrían ayudar a disminuir el cambio en los resultados y mejorar la calidad del ensayo. (Caicedo B, Patarroyo A, 2006) [4]

En una investigación realizada por Sierra A, Escudero K, en el año 2016 se determinó el grado de dispersividad en suelos caolinticos modificándolos con sales de potasio y calcio. Para este proceso primero se tuvo que determinar los suelos dispersivos, ¿que son?, ¿cómo se presentan?, ¿por qué se producen? y algunos ensayos de laboratorio para determinar la dispersividad de las arcillas.

Allí se muestran algunas investigaciones en el tiempo y alrededor del mundo, donde se encuentra que han sido un gran problema a la hora de hacer una construcción.

La dispersividad de suelos se da específicamente en suelos arcillosos, este tipo de material en los suelos no es apto para realizar ninguna obra civil, así lo advierte la NSR-10 en el Capítulo H.9.2.5: "No deben utilizarse por ningún motivo materiales identificados o sospechosos de ser dispersivos, como materia prima para rellenos o terraplenes, hasta tanto no se compruebe su naturaleza por medio de ensayos apropiados."

Según la literatura y sus autores, se sugiere como medida preventiva la adición de yeso como una alternativa a problemas de dispersión; también se considera un plan de siembra en la cuenca, por ejemplo el fique que es una planta de raíz profunda ya que esta nos ofrece una resistencia adicional que minimice los riesgos de deslizamientos; lo que no se tuvo en cuenta es que no todos los suelos tienen las mismas características y que no en todos los climas o terrenos con erosión se puede sembrar este tipo de plantas.

Dados los anteriores conceptos en la investigación experimental se determinó que el ensayo de Pinhole en la actualidad es uno de los más utilizados para determinar la dispersividad en arcillas y por su confiabilidad en sus resultados. También se necesitó de más de un ensayo para tener resultados más acertados.

Al realizar el ensayo de Pinhole adicionándole Caolinita a un porcentaje de 10% de cloruro de sodio y cloruro de potasio siendo analizadas por separado se obtuvo un resultado muy diferente en cada uno, siendo uno de tipo dispersivo y otro de tipo no dispersivo. (Sierra A, Escudero K, 2016) [5]

Un estudio realizado en la provincia occidental de Jilin, China, sobre la durabilidad de suelos dispersivos mejorados con alumbre, aborda en primer lugar la problemática de la salinidad en estos suelos y cómo mejorar la seguridad de los proyectos de obras civiles.

El alumbre es un material altamente soluble en agua, más respetuoso con el medio ambiente que la cal, y con una evidente capacidad para mejorar la dispersividad del suelo. Los resultados del estudio demostraron que el suelo dispersivo estabilizado con alumbre presenta una reducción considerable en su dispersión, así como un aumento en su índice de plasticidad y compresibilidad.

Es importante tener en cuenta el tipo de suelo, ya que el estudio se realizó en un suelo congelado debido a las estaciones presentes en este país. Se especula acerca de la influencia de este proceso en los suelos, pues el ciclo de congelación y descongelación produce diferentes cambios en el suelo, como lo son: expansión y contracción del suelo, cambios en la porosidad, movimiento del agua y cambios en la resistencia del suelo, lo que afecta a su estructura.

En particular, el suelo de Qian de la provincia de Jilin es un suelo con alto contenido de sal y dispersión extrema, por lo que su durabilidad puede ser analizada mediante pruebas mejoradas.

Al tratar el suelo con un 2,5% de alumbre, los iones de sodio son reemplazados por iones de aluminio, lo que resulta en una disminución del espesor de la capa unida débilmente. La reacción de hidratación de los iones de aluminio también reduce los valores de pH del suelo. (Xiaoqing Y, Wang X, Chen H, Zhiyong S, 2021) [6]

En el diseño y construcción de proyectos de ingeniería civil, específicamente de carreteras, que se realizan en suelos con alguna problemática, como suelos blandos, expansivos y otros tipos de suelo, se requiere una estabilización para mejorar propiedades del subsuelo. Si no se llegan a estabilizar estos suelos se podrían presentar daños graves a la infraestructura. Con el pasar de los años, se han realizado estudios para implementar métodos en la práctica de la construcción.

Los aditivos químicos se utilizan con mayor frecuencia para estabilizar los suelos mejorando sus propiedades geomecánicas. La utilización de aditivos químicos, como cal, cemento y cenizas volantes, modifica las propiedades geomecánicas del suelo, lo que da como resultado un terreno de soporte de cimientos más sólida.

Además, se mencionan las prácticas de construcción en campo, junto con el control de calidad y las evaluaciones seguidas, por otro lado, se presentan las técnicas de medición y pruebas utilizadas para evaluar la efectividad de los métodos de estabilización del suelo.

El análisis incluye el rendimiento mecánico y el comportamiento a largo plazo de los suelos estabilizados.

Finalmente, se lleva a cabo el análisis de los métodos de aplicación de campo y el desempeño de diferentes estabilizadores. Además, se describen algunos de los desafíos que aún se enfrentan en la implementación exitosa de estos métodos de estabilización y se discuten las perspectivas futuras para la investigación y el desarrollo de nuevos enfoques de estabilización de suelos. Este artículo se proporciona una visión general completa y detallada de los métodos de estabilización química de suelos utilizados en la práctica. (Puppala A, Pedarla A, Bheemasetti T, 2015) [7]

Realizar la estabilización de los suelos es fundamental en la construcción de proyectos de ingeniería civil, especialmente en la construcción de carreteras sobre suelos problemáticos como suelos blandos y expansivos. Sin la estabilización, la infraestructura sufrirá graves daños que se traducirán en un rendimiento deficiente. Con el paso de los años, se han llevado a cabo varios estudios para abordar el rendimiento de las alternativas para la estabilización de suelos y las prácticas de construcción. Estas prácticas de estabilización se pueden clasificar en cuatro categorías principales de métodos basados en mecanismos de procesamiento de mejora del suelo: estabilización mecánica, estabilización química, estabilización térmica y estabilización eléctrica.

Entre estos, los aditivos químicos, como la cal, el cemento y las cenizas volantes, se utilizan con mayor frecuencia para estabilizar los suelos mejorando sus propiedades inherentes. La estabilización a través de aditivos químicos modifica las propiedades geomecánicas del suelo, lo que da como resultado una infraestructura de soporte de cimientos más sólida.

En este contexto, se presenta un estudio de revisión crítica sobre el rendimiento de la ceniza de combustible pulverizada (PFA) como agente estabilizador.

Además, se aborda la cuestión de la contaminación del suelo y su remediación. La contaminación del suelo, especialmente por metales tóxicos peligrosos, contribuye sustancialmente a la contaminación ambiental. La resistencia de suelos contaminados se mejora significativamente con el uso de aglutinantes PFA. La resistencia a la compresión no confinada (USC) exhibe una correlación positiva con el aumento de los aglutinantes de PFA y los contenidos de humedad, lo que aumenta la resistencia del suelo bajo carga estática.

En términos legales, el estado actual del marco legislativo mundial en cuanto a la utilización de cenizas volantes se caracteriza por diversas regulaciones como lo son las normativas de calidad del aire, almacenamiento seguro, disposición adecuada, análisis de contenido y normativas de uso beneficioso; entre los países de América, Asia y Europa. Por lo tanto, es necesario superar las barreras para desarrollar un marco regulatorio global común que determine las acciones de incorporación de cenizas volantes en la estabilización de suelos. (Koukoulas N, Tirologou P, Koutsovitis P, Karapaños D, Karkalis C, 2022) [8]

En el estudio realizado por Camacho J, Reyes O, Mayorga C, Méndez G y titulado evaluación de aditivos para el tratamiento de arcillas altamente expansivas se trata el uso de cenizas volantes, aceite sulfatado y cal, para de esta forma disminuir las propiedades que generan la expansión de este material. Después de realizar caracterización física y mecánica por medio de ensayos de laboratorio con diferentes porcentajes añadidos a la muestra, se logró identificar que tan viable era cada uno de los aditivos.

Las arcillas especialmente las que presentan características expansivas que están propensas a cambios volumétricos al estar en presencia del agua, de estas existen tres familias de minerales que hacen parte de la formación básica: caolinitas, ílitas y montmorillonitas. No solamente los suelos que son arcillosos son expansivos por los componentes químicos, también por la presencia de minerales como la montmorillonita la cual permite mayores porcentajes de hinchamiento.

Las características expansivas de este material se encuentran dentro de los siguientes valores: límite líquido mayor a un 110 %, límites plásticos entre 64% y 26%, índice de plasticidad superior al 80%, actividad entre 7,79 y 4,36, contenidos de montmorillonita entre 48% y 80% y capacidad de intercambio catiónico cercano a 1,035 meq/g.

En la norma sismorresistente de 1998, se evidencia como identificar los suelos expansivos:

Potencial de expansión	Expansión Consolidómetro (%)	LL (%)	LC (%)	IP (%)	Partículas menores 1 μ (%)	Expansión libre en probeta (%)
Muy alto	>30	>63	<10	>32	>37	>100
Alto	20-30	50-63	6-12	23-45	18-37	>100
Medio	10-20	39-50	8-18	12-34	12-37	50-100
Bajo	<10	<39	>13	<20	<17	<50

Tabla 3. Evaluación de Potencial de Expansión

Fuente: (NSR-98)

Luego de realizar la adición de cada uno de los aditivos en diferentes porcentajes para observar su cambio en la expansión, se observó que en el caso de las cenizas volantes hay que adicionarlas en cantidades excesivas para disminuir un poco su expansión, lo cual no lo hace viable. El aceite sulfatado requiere condiciones ambientales buenas para que se desarrolle su efecto lo que hace que sea incierta su efectividad. La cal con un porcentaje del 10% logra reducir considerablemente las propiedades expansivas de las arcillas lo que hace viable su aplicación comparando resultados vs costo. (Camacho J, Reyes O, Mayorga C, Méndez G, 2006) [9]

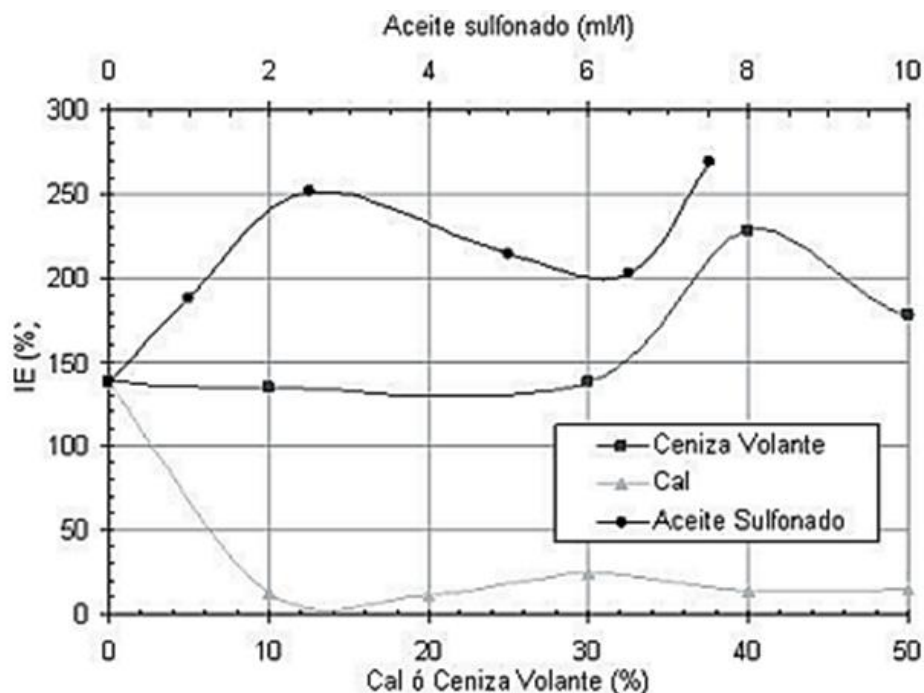


Figura 4.Índice de Expansión

Fuente: (Camacho J, Evaluación de Aditivos Usados en el Tratamiento de Arcillas Expansivas, 2012)

Se buscan diferentes soluciones geotécnicas para el tratamiento de la expansión de suelos, como es el caso de un estudio donde se implementaron alternativas de bajo costo para lograr estabilizar estos suelos. El primer método fue con materiales de bajo costo y fácil adquisición en el mercado, utilizando arena de mar y arena de río, los cuales son fáciles de conseguir cerca de la zona del estudio y también la cal viva, ya que tiene un bajo costo.

En la búsqueda de diferentes soluciones geotécnicas para el tratamiento de la expansión de suelos se utilizaron diferentes porcentajes de cada uno de estos materiales previamente mencionados, buscando disminuir el potencial expansivo de un suelo con estas características.

Primero Moreira Z y Afranio C distribuyeron en varias muestras arena de mar con 20% y observaron una disminución del potencial expansivo del 19%, con 30 % de arena de mar se tiene una disminución del 80 % y con 40% de arena se logró disminuir el potencial expansivo en 87%.

Por otra parte, con arena de río se logró en unas muestras disminuir el 13% el potencial expansivo, pero con 40% se experimentó un incremento en su potencial expansivo en 30% pero el esfuerzo expansivo si disminuyó en 69%. En el caso de la Cal viva, se utilizaron porcentajes más bajos en su adición a la muestra siendo 3%, 6% y 10%, lo que produjo una disminución del potencial expansivo en más del 65%, así mismo el esfuerzo expansivo también disminuyó en 87%, siendo la Cal un método efectivo y de bajo costo para el tratamiento de suelos expansivos.

Se hizo el análisis de otros métodos que son más costosos como son el reemplazo del suelo expansivo por otro no expansivo como es el caso de los materiales granulares (arena y grava) pero sería de alto costo debido a que prevalecen los suelos expansivos y no hay suelos granulares en grandes cantidades.

Por último, se analizó el aislamiento del suelo expansivo a fin de evitar cambios de humedad. Construyendo obras de drenaje, fundamentalmente el subsuperficial, con el propósito de interceptar cualquier flujo por gravedad, siendo efectivo en forma de drenajes. (Moreira Z, Afranio C, 1986) [10]

La estabilización de un suelo con problemas de expansión se hace por medio de una mezcla suelo-cemento para mejorar las condiciones mecánicas, por un lado, es aglutinante de gravas, arenas y limos, desarrollando el papel que haría el concreto, por otro lado, el hidrato de calcio, que estando en contacto del cemento, transfiere iones de calcio que, al tener relación con el agua, mueve algunas moléculas de estas, interpuestas entre laminillas de arcilla. Como resultado se disminuye considerablemente la porosidad y la plasticidad, así mismo aumenta su resistencia y durabilidad.

Al mejorar las características de un suelo con cemento gris, se hace para mejorar su resistencia, pero a su vez disminuye la plasticidad que el material presente. A todos los suelos se le puede hacer un proceso de estabilización con cemento a excepción de suelos con grandes cantidades de materia orgánica. En el caso de los suelos arcillosos o limosos, requieren una mayor cantidad de cemento para lograr los objetivos previamente mencionados.

También hay que tener en cuenta el factor económico al agregar cemento para estabilizar un material, previamente hay que realizar ensayos de laboratorio con diferentes porcentajes con el fin de identificar con que cantidad se presentan mayores cambios y no se desperdicie material. Es necesario tener en cuenta la granulometría, donde el porcentaje que pase por el tamiz N° 200 sea menor del 50% y la plasticidad donde se tenga un límite líquido menor al 50% y un índice de plasticidad de 25%, cabe aclarar que son datos aproximados y todos los materiales pueden presentar un comportamiento diferente, por ende, es necesario primero caracterizarlos y conocer sus propiedades.

Para que se tenga éxito en la estabilización con cemento, hay que tener en cuenta factores como: porcentaje necesario de cemento, contenido de agua y grado de compactación.

Es por esto que a las mezclas se les debe realizar una serie a ensayos como: granulometría, humedad natural, compactación, durabilidad y compresión, que determinaran la dosificación del cemento que se empleará en la mezcla y así se obtendrá el resultado esperado. (Hernández H, Teresa D, Lara L, 2009) [11]

Los suelos con problemas de expansión podrían generar daños a la integridad de las personas, también afectaciones arquitectónicas y estructurales a edificaciones presentes, por movimientos causados a cuenta de la humedad, de esta manera se identifican cinco fenómenos que conlleva la expansión de un suelo:

Movimiento Céntrico: se origina en la parte central de la estructura, la cual rompe el equilibrio en condiciones de evaporación por consiguiente la humedad se acumula en el

subsuelo, formando grietas en forma vertical, horizontal y diagonal. Estas grietas verticales son más grandes en la parte superior también generando grietas horizontales a lo largo del borde del techo.

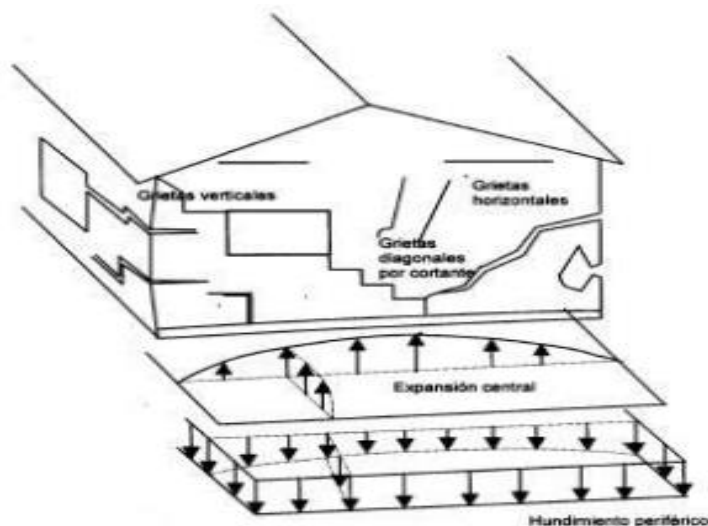


Figura 5. Agrietamiento por Movimiento Céntrico

Fuente: (Fredlun & Rahardjo 1993)

Movimiento Perimetral: se forman con patrón de discos en el perímetro de la estructura, al aumentar su humedad en el subsuelo el fenómeno de expansión se genera en el momento que se presenta la construcción. El levantamiento de las puntas de la estructura genera grietas desde la esquina inferior a la superior y el ancho de las grietas es mayor en la parte inferior de la misma.

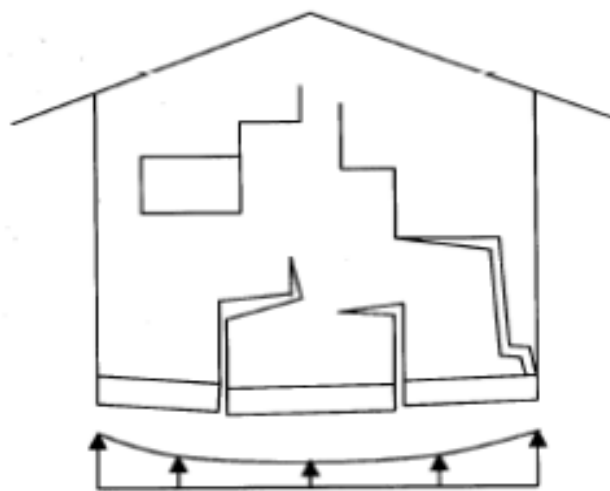


Figura 6. Agrietamiento por Movimiento Perimetral

Fuente: (Fredlun & Rahardjo 1993)

Movimiento Cíclico: Se relaciona con cambios de expansión y contracción donde el drenaje, evaporación y precipitaciones generan aumento o disminución de humedad en el subsuelo, lo que genera daños severos, presentándose grietas cruzadas diagonales.

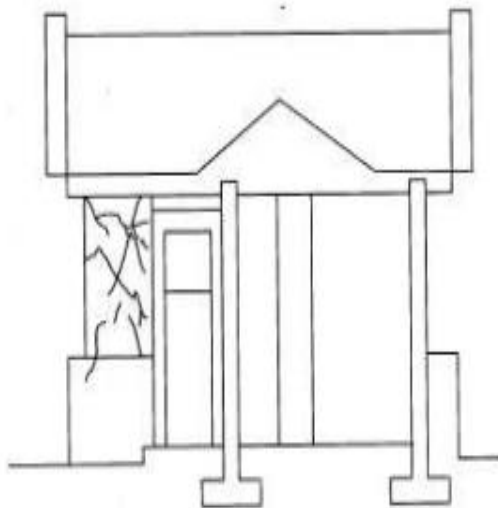


Figura 7. Agrietamiento por Movimiento Cíclico

Fuente: (Fredlun & Rahardjo 1993)

Empuje Lateral: el problema de la expansión se manifiesta como un cambio volumétrico en todas las direcciones y estos movimientos horizontales se evidencian con movimiento o inestabilidad del talud y empujes laterales sobre un muro de contención.

Agrietamiento: La contracción se produce en dirección vertical y horizontal, generando esfuerzos a tensión y si el esfuerzo es sobrepasado por la resistencia a la tensión del suelo, se presentan grietas por secado, las cuales reducen el confinamiento lateral de las estructuras generando la acumulación de agua y disminuyendo la estabilidad del talud. (Merchán S, 2009) [12]

Las cárcavas están compuestas de pequeños valles de paredes verticales y perfiles longitudinales que tienen una pendiente elevada por donde transitan flujos de agua y eran sujetos a una erosión severa. La existencia de estas indica que el terreno ha sufrido una serie de procesos de degradación de cárcavas. La erosión es un proceso complejo de tratar y con el pasar del tiempo se va incrementando la afectación que se tiene debido a condiciones climáticas con un uso inadecuado del terreno y una falta de drenaje de estas zonas.

La evolución y forma de las cárcavas dependen de varios factores:

- Factores del suelo: contenido de humedad, presencia de erosión, mineralogía del suelo, tipo de material presente.
- Factores topográficos: tamaño de la cuenca de aportación, pendientes y exposición
- Factores climáticos: intensidad, frecuencia y duración de precipitaciones.

- Factores inducidos: cambio de cobertura vegetal producida por acciones humanas, por el ganado o cultivos, fuertes vientos y acumulación de agua que favorecen el carcavamiento.

Es necesario seguir unos procesos para lograr controlar estos factores en cárcavas como son determinas las causas, impactos y efectos significativos para adoptar medidas proporcionales a corregir. También restaurar el balance hídrico e implementar técnicas de manejo para disminuir la infiltración y realizar una construcción de obras de drenaje para evitar el empozamiento del agua. (Gutiérrez V, 2012) **[13]**

Es imprescindible una metodología detallada para mejorar la calidad de suelos con características expansivas mediante la implementación del concepto de reforzamiento de suelos utilizando fibras, específicamente el enfoque de reforzamiento. El suelo en cuestión es una arcilla altamente compresible de tipo CH, que presenta un notable potencial de expansión, habiéndose establecido esta característica a partir de ensayos de límites de Atterberg.

La estrategia de refuerzo se ideó mediante la introducción de fibras sintéticas discretas (polipropileno) de forma aleatoria en el suelo. Estas fibras se dispersaron uniformemente en la masa del suelo, generando así un compuesto por ambos materiales. Previamente a la implementación de la metodología, se realizó un completo análisis geotécnico del suelo. Posteriormente, se hizo un laboratorio de compactación para obtener los valores óptimos de contenido de humedad y peso específico. Estos parámetros fueron fundamentales para la ejecución exitosa del programa experimental bajo estas condiciones definidas.

Dentro del proceso experimental, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión inconfiada tanto en el suelo modificado original como en diferentes combinaciones de suelo sometido al proceso de fibra reforzamiento. En este último caso, se variaron las longitudes de las fibras (4.75, 9.5 y 19 mm) y los porcentajes de dosificación (0.5%, 1%, 1.5% y 2%). Los datos obtenidos de los ensayos de compresión inconfiada demostraron claramente que la incorporación de fibras tuvo un impacto positivo en el comportamiento mecánico, logrando mejoras sustanciales de hasta un 85%.

Basándose en los resultados de las pruebas de compresión, se decidió considerar la combinación que presentó la mayor resistencia a la compresión (5.42 kg/cm²) como la óptima, la cual consistió en fibras de 9.5 mm con un porcentaje de dosificación de 2%. Posteriormente, se realizaron pruebas adicionales de expansión y consolidación unidimensional, CBR y tensión indirecta tanto en el suelo con aditivos como en el suelo reforzado con la combinación óptima de fibras. La comparación de los resultados de estas pruebas permitió derivar conclusiones finales sobre la efectividad de la metodología de fibra reforzamiento en la mejora de suelos expansivos. (Rosales D, 2014) **[14]**

En la construcción y diseño de infraestructuras, se encuentra comúnmente que los suelos arcillosos no cumplen con los estándares requeridos para ser considerados idóneos como subrasantes. Por esta razón, resulta fundamental aplicar técnicas de mejora. Con el objetivo de abordar esta problemática, se realizó una investigación donde se analizó el

impacto del cemento Portland para poder estabilizar un suelo arcilloso caracterizado por su alta plasticidad.

La investigación abarcó el análisis de las características geomecánicas del suelo en cuestión, en busca de identificar sus propiedades fundamentales. Como parte del proceso de mejora, se optó por emplear cemento Tipo I como aditivo para estabilizar, en diferentes porcentajes que abarcaron entre el 1% y 5% del peso de la muestra.

A través de una serie de ensayos, se evaluaron aspectos importantes del material, como la humedad natural, la granulometría, los límites de contracción, plástico y líquido, así como la compresión Proctor modificado y el índice CBR. Estos ensayos permitieron un análisis completo del cemento Portland como estabilizador en indicadores críticos del suelo, tales como su índice de plasticidad y su índice CBR.

El suelo arcilloso bajo estudio fue clasificado conforme a los criterios establecidos por la AASHTO como A – 7 – 6 (37) y en base al sistema de clasificación unificado de suelos (SUCS) como OH. Con la incorporación de un 5% de cemento, se logró una reducción significativa en su índice de plasticidad, disminuyendo del 44% a un 15%. Además, su índice de contracción también experimentó una disminución de 27% a 19%. De manera aún más destacada, el índice CBR del suelo se elevó de un modesto 1.30% a un prometedor 13.75% al 95% de su densidad seca máxima.

A pesar de la adición de cemento en los porcentajes mencionados, se observó que el suelo todavía conservaba una plasticidad moderada y continuaba siendo propenso a cambios volumétricos. Sin embargo, se logró obtener una subrasante con propiedades regulares a buenas en términos de su índice CBR, logrando esta mejoría únicamente con una incorporación de un 4% de cemento al suelo arcilloso. En resumen, estos resultados demuestran la viabilidad de utilizar cemento Portland como técnica de estabilización para transformar suelos arcillosos de alta plasticidad en subrasantes más adecuadas para construcción. (Velásquez C, 2018) [15]

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación centrada en el uso del cemento como aditivo con el propósito de estabilizar un suelo altamente disperso que se localizó en una carretera en Ecuador. En el transcurso de esta investigación, se tomó en consideración la incorporación de diferentes proporciones de cemento, específicamente el 2%, 4%, 6% y 8%, con el fin de tratar el suelo altamente disperso. Como resultado de este proceso, se observó un incremento notable en el (CBR), la resistencia a la compresión y la densidad máxima del suelo. Al mismo tiempo, se observó una disminución de la dispersividad, la humedad necesaria y los límites de consistencia, incluyendo los límites de Atterberg. Estos cambios demostraron un comportamiento altamente favorable en el suelo.

La metodología adoptada en esta investigación se basó en un enfoque cuantitativo y una parte experimental. Para verificar el análisis planteado, se desarrolló un estudio, que determinó que la proporción necesaria de cemento para estabilizar eficazmente este suelo con características altamente dispersivas del 6%. Cabe destacar que la muestra de suelo con un 6% de cemento presentó un nivel de dispersividad que se clasificó como

"no disperso" según el ensayo de Pinhole, en contraste con la clasificación inicial de "altamente disperso" obtenida mediante el ensayo de Crumb.

Es relevante mencionar que la aplicación del 6% de cemento a la muestra, condujo a un aumento asombroso de 17 veces en el (CBR) en comparación con la muestra no tratada. En lo que respecta a la resistencia de compresión, se observó un incremento en la muestra tratada con un 6% de cemento en comparación con la muestra sin tratamiento. Este análisis se realizó después de un período de curado de 6 días y una inmersión en agua durante 24 horas, lo que representó una evaluación en un estado más afectado en comparación con el caso del CBR.

En última instancia, este estudio demostró de manera concluyente que los usos de cemento en la muestra resultaron positivos para estabilizar los suelos dispersos. Este descubrimiento no solo aporta a la mejora de la infraestructura vial, sino que también proporciona una visión valiosa sobre cómo los aditivos pueden transformar las propiedades y el comportamiento de los suelos en situaciones prácticas. (Yana M, 2021) **[16]**

Los suelos dispersivos son arcillas con propiedades particulares, ya que no contienen cationes de calcio o potasio, por ende, son reemplazados por iones de sodio. Estos tipos de materiales pueden encontrarse en diversas regiones del mundo, dado que su comportamiento está directamente influenciado dependiendo el flujo de agua que atraviesa su estructura. Por este motivo, el análisis de los suelos dispersivos y los procesos para caracterizarlos resultan esenciales en la planificación y desarrollo de proyectos de ingeniería civil.

En este estudio, se utilizó un mapeo de puntos para examinar los baches en "La comuna 16 (Belén) de Medellín, Antioquia". Teniendo en cuenta de este mapeo, se identificaron las áreas con una mayor concentración de puntos y presencia recurrente de huecos. Posteriormente, se seleccionaron quince posibles sitios para la toma de muestras, de los cuales solo se extrajeron muestras en once debido a que ya está urbanizado. Estas muestras se sometieron a diversos ensayos para determinar sus características físicas, incluyendo ensayos granulométricos, gravedad específica, límites de Atterberg, y ensayos de hidrómetro.

Los resultados de los ensayos revelaron que el mayor porcentaje muestras extraídas en la comuna 16, aproximadamente un 80% se clasifican como limos, mientras que el restante 20% corresponde a arenas con presencia de limos. Además, al analizar qué tan dispersivos son estos suelos, se determinó que más de la mitad no exhibe propiedades dispersivas, mientras que el resto presenta una dispersividad leve o moderada a medida que se acerca a la zona urbana. Esto se debe a la geotecnia de los suelos, que proviene de depósitos finos aluviales. También se evidenció que, aunque la principal causa de los daños en la zona no es la dispersividad del suelo, si no la presencia de lugares de lavado de autos en la zona, los cuales utilizan agua de acuíferos locales, podría estar contribuyendo a los daños en la capa asfáltica. (Santamaría I, Camargo S, 2021) **[17]**

Mediante la evaluación de pruebas de tracción y compresión, fue posible establecer las diferencias entre los dos estabilizantes. Se analizó que, sin importar el porcentaje de cal empleada, hubo un evidente aumento en la resistencia de los especímenes de prueba.

Esto reafirma la versatilidad de la cal viva como material de estabilización química en suelos con elevados niveles de contenido arcilloso. Aunque utilizando la cal viva los parámetros de rigidez y esfuerzo máximo presentaron una tendencia al alza, esto debido a la reacción generada por el contacto con el agua, lo que respalda la noción de que el aditivo es una opción viable para el tratamiento de suelos que presentes estos problemas. Su atractivo radica en el costo-beneficio y la facilidad de uso.

La cal demostró en términos de tracción, un rendimiento en las propiedades mecánicas satisfactorio, puntualmente con la adición del 8% evidenciando en comparación con la muestra inicial, la resistencia a tracción mejoró notablemente. Respecto a emplear ceniza volante, se puede concluir que no fue tan satisfactorio como la cal viva respecto a la resistencia.

En el ensayo de compresión, se estableció que el porcentaje más viable de cal viva es del 4% para el esfuerzo máximo, del 8% para la rigidez y nuevamente del 8% para la deformación (menor deformación). En el caso de la ceniza, el porcentaje óptimo para el esfuerzo máximo también fue del 4%, mientras que fue del 4% para la rigidez y del 8% para la deformación. Las muestras con ceniza volante evidenciaron un esfuerzo parecido al obtenido con la cal, lo que sugiere que ambos materiales pueden utilizarse satisfactoriamente para estabilizar suelos, ya que incrementan su resistencia.

Además, en la prueba de tracción, se determinó que el porcentaje necesario de cal es del 8% en cuanto a esfuerzo máximo. Para la rigidez, el porcentaje óptimo fue del 6% para la cal y del 8% para la ceniza, y lo que respecta a deformación, fue del 6% para la cal y del 4% para la ceniza. En resumen, la técnica empleada para mejorar los suelos en esta investigación demostró ser viable desde una perspectiva técnica. Los aspectos de elasticidad (rigidez), deformación esfuerzo máximo evidenciaron de manera satisfactoria que el suelo puede ser mejorado in-situ, proporcionándole una mayor resistencia y al mismo tiempo generando beneficios económicos al reducir los costos asociados al transporte de material granular para mejorar suelos. (Parra M, 2018) [18]

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico se estructurará de la siguiente forma:

Etapa 1: Se llevará a cabo la recopilación de la información preliminar a nivel de planos base, uso de suelos, documentos encontrados en el POT e información relevante para la investigación.

Etapa 2: Se realizará una etapa de campo donde se establecerán una serie de exploraciones directas mediante sondeos, haciendo una recuperación de muestras alteradas e inalteradas para la realización de ensayos de laboratorio.

Etapa 3: Se llevará a cabo una etapa experimental donde se hará una primera fase de laboratorio donde se realizarán los ensayos de clasificación básica y geo-mecánica de los materiales, estos son:

- Ensayo de caracterización de la muestra para saber sus componentes.
- Límites de Atterberg para evaluar la cantidad de agua que el suelo puede retener, este es muy importante para comprender la plasticidad del suelo y la susceptibilidad a la erosión.
- Ensayo de granulometría para determinar la composición granulométrica de los suelos y su aptitud para la construcción.
- Ensayo de gravedad específica para la caracterización del suelo y determinación de permeabilidad.
- Ensayo de determinación de suelos expansivos para determinar si un suelo tiene capacidad de expandirse cuando se moja y contraerse cuando seca.
- Ensayo de relación de fases para determinar la cantidad de agua, aire y sólidos presentes en las muestras.
- Ensayo de Corte Directo para determinar la resistencia al corte del suelo.
- Ensayo de Consolidación para determinar la capacidad del suelo para soportar cargas.

Etapa 4: Procesamiento de la información para establecer el comportamiento actual de los materiales sin estabilizarlos.

Etapa 5: Se llevará a cabo una segunda etapa experimental, haciendo la conformación de las probetas con dosificaciones específicas de acuerdo a la literatura recopilada en la parte inicial, para realizar de nuevo los ensayos con cada uno de los aditivos (cal y cemento).

Etapa 6: Procesamiento y análisis de la información con los resultados obtenidos de los ensayos con los materiales previamente estabilizados



Figura 8. Diagrama de Planificación

Fuente: Autores

5. GENERALIDADES

5.1. LOCALIZACIÓN

Tunja se encuentra en de la Provincia CENTRO, fundada en el año 1539 y ubicada en la cordillera oriente a los 05° 32' 07" de latitud Norte y 73° 22' 04" de longitud oeste, a una altura de 2.775 m.s.n.m.



Figura 9. Localización.

Fuente: Alcaldía de Tunja, 2023

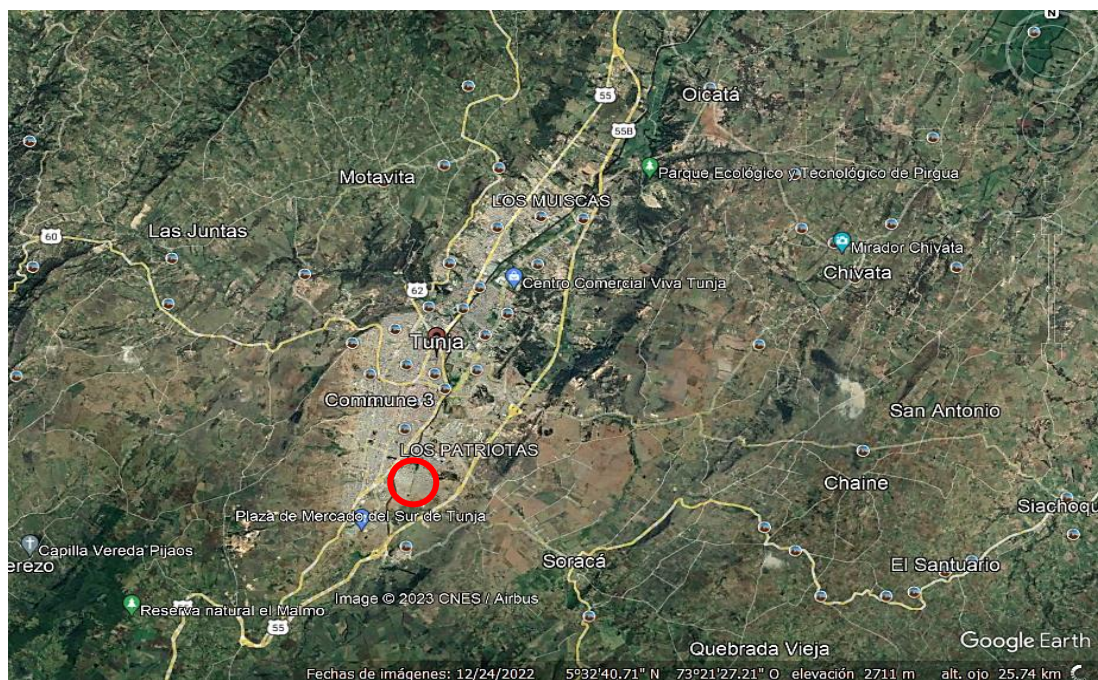


Figura 10. Ubicación Zona de Estudio, Tunja.

Fuente: Google Earth.2023

Tunja está delimitada al norte por los municipios de Motavita y Cóbbita. Hacia el oriente, limita con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá. Al sur, se conecta con Ventaquemada, mientras que en dirección occidente, hace frontera con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora.

En términos de superficie, abarca un área total de 121.4920 Km², de los cuales 19.766 Km² pertenecen a la zona urbana y 101.725 Km² corresponden a la región rural. La altitud de su centro municipal es de 2782 m.s.n.m y su temperatura media es de 13 °C.

Gran parte del territorio municipal se caracteriza por su topografía montañosa, y se distinguen prominentes accidentes geográficos como las cuchillas del Perico, Cazadero y Peñanegra, además de las elevaciones de la Sierra y la Cascada. En esta región nace el río Chulo, cuya corriente fluye de Sur a Norte, más adelante confluye con otros afluentes menores y da origen al río Chicamocha; asimismo, resalta la presencia del río Teatinos. Debido a la intrincada configuración del relieve, el municipio exhibe un rango altitudinal que abarca desde el piso térmico frío, que cubre un área de 140 Km², hasta el piso bioclimático páramo, que se extiende por 67 Km² (IGAC, 1996)

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



Figura 11. Zona de Estudio.

Fuente: Google Earth, 2023

El área de estudio se encuentra entre los barrios Urbanización Sol de Oriente, Multiparque, Portal de Otoño y Cooservicios, dentro del área urbana de la ciudad de Tunja. Esta zona se caracteriza por la cárcava presente donde se encuentran construcciones y cobertura vegetal con presencia de árboles y arbustos de mediana altura. El terreno presenta una erosión severa y las condiciones de las vías de acceso son buenas, sin embargo, en algunos tramos se presentan fallas en la estructura del pavimento, como hundimientos y desprendimiento de asfalto debido a las características de la zona. Por las condiciones geomorfológicas, se tiene un tránsito de agua escorrentía desde el sector Alto de Soracá, hasta el multiparque centenario lo que produce un empozamiento de agua en este sector incrementando las afectaciones de la cárcava.

La figura 4 presenta, cuatro (4) sondeos en puntos de interés que se seleccionaron luego de hacer una exploración a la zona e identificar los sectores con mayor afectación en la cárcava y zonas aledañas.



Figura 12. Ubicación de los Sondeos en la Zona de Estudio.

Fuente: Google Earth, 2023

En el sondeo número uno (1), se observó una afectación a la capa asfáltica (hundimientos, grietas de borde y fisuras longitudinales y transversales, baches y abultamientos) en la cual se han realizado varios mantenimientos, pero en cuestión de meses se vuelve a presentar la misma patología, debido a que está al lado de la cárcava y donde posiblemente haya mayor infiltración de agua ya que se encuentra cerca de una alcantarilla que recolecta el agua de escorrentía, pero esta no tiene la suficiente capacidad hidráulica para recoger el agua causando empozamiento en la zona. También, se observa un desnivel de la vía desde el paramento de las viviendas hasta el bordillo del multiparque que comparando con fotografías de años anteriores ha incrementado la pendiente de inclinación.

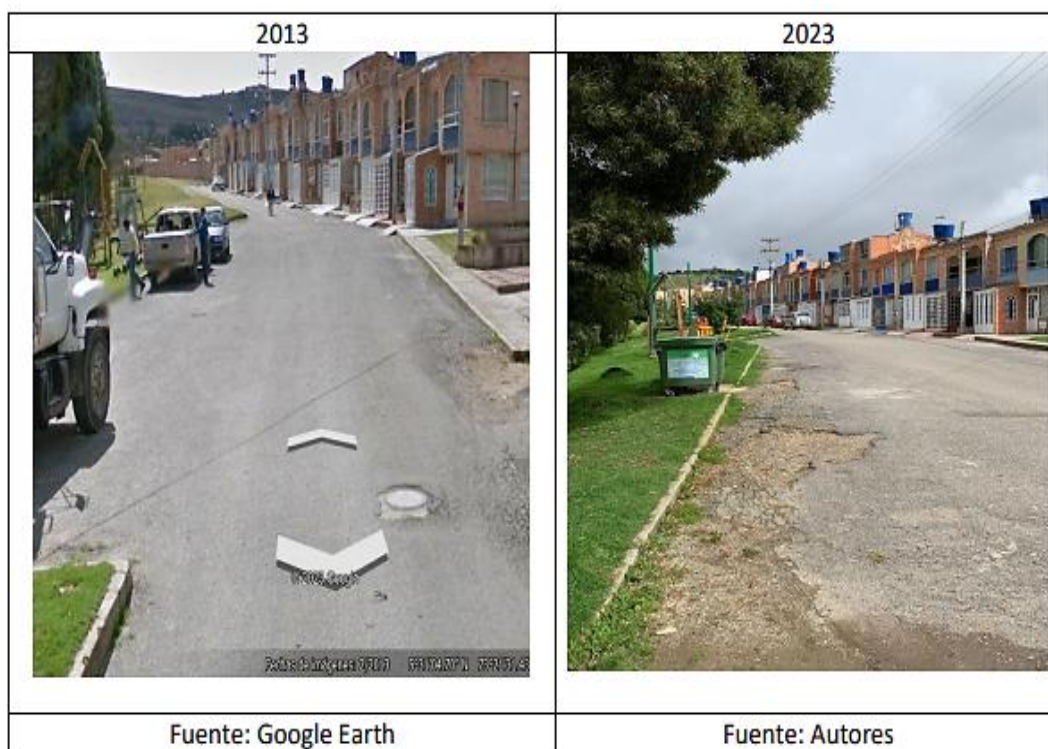


Figura 13. Afectación Sondeo 1

Fuente: Autores



Figura 14. Afectación Sondeo 1

Fuente: Autores

Para el sondeo número (2), se observó que con el paso del tiempo el hundimiento presente se ha incrementado, también tomó lugar la capa vegetal sobre la vía. En este sector se encuentran viviendas aledañas a la cárcava que ya presentan afectaciones y grietas en su estructura.

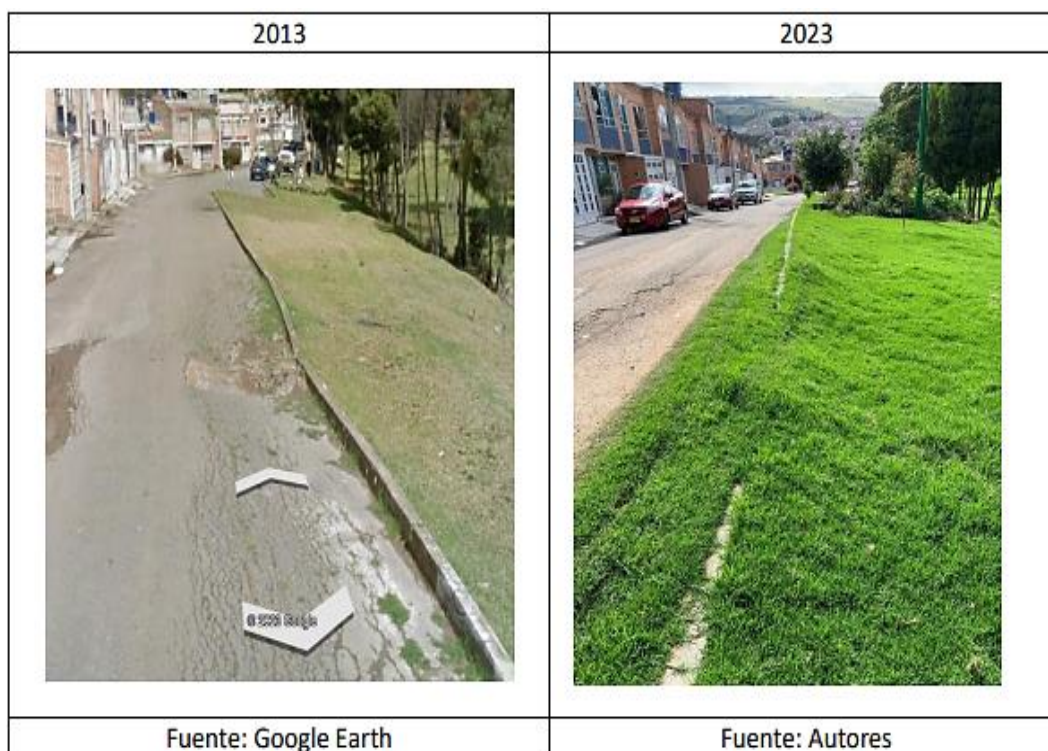


Figura 15. Afectación Sondeo 2

Fuente: Autores

El sondeo número tres (3), es un punto crítico y de gran interés para el estudio, ya que hay siete viviendas gravemente afectadas por agrietamientos, hundimientos y separación entre viviendas, las cuales se encuentran deshabitadas hace más de diez años debido al hundimiento y erosión del suelo de fundación, lo que generó fracturas y grietas en las viviendas.

Las edificaciones colindantes con estas viviendas fueron ampliadas a más de dos pisos, allí hay nuevas construcciones cercanas, que pueden llegar a generar un colapso de las estructuras afectadas. Comparando las imágenes en el transcurso de diez años se incrementaron los agrietamientos y las viviendas cada vez están más deformadas.



Figura 16. Afectación Sondeo 3

Fuente: Autores

El sitio del sondeo número cuatro (4) se seleccionó debido al tipo de material que se tiene en la zona, pues allí existen afloramientos de suelos con una tonalidad blanquecina y que, al hacer un ensayo de resistencia manual, aplicando una presión normal el material se desintegra, por lo cual se determinó que es de muy baja resistencia, además de que en lugares aledaños a donde se encontró este material hay hundimientos en la vía e importantes daños en algunas viviendas



Figura 17. Afectación Sondeo 4

Fuente: Autores

COORDENADAS SONDEO 1		
5°31'04.81" N	73°21'31.37" O	Elevación 2736 m.s.n.m
COORDENADAS SONDEO 2		
5°31'03.36" N	73°21'30.00" O	Elevación 2738 m.s.n.m
COORDENADAS SONDEO 3		
5°31'00.82" N	73°21'29.85" O	Elevación 2739 m.s.n.m
COORDENADAS SONDEO 4		
5°31'04.89" N	73°21'28.90" O	Elevación 2742 m.s.n.m

Tabla 1 Coordenadas de los Sondeos

Fuente: Autores

4.3 GENERALIDADES

4.3.1 Generalidades del Sector

La zona de estudio es de tipo residencial, allí se encuentran zonas de viviendas de una, dos y tres plantas; en áreas aferentes se localizan espacios deportivos e institucionales. parques, vías y parqueaderos, es importante mencionar que este sitio, es muy cercano a el “Multiparque Centenario” por donde pasan algunos afluentes de agua de escorrentía superficial generada por precipitaciones; allí también se han realizado obras de contención como lo son gaviones elaborados en piedra rajón que sirven para controlar los procesos de erosión del suelo.

4.3.2 Tipo de Material

Algunos de los materiales encontrados a poca profundidad en la zona de interés son depósitos recientes de relleno común y material orgánico.

Entre los materiales que conforman el estrato se encontró una variedad de arenas y arcillas y limos de alta y baja plasticidad, dependiendo de su profundidad y sitio de estudio varían los porcentajes de cada uno.

Se realizaron ensayos de Limites de Atterberg, con el fin de determinar la plasticidad presente en las arcillas, se pueden evidenciar en el anexo 3 ensayos de laboratorio.

SONDEO 1	SONDEO 2
	
Arena con Arcilla de Baja Plasticidad	Arcilla de Alta Plasticidad

	
Arcilla de Baja Plasticidad	Arcilla de Alta Plasticidad

Figura 18. Material Presente en los Sondeos

Fuente: Autores

4.3.3 Normatividad

Durante la planificación del estudio de suelos y la exploración necesaria para desarrollar un cronograma de ensayos de laboratorio, se siguieron las pautas establecidas en el capítulo H de la norma NSR-10, el cual se enfoca en Estudios Geotécnicos, también se tuvo en cuenta los documentos técnicos de las especificaciones de la norma INVIAS 2012. Todas las actividades programadas en el estudio se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos definidos en la normativa actual vigente.

De acuerdo con las directrices del capítulo H de la norma NSR-10, para el estudio de suelos, se determinó que se deben realizar un mínimo de cuatro (4) sondeos de exploración en el terreno. .

Además, durante la ejecución del ensayo de SPT (Standard Penetration Test) que se aplico a materiales cohesivos (arcillas y limos) y granulares (arena y grava) , se consideró la norma INVIAS E-111-13, que especifica las directrices para el ensayo de penetración (SPT) y la toma de muestras de suelos utilizando cuchara partida.

ACTIVIDAD	NORMAS
Exploración	I.N.V E-101 -13
Descripción e Identificación de Suelos (Visual y manual)	I.N.V E-102 -13
Sondeo Manual	I.N.V E-112 -13
Ensayo SPT	I.N.V E-113 -13
Conservación y Transporte de Muestras	I.N.V E-103 -13
Determinación del Contenido de Humedad	I.N.V E-122 -13
Límites de Atterberg	I.N.V E-125 -13
	I.N.V E-126 -13
Análisis Granulométrico	I.N.V E-123 -13
Determinación de Gravedad Especifica	I.N.V E-128 -13
Peso Unitario	I.N.V E-117 -17
Determinación de Factores de Contracción por Parafina	I.N.V E-129 -13
Corte Directo	I.N.V E-154 -13
Consolidación Unidimensional	I.N.V E-151 -07

Tabla 2 Normas INVIAS

Fuente: Autores

NORMAS	
Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente	NSR-10
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	USCS
Instituto Nacional de Vías	INVIAS

Tabla 3. Normas Aplicadas

Fuente: Autores

6. ACTIVIDADES

El estudio tiene por objeto conocer las características geo-mecánicas de los materiales presentes en el sector de la cárcava de Cooservicios, realizando en primera instancia una visita al área de estudio para conocer visualmente las condiciones presentes para posteriormente realizar la toma de muestras por medio de cuatro sondeos a profundidades de hasta 5 metros.

Teniendo estas muestras se llevarán a cabo una serie de ensayos de laboratorio como son humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, corte directo y consolidación unidimensional, todo esto teniendo en cuenta la norma INVIAS con el fin de llegar a caracterizar los materiales presentes en el área de estudio.

A partir de esta información geotécnica, se establecerá el método de estabilización del suelo más adecuado por medio de aditivos como son la Cal y el Cemento en diferentes porcentajes teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos previamente realizados, todo esto con el fin de garantizar un comportamiento óptimo del suelo.

5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR

En este apartado se busca información actualizada del municipio, como lo es la información básica sobre la zona como la topografía, la condición climática, precipitación, hidrología, sismología. También, información topográfica por medio de tomas aéreas o satelitales, fotografías con diferente línea de tiempo con el fin de analizar el incremento de las afectaciones con el pasar de los años, documentos y planos de la geología presente entre otros aspectos relevantes para que se pueda llevar a cabo el proyecto teniendo en cuenta estas condiciones.

5.2 TOPOGRAFIA REGIONAL Y LOCAL

La topografía regional se obtuvo por medio de la plataforma del IGAC, en escala 1:25000 y en Google Earth se obtuvieron fotos satelitales, la cual es información base para establecer las condiciones de la geología del terreno, para una vez identificadas las características topográficas de la zona, se puedan tener en cuenta estos parámetros dentro del estudio y se tenga más clara la afectación del sitio y los fenómenos que se puedan presentar como efectos de la pendiente que se tiene, flujos de agua superficial según la topografía y las cuencas cercanas y así mismo la zona sísmica y el grado de eventos que se puedan presentar según su clasificación.

5.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Las condiciones de la zona se analizan tanto a nivel regional como local. Este estudio se empieza con el análisis de la información inicial proporcionada por el “Servicio Geológico Colombiano” sobre la región en la que se encuentra el sitio, considerando el área de estudio en un contexto más amplio. La relevancia de esta evaluación general radica en su impacto en el riesgo a presentar de fenómenos naturales en la zona y que previamente han sido valorados en los mapas de riesgo de la ciudad, lo cual influye significativamente en la planificación del uso proyectado para los suelos.

En los estudios geológicos previos realizados para el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Municipio se puede analizar la geología local. Estos detallan los tipos de materiales y estructuras presentes en el sitio seleccionado para la ampliación de la edificación existente proyectada en la zona de estudio, así como las condiciones actuales. Además, también se toma en cuenta la información geológica proveniente de proyectos previamente realizados.

5.4 HIDROGRAFÍA

Utilizando datos secundarios extraídos de investigaciones del municipio y ubicando el sitio en los mapas de la región, se determinan las condiciones hidrológicas del área. Se analizan las características de la cuenca hidrográfica regional a partir de diversos estudios. En este proceso, se toma en cuenta la cuenca hidrográfica en la que se ubica la zona de estudio, identificando los cuerpos de agua existentes y los territorios que son drenados por este sistema.

5.5 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Se llevó a cabo una exploración en la zona afectada donde se realizaron sondeos para recolectar muestras por medio del equipo manual, para establecer la secuencia estratigráfica y así mismo caracterizar cada uno de los materiales encontrados en las muestras. Una vez se conocen las características geotécnicas, se analiza la estabilidad del suelo y se evalúa su comportamiento con aditivos como Cal y Cemento. Se plantean las siguientes características de la exploración realizada.

5.5.1 Exploración Directa

Se ejecutaron cuatro (4) sondeos a una profundidad de 5.0 m, distribuidos a lo largo de la zona donde se encontraban puntos de mayor afectación donde se obtuvo la

recuperación de muestras alteradas e inalteradas a diferentes profundidades para pasar a la etapa de ensayos de laboratorio y así poder clasificar y conocer las características geo mecánicas del suelo.

5.5.2 Ensayos de Campo

En cada uno de los sondeos se adelantaron ensayos de Penetración estándar (SPT). Este resultado se tomó como un parámetro indicador, mas no se hizo un análisis de la resistencia con base a los resultados del spt y no se tuvo en cuenta en la caracterización mecánica de las condiciones del material.

Es importante aclarar que el ensayo de SPT se llevó a cabo a la máxima profundidad para establecer la resistencia en campo en condiciones no drenadas del material, debido a que anteriormente, las muestras extraídas fueron mediante tubos shelby.

5.5.3 Ensayos de Laboratorio

Para conocer la clasificación de los materiales existentes en la zona de estudio, se realizaron una serie de ensayos siguiendo normativa INVIAS, como son humedad natural, límites de Atterberg, granulometría, lavado sobre tamiz N° 200, peso unitario, Corte Directo y Consolidación Unidimensional. Luego de conocer estas características básicas del suelo, se realizaron ensayos de corte directo para conocer su resistencia y ensayos de consolidación para saber la deformabilidad de los suelos.

Conociendo la parte geo mecánica de los estratos encontrados en los sondeos, se realizaron nuevamente ensayos de Consolidación implementando aditivos como lo son la Cal y el Cemento en diferentes porcentajes al 5%, 10% y 15%, con el fin de analizar si es viable o no su aplicación y observar su cambio, haciendo una comparación con el suelo en condiciones normales y el suelo con los aditivos. Todos estos ensayos se realizaron sobre muestras inalteradas tomadas con tubos Shelby por medio del equipo manual.

5.5.4 Caracterización Geotécnica y Comportamientos Esperados

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las exploraciones de campo y en los ensayos de laboratorio, se realiza una identificación de las capas y el material existente en cada uno de los sondeos dependiendo de su profundidad, para que de esta forma se adelante la caracterización del material e identificación del comportamiento actual, propiedades mecánicas e hidráulicas para cada una de las muestras de la zona afectada y de esta manera se pueda establecer los parámetros geotécnicos de cada estrato, los cuales son necesarios para evaluar sus deformaciones y la capacidad portante donde se presenten estructuras o edificaciones.

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis en este estudio tiene como objetivos, determinar las características de los materiales reportados en los sondeos con base en los resultados de laboratorios y establecer el comportamiento de estos suelos que van a estar soportando sobrecargas y cambios de volumen, debido a las viviendas y estructuras construidas en la zona. De esta forma, se establece las afectaciones que presenta el sector y posibles comportamientos que puedan presentar bajo condiciones desfavorables como climáticas debido al aumento de la saturación del suelo y condiciones sísmicas locales.

7. EXPLORACIÓN

6.1 USO DE SUELO

La zona de estudio, está localizada en el municipio de Tunja en un área de la parte urbana, por lo que este sector tiene construcciones de viviendas, edificaciones y locales comerciales, así mismo cuenta con un Hospital y esta zona se encuentra en máximo desarrollo.



Figura 19. Usos de Suelo Zona de Estudio

Fuente: Google Earth, 2023

El uso de suelo de esta zona es urbanístico, donde se evidencia un área de pastos y bosques de gran extensión donde se encuentra la zona de cárcava, en la cual se presentan amenazas en cuanto al manejo de agua escorrentía. Como se puede observar en la siguiente imagen, están demarcados los surcos donde se encuentra el material de mayor afectación, el cual está expuesto a condiciones medioambientales severas que se han formado con el paso del tiempo y es donde existe flujo de agua en sentido hacia las viviendas aledañas a la cárcava.

La cárcava cuenta con tres cauces o brazos principales los cuales conducen el agua hacia la parte baja de la pendiente, donde se han presentado procesos de erosión severa y degradación, como producto de esto el material que se encuentra en el área urbana es similar en toda la zona.

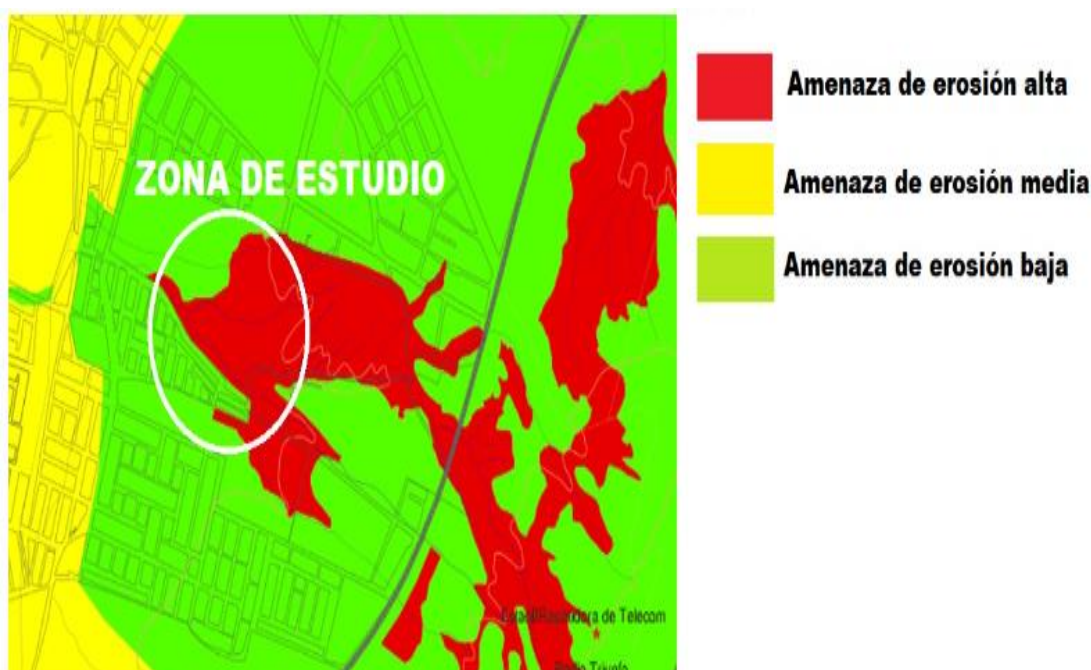


Figura 20. Usos de Suelo Zona de Estudio

Fuente: TuSIG – Sistema de Información Geográfica de Tunja, 2023

6.2 TOPOGRAFÍA

Es muy importante conocer las características topográficas de la zona, para analizar las condiciones de drenaje superficiales y sub superficiales, e identificar las áreas de afectación y posibles obras que puedan resultar necesarias para controlar el flujo de aguas para beneficio de las viviendas presentes. Para establecer estos comportamientos de pendiente y flujo, se realiza el análisis topográfico a escala regional, identificando zonas de pendientes altas, bajas y medias para luego establecer la topografía local y saber los impactos sobre las edificaciones aledañas a la cárcava.

6.2.1 Topografía Regional

El municipio de Tunja cuenta con una extensión territorial de 121,4 km² de los cuales el 87% corresponde al área rural y el 13% al área urbana. Está localizada en el Alto del Chicamocha en la región del Altiplano Cundiboyacense, sobre la cordillera Oriental de los Andes en el centro del país.

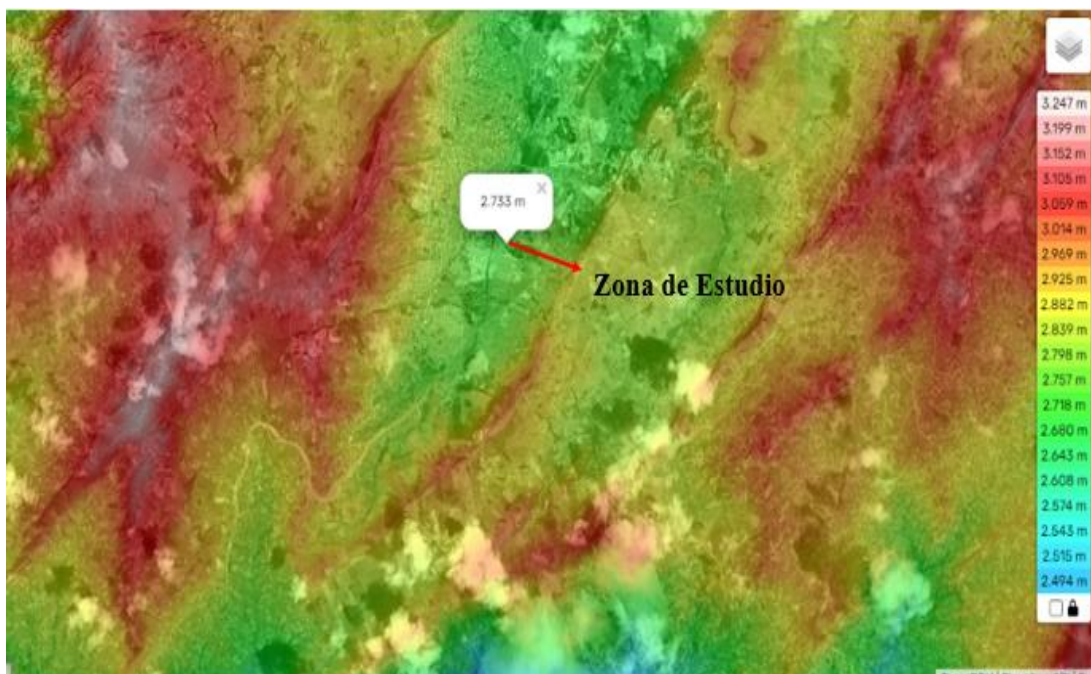


Figura 21. Topografía Regional

Fuente: Google Maps, 2023

Cuenta con tres zonas orográficas que comprenden la parte urbana, la zona plana a 2650 m.s.n.m, la meseta dirección el centro y sur de la ciudad a 2770 m.s.n.m, donde se encuentra el centro histórico y las colinas donde alcanza los 2900 m.s.n.m en el sector que se encuentran en la zona occidental; las alturas van desde los 2700 hasta 3150 metros sobre el nivel del mar en la parte más elevada. Como otras zonas de la región Andina de Colombia se encuentra en un área altamente propensa a la actividad sísmica.

La zona de estudio está localizada en un área de la parte plana, en la franja aferente a la zona de transición del flanco oriental y la parte baja del sinclinal de la ciudad de Tunja, donde la topografía presenta pendientes bajas, cerca se presenta una topografía escarpada que está determinada por la litología del lugar. Un factor influyente es el cambio de pendientes en la zona de estudio por ende los fenómenos de erosión presentes en el sector de la cárcava.

6.2.2 Topografía Local

En la figura 21, se observa una vista general de la zona de estudio, donde se analizaron las condiciones de pendientes o sectores donde se pueden llegar a presentar flujos de agua superficial hacia el Río Jordán, de esta forma identificar las franjas más afectadas del terreno por condiciones naturales formando pequeñas pendientes



Figura 22. Topografía Local

Fuente: Google Maps, 2023

Se puede evidenciar en la figura 22, las localizaciones de las viviendas aledañas a la cárcava del barrio Cooservicios, donde se presentan daños estructurales. En la topografía puntual del sitio, se evidencian pendientes medias alcanzando una máxima de 2751 m en la zona boscosa que tiene surcos por donde circula el agua escorrentía la cual fluye hacia la urbanización donde produce fenómenos de socavación y estancamiento de agua.



Figura 23. Ubicación de los Sondeo y Perfil

Fuente: Google Earth, 2023

Con la topografía se puede desarrollar un análisis más detallado, la línea azul representa el perfil de la zona, así mismo como se observa en la figura la distribución de los sondeos para determinar los materiales en la zona.

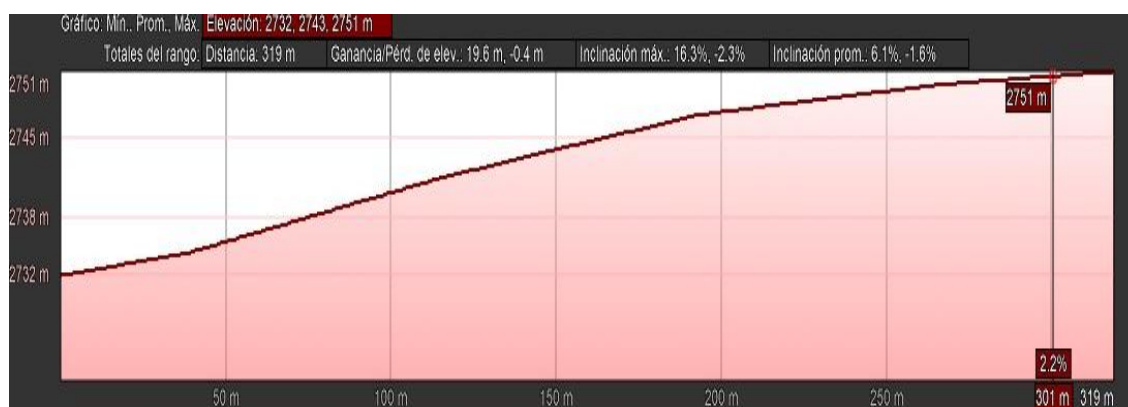


Figura 24. Altimetría Zona de Estudio

Fuente: Google Maps, 2023

Como se observa en el perfil, se tiene una altura de 2732 m.s.n.m en el punto bajo de la zona afectada, puntualmente donde se realizó el sondeo uno (1) y progresivamente va incrementando su pendiente hasta llegar a los 2751 m.s.n.m en el punto más alto de la cárcava.

6.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La información geológica disponible en el Servicio Geológico Colombiano se refiere a la descripción de la distribución en planta de las Formaciones y materiales presentes tanto en la región general como en el área específica del estudio. Estos datos son fundamentales para el desarrollo del estudio en el sitio, y han sido incluidos en esta sección del informe.

Desde el punto de vista orográfico, el territorio departamental muestra marcadas diferencias debido a su ubicación en la región andina, específicamente en la parte centro-oriental del país. En este sentido, cuenta con una porción de tierras planas en el valle medio del Río Magdalena, y está atravesado por la Cordillera Oriental en dirección suroeste a noreste, lo que da lugar a una compleja topografía. Esta configuración origina 6 regiones fisiográficas con características notoriamente distintas entre sí, distribuidas de Occidente a Oriente.

El área de estudio se encuentra en la zona fisiográfica 6, correspondiente a la Altiplanicie Central situada sobre los domos de la cordillera oriental, a una altura aproximada de 2800 metros sobre el nivel del mar.

Es caracterizado por una serie de valles ubicados a gran altura, limitados por montañas que tienen elevaciones entre 2650 y 2800 metros. El sitio de estudio corresponde a un área del valle o franja de terreno más baja dentro de la zona urbana de la ciudad.

Estos valles albergan gran parte de la infraestructura del Departamento de Boyacá y Cundinamarca, así como corrientes hidrográficas importantes para el departamento. En las zonas donde el valle se estrecha debido a la presencia de las cadenas montañosas de la cordillera, conocidas como los páramos y la zona del Cordón Magistral de la Cordillera de los Andes, se presentan grandes hendiduras por donde fluyen los principales drenajes permanentes. El altiplano incluye la meseta de Tunja, los valles de Tundama, Belén, Sogamoso, Corrales, Floresta y Paz de Río, así como las regiones de Susacón y Soatá, donde el altiplano se estrecha hasta desaparecer.

6.3.1 Geología Regional

A nivel regional, en la zona estudio, se presentan diferentes formaciones geológicas, los cuales, junto a las condiciones geomorfológicas, se generan diferentes procesos geotectónicos, dando lugar a condiciones especiales.

La geología regional en el área conocida como Altiplano Cundiboyacense es común, lo que puede observarse tanto en el entorno como en las uniones de las carreteras que

conectan Bogotá con la ciudad de Tunja, así como en las vías que enlazan Tunja con los municipios cercanos. Estos elementos evidencian de manera clara la complejidad de los materiales geológicos presentes, así como la presencia de numerosos pliegues y fallas geológicas que forman parte de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos.

➤ La Formación Tilatá (TQt)

La Formación Tilatá (TQt) es una sucesión de capas horizontales ubicada en la represa del Sisga. Está compuesta alternadamente por arcillas, arenas y capas arenosas y cascajos, con un promedio de espesor de 150 m. Helms y Van Der Hammen T. (1995) subdividieron la Formación Tilatá en dos conjuntos, cada uno con varios miembros. El conjunto inferior incluye los miembros Tequendama y Bogotá, mientras que el conjunto superior consta de los miembros Guasca y el miembro superior de la Formación Tilatá.

En el área de estudio, se observa principalmente el afloramiento de una significativa porción del conjunto superior de la formación. Esta sección está compuesta por arcillas en variados tonos (mezcladas, blancas, verdes y grises), dispuestas de manera subhorizontal sobre una capa de arcilla blanca caolinítica, con ocasionales intercalaciones de turba-lignito y arenas arcillosas de grano fino, acompañadas de algunas gravas. La magnitud de esta sección de la formación supera los 20 m en grosor. La Formación Tilatá se encuentra visible en los márgenes del valle central y se extiende predominantemente en dirección NE-SW. Geomorfológicamente, se distinguen pequeñas colinas en ciertas áreas de los flancos del sinclinal. Dentro del espacio de investigación, presenta un espesor aproximado de 72 m y se sitúa en una posición discordante con respecto a la Formación Bogotá.

El conjunto inferior de esta formación está compuesto por un nivel de gravas e incluso bloques de arenisca embebidos en una matriz de arena y arcilla. A continuación, se encuentra un nivel de arcillolitas amarillas y, finalmente, una unidad arcillosa con delgadas intercalaciones de niveles conglomeráticos y niveles arcillosos.

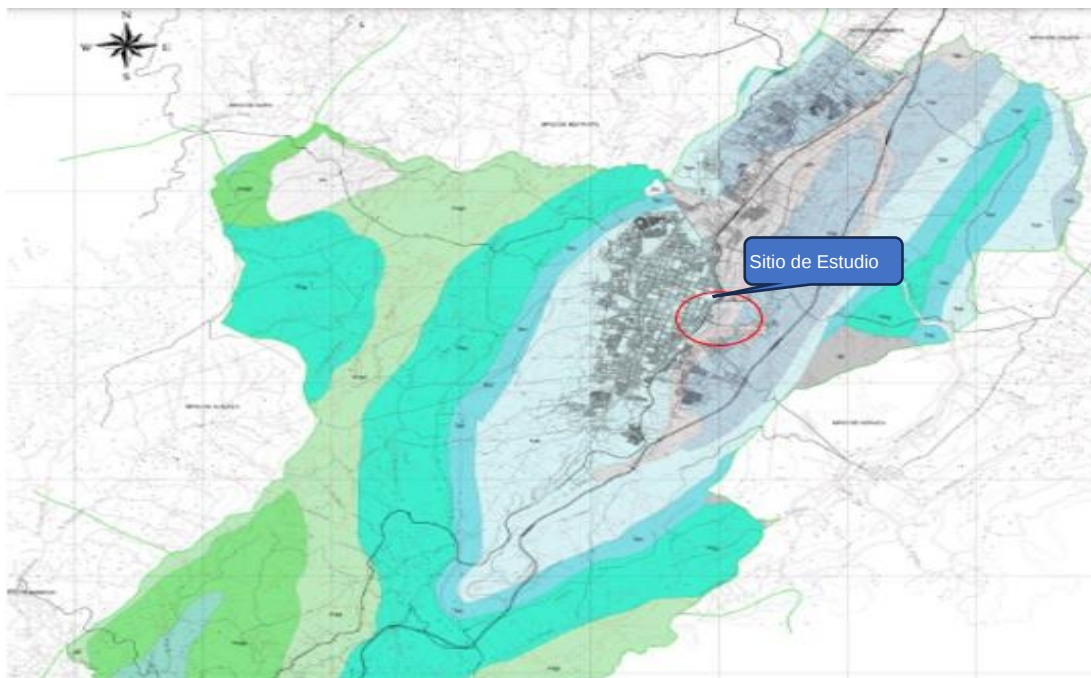


Figura 25. Tectónica y Geología Estructural

Fuente: Alcaldía de Tunja, 2023

➤ Formación Bogotá (Tpb)

La Formación Bogotá, en su estructura uniforme, exhibe capas de arcillolita en tonos gris, violeta y rojo, organizadas en bancos separados por niveles de areniscas arcillosas que varían de blanco a amarillo. Este estrato geológico emerge en ambos flancos del sinclinal de Tunja. Según Van Der Hammen (1958), ha sido datado en el Paleoceno superior y el Eoceno inferior, mostrando coincidencia con las areniscas de la formación Cacho, pero diferenciándose de la formación Tiltatá en su tope.

En la región, se pueden apreciar amplios afloramientos de esta formación en ambos lados del sinclinal, siendo un factor clave en la creación de cárcavas profundas y expansivas. La Formación Bogotá se descompone en cuatro conjuntos litológicos, siendo el cuarto o último el menos visible. El primer conjunto engloba areniscas arcillosas en diversos tonos, sobre las cuales se yerguen areniscas compactas y cuarzosas de grano fino, ocasionalmente entremezcladas con arcillolitas grises.

Subsiguientemente, aparecen arcillolitas grises y amarillas, acompañadas por una franja de arenisca de grano grueso y matriz caolinítica, que entra en contacto con una arenisca gris claro de grano fino y matriz caolinítica hacia la parte alta. Luego, se muestran arcillolitas grises con finas alternancias de areniscas amarillentas. Posteriormente, se aprecia una bancada de arenisca gris de grano fino, cuarzosa, enriquecida con moscovita y biotita en lentes, dotándole de una apariencia discontinua y oscura.

Sobre estas capas, se vislumbran arcillolitas amarillas y habanas, con inserciones de limolitas amarillas. La sección superior de este conjunto se compone de areniscas grises de grano fino con ortoclasa, cuarzo y biotita, alcanzando un espesor aproximado de 12 m. Estas rocas son visibles en el lado norte del área de estudio, a lo largo de la margen izquierda de las cárcavas en la zona correspondiente al barrio el Cortijo.

El conjunto medio de la formación se halla completamente cubierto por depósitos coluviales y fluviolacustres, mientras que el conjunto superior se compone principalmente de arcillolitas rojizas y grises. Hacia la base de este conjunto se observa una arenisca gris rojiza con tonalidades verdosas, de grano fino, con un alto contenido de óxidos y una textura compacta, sobre la cual se encuentran arcillolitas rojas, ocasionalmente alternadas con arcillolitas amarillas y blancas. En la parte media de este conjunto, se aprecia una arenisca amarilla rojiza de grano fino a muy fino. El espesor promedio de este conjunto es de aproximadamente 117 m. El conjunto superior más marcado muestra arcillolitas de consistencia rígida en colores gris, rojo y violáceo, sobre las cuales se asientan arcillolitas amarillas, seguidas de areniscas de grano muy fino y tonalidad rojiza.

➤ Formación Guaduas (TKg)

La Formación Guaduas (TKg) toma su nombre de la región de Guaduas en Cundinamarca, debido a la presencia de mantos de carbón explotable en esta área. En su descripción sobre la "estratigrafía de la sabana de Bogotá y sus alrededores", HUBACH E. (1957) demarca con mayor precisión la Formación Guaduas, dividiéndola en tres conjuntos litológicos.

En primer lugar, el conjunto inferior consiste mayormente en arcillolitas de tono gris oscuro. El conjunto medio se compone de arcillolitas grises oscuras, en ocasiones con mantos de carbón explotable, mientras que el conjunto superior exhibe arcillolitas de colores mezclados, que en ciertos casos pueden contener delgadas capas de carbón y estratos intermitentes de areniscas arcillosas de grano medio a grueso.

La Formación Guaduas emerge en los flancos oriental y occidental de la ciudad de Tunja, especialmente en la parte occidental de la loma de San Lázaro. En esa misma región, en la margen derecha de la quebrada, se avistan afloramientos de un manto de carbón que tiene aproximadamente 1.8 m de espesor. Este manto se correlaciona con otro encontrado en la margen izquierda, perteneciente al miembro medio de la Formación. Sin embargo, en esta zona, falta la presencia del miembro superior debido a la presencia de la falla Tras del Alto, que coloca en contacto fallado rocas de la Formación Guaduas con las de la Formación Cacho.

➤ La Formación Conejo (Kscn)

La Formación Conejo (Kscn), estudiada por Renzoni (1967), tiene su ubicación en el carretable Oicatá-Chivatá, más precisamente en la Vereda San Rafael, cercana al Alto del Conejo. Con un espesor variable entre 265 y 370 m, esta formación se compone de capas intercaladas, iniciando con areniscas de grano medio a grueso, seguidas por arcillolitas grises y lutitas negras en la base. Más arriba, se presentan tres bancos de

arcillolitas grises que se vuelven más gruesos en la parte superior, alternados con bancos de areniscas blancas compactas de grano medio. Prosiguiendo, se encuentran areniscas de tonalidad café combinadas con limolitas grises. En la cúspide, se evidencia un banco de arenisca blanca de grano grueso a fino, con formaciones concrecionadas; y en la parte más alta del estrato, es posible hallar niveles esporádicos de caliza.

La porción estudiada de la Formación abarca la mayoría del territorio del municipio de Ventaquemada, formando parte del anticlinal de Ventaquemada. En el recorrido por la carretera hacia el Municipio de Turmequé, específicamente en las Veredas de Choquirá y El Hato, se pueden apreciar fragmentos de la secuencia de la Formación Conejo. Esta secuencia presenta intercalaciones de areniscas compactas de grano fino, que van desde tonos amarillos a naranjas, junto con lutitas, arcillolitas y shales que varían en tonalidades entre naranjas y negras. En la zona intermedia, destacan diversas capas, con grosores de 1 a 8 metros, que son compactas, cuarzosas y exhiben tonos que van desde el amarillo hasta el rosado. Hacia la parte alta, una vez más emergen intercalaciones de lutitas, areniscas, arcillolitas y shales.

➤ Formación Labor y Tierna (Ksgl)

La Formación Labor y Tierna (Ksgl) recibió su denominación de Hubach (1931) debido al hallazgo de una secuencia en la carretera Ramiriquí-Boyacá. Esta formación está constituida por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, que son compactas y presentan alta permeabilidad. En la porción superior, se despliega una secuencia de limolitas y arcillolitas silíceas de tono gris claro, con estratificación evidente, seguidas por areniscas cuarzosas de grano fino a medio. La Formación Labor y Tierna ostenta un espesor aproximado de 226 m.

En el área de estudio, se observa una secuencia que engloba bancos sólidos de areniscas cuarzosas con estratificación clara y diaclasas leves. Estos se suceden con una capa de arenisca cuarzosa, de mayor espesor y mayor competencia que la previa. Luego, aparecen varias capas de lutitas intercaladas con areniscas, y hacia la base, se presentan lutitas plegadas en tonalidades amarillas y grises. Esta formación forma parte de los flancos de los sinclinales de Albarracín-Ventaquemada y Puente de Boyacá, así como de los anticlinales Gachaneque, Ventaquemada-Tunja, Consumidero y Bojirque. Se distribuye a través de varias Veredas, como Parroquia Vieja, Estancia Grande, Bojirque, Boquerón y Puente de Boyacá, entre otras.

6.3.2 Geología Estructural y Tectónica

La zona de estudio se encuentra al sur del área urbana de la Ciudad de Tunja y está influenciada por el pliegue característico del sinclinal de Tunja.

El Anticlinal de Arcabuco: Es una estructura cuya amplitud no supera los dos kilómetros y presenta el mismo patrón estructural que el Sinclinal de Tunja. Este pliegue se ve afectado por el desplazamiento transversal de la Falla de Tunja e involucra las formaciones Guaduas y Labor y Tierna.

El Sinclinal de Cucaita: Es el pliegue más cercano a la zona de estudio y se manifiesta morfológicamente como escarpes producidos por la erosión de retroceso en las crestas de las estructuras anticlinales cercanas a los sinclinales. Esta región se caracteriza principalmente por una tectónica sin presencia de fallas superficiales; en su lugar, parece ser que las capas cretácicas se acomodan a una tectónica de fallas más profundas.

El Sinclinal de Tunja: Representa, desde un punto de vista morfológico, el extremo septentrional del Altiplano Cundi-Boyacense. Define una depresión de primer orden a una distancia media entre sus límites más altos, aproximadamente a 17-19 km al este del Anticlinal de Arcabuco y a 17-19 km al oeste del Alto de Topa.

6.3.3 Geología Local

La zona de estudio se encuentra en la región central del sinclinal, ubicada en la parte baja del costado occidental del sinclinal, en un área casi plana que se considera propensa a inundaciones. El sinclinal de Tunja se encuentra entre los anticlinales de Arcabuco y Toca, separados por unos 38 km, que son las estructuras circundantes.

Este sinclinal define tres áreas bien delimitadas en la ciudad, donde la depresión longitudinal de primer orden, con una amplitud que disminuye visiblemente hacia el norte y el sur, es una de las zonas de mayor desarrollo urbanístico en la ciudad en la actualidad. Las vergencias en los dos flancos son opuestas y apuntan hacia los márgenes de la depresión, dando la apariencia de una cierta simetría en los pliegues de segundo orden, ya que la vergencia ocurre a lo largo del propio eje sinclinal. Actualmente, el flanco occidental tiene una gran parte de su área con un desarrollo urbanístico avanzado, mientras que el flanco oriental muestra un desarrollo incipiente. En el flanco del anticlinal de Tunja, los cabeceos son diversos y mantienen una tendencia en dirección noreste.

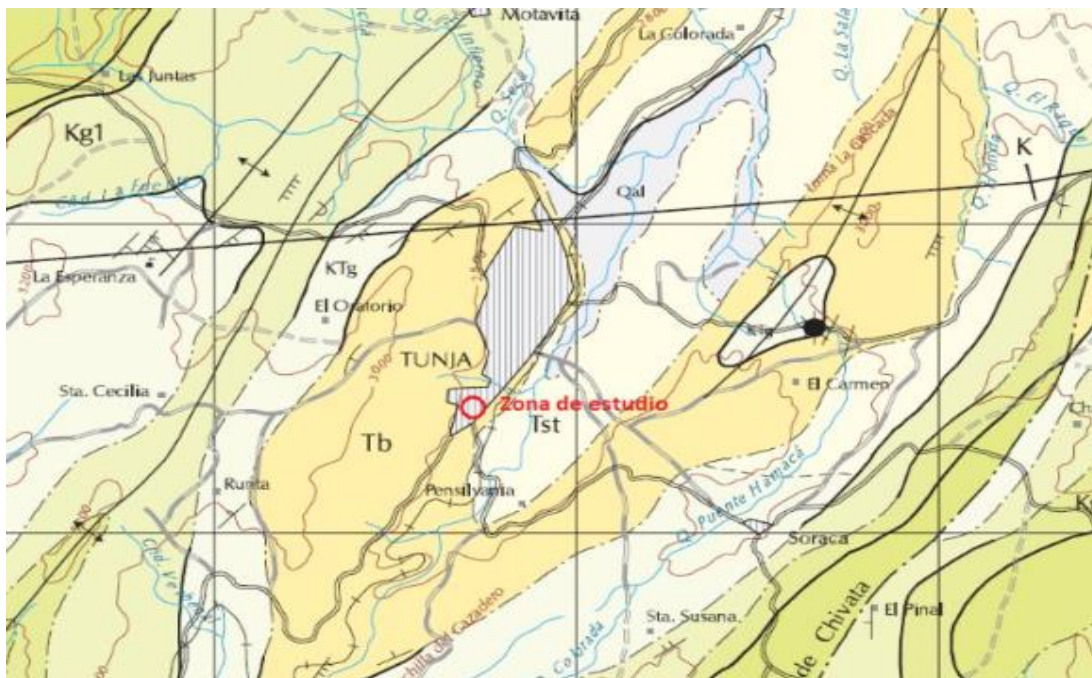


Figura 26. Geología Local

Fuente: INGEOMINAS Plancha 191, 2023

Depósitos Fluvioacústres (Qfl) son la capa superficial que se encuentra en el área seleccionada para el desarrollo de la construcción. Está formada por materiales erosionados de las formaciones presentes en la parte alta del sinclinal, compuestos principalmente por arenas y material fino que han sido transportados por el agua y depositados en una franja de terreno paralela al flanco occidental, donde se produce un cambio en la pendiente. A pesar de ser un depósito reciente, el material muestra cierto grado de consolidación.

La Formación Bogotá (Tpb) se compone de una sucesión uniforme de arcillolitas en tonalidades mezcladas, que abarcan el gris, violeta y rojo. Estas capas están dispuestas en forma de bancos separados por niveles de areniscas arcillosas que van desde blancas hasta amarillas. Esta formación emerge en ambos flancos del sinclinal de Tunja. Van Der Hammen (1958) dató esta formación en el Paleoceno superior y el Eoceno inferior, evidenciando coherencia con las areniscas de la Formación Cacho, mientras que en su parte alta presenta una discontinuidad con respecto a la Formación Tilatá.

En la región, se extienden extensos afloramientos de esta Formación, distribuyéndose ampliamente en ambos lados del sinclinal. Constituye una de las unidades geológicas fundamentales en la generación de cárcavas profundas y extensas. La Formación Bogotá se subdivide en cuatro conjuntos litológicos, siendo el último o superior el que no se observa completamente en su extensión.

El primer conjunto se inicia con areniscas arcillosas de variados colores en su base, sobre las cuales reposan areniscas compactas y cuarzosas de grano fino, intercaladas ocasionalmente con arcillolitas grises. Justo encima de estas, se hallan arcillolitas grises y amarillas, junto con un estrato de arenisca gris blanquecino de grano grueso y matriz caolinítica. Este banco, de textura frágil, entra en contacto con una arenisca gris claro de grano fino y matriz caolinítica. A continuación, se presentan arcillolitas grises con delgadas intercalaciones de areniscas amarillentas. Inmediatamente después, surge un banco de 8 metros de espesor compuesto por una arenisca gris, de grano fino y cuarzosa, con moscovita y biotita dispuestas en lentes, confiriéndole un aspecto oscuro no continuo.

6.4 HIDROLOGÍA

La zona de interés está ubicada en la microcuenca del río Jordán, en su punto más alto o lugar del nacimiento de esta cuenca, pertenece a la Cuenca del río Chicamocha. La precipitación de Tunja es de media a baja comparada con otras zonas del país, por ende, la zona donde se localiza el sitio de estudio, corresponde a un lugar de baja susceptibilidad a inundaciones, gracias a su configuración topográfica, sin embargo hacia la parte baja de la ladera, esta condición se vuelve crítica, pues las pendientes que posee son muy bajas, generando amplias zonas de amortiguamiento de las grandes avenidas que tiempo atrás se inundaban y se fueron desecando para uso urbano.

Cauces permanentes

En este sector el posible estancamiento de aguas, además de que, en este sitio concurren los canales superficiales y drenajes que provienen de las partes altas, los cuales desembocan en el río Jordán. Allí se presentan estratos superficiales saturados en tiempos de precipitación, pero los niveles freáticos en general se mantienen altos a pocos metros del nivel del terreno y alcanzan en su mayoría, la superficie del terreno en época invernal, esto, debido a su pendiente y altura con que cuenta la zona.

Cuenca	Sub cuenca	Microcuenca	área Km2	Perímetro Km
Magdalena	Jordán	Jordán	37,63	37,65
		Las cebollas	23,25	22,1
		Puente Hamaca- la cascada	12,46	17,55
	La Vega	El Cangrejo	19,62	24,05

Tabla 4. Aportación Microcuencas

Fuente: Autores

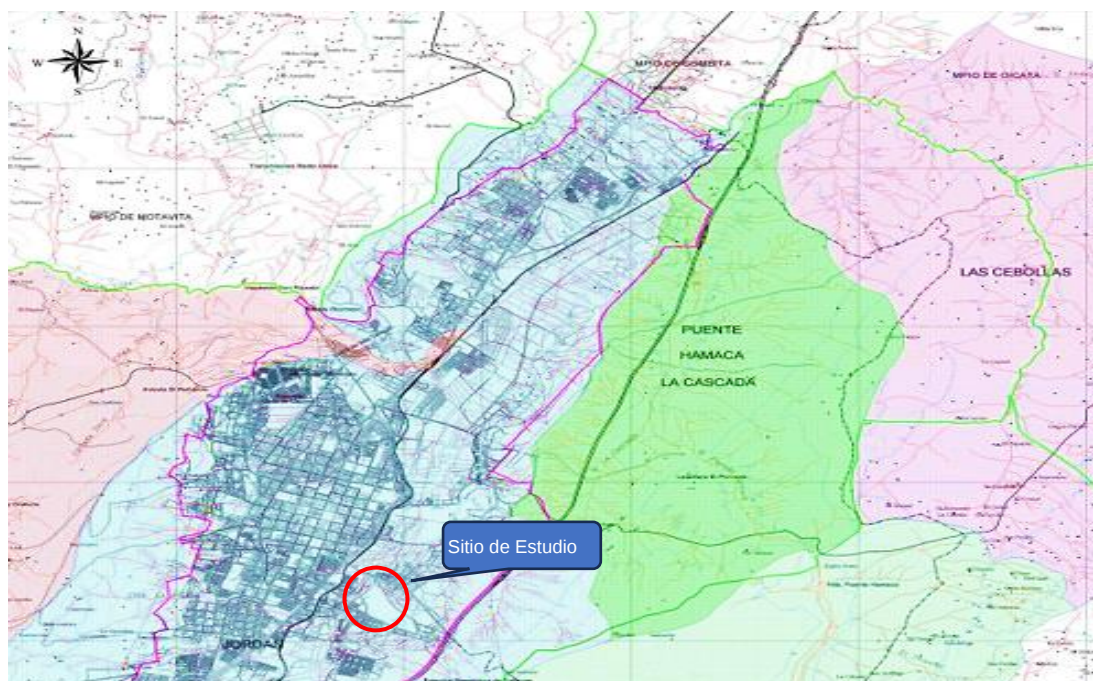


Figura 27. Hidrografía del Municipio

Fuente: Geo portal, IGAC 2023

La Represa de Teatinos, es la principal fuente de recurso hídrico de la ciudad de Tunja, esta abastece en su totalidad el área urbana, pertenece a otra cuenca hidrográfica y en la ciudad la microcuenca de San Ricardo es la más grande junto con la del río Jordán, son las responsables de las inundaciones en la parte baja de la ciudad, sin embargo, tres ríos atraviesan tu territorio:

Río Jordán: Nace en la región rural del sur de Tunja y forma parte de la cuenca alta del río Chicamocha. Fluye hasta desembocar en el embalse La Playa, ubicado en el municipio de Tuta. Cruza la ciudad de sur a norte y, en el pasado, su curso bajo constituía un humedal que provocaba importantes inundaciones durante la temporada de lluvias. Anteriormente, también se vertían aguas negras en este cauce, pero se han construido interceptores a lo largo de la ciudad para tratar de descontaminar el río.

Cuenca alta: El río Jordán tiene su origen en los páramos de la vereda de Runta, situada en la parte sur de la ciudad. Su nacimiento se da en las cadenas montañosas de la cordillera oriental, desde donde desciende hacia el oeste, recorriendo el valle de la ciudad. A medida que avanza, se convierte en el principal flujo de agua de la urbe y atraviesa franjas de terreno que antes formaban parte de los humedales y zonas pantanosas del sureste de la ciudad. Estos ecosistemas han ido desapareciendo debido al crecimiento urbano. Para controlar su curso inicial, el río ha sido canalizado mediante un canal trapezoidal de concreto, cuya sección tiene una base de 2.5 metros de ancho con paredes inclinadas.

A lo largo del tiempo, el curso del río ha sido objeto de constantes modificaciones y las riberas han sido reconstruidas en respuesta a diversas inundaciones. En áreas no canalizadas, se han construido barreras de contención que alcanzan una altura de hasta 4 metros para evitar desbordamientos. Cerca de la zona Centro Norte, el río se encuentra con el río La Vega y continúa su recorrido hacia el noreste, pasando por los municipios de Cómbita y Oicatá. Finalmente, desemboca en el Embalse de La Playa, ubicado en el norte del Área Metropolitana.

Río La Vega: Este río nace en la región rural del suroccidente de la ciudad de Tunja, específicamente en los municipios de Motavita, Combita y Sora, formando parte de la cuenca alta del río Chicamocha. Se trata de la microcuenca más grande de la ciudad y es responsable de los caudales que causan inundaciones en el área donde se lleva a cabo el proyecto.

Su curso fluvial desemboca en el río Jordán, en el barrio Quince de Mayo de Tunja. Durante su trayecto, atraviesa los barrios Doña Limbania, La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, El Pozo Donato, y parte de Santa Inés y Quince de Mayo. En este corto recorrido, cada uno de estos barrios, que alguna vez fueron humedales, ha sido transformado en áreas urbanizadas, lo que ha contribuido a la ocurrencia de inundaciones durante la temporada de lluvias.

En el pasado, las aguas negras de estos barrios eran vertidas directamente en este río, pero en los últimos años, se han construido interceptores a lo largo de su curso para tratar de descontaminar el cauce y evitar la contaminación.

6.5 PRECIPITACIÓN Y CLIMA

En la figura 27, se observa el climograma de la ciudad de Tunja, donde se observa que la máxima precipitación mensual supera los 200 mm en tres meses del año, que son marzo, abril y mayo y dos meses del año que no superan los 130 mm que son enero y septiembre.

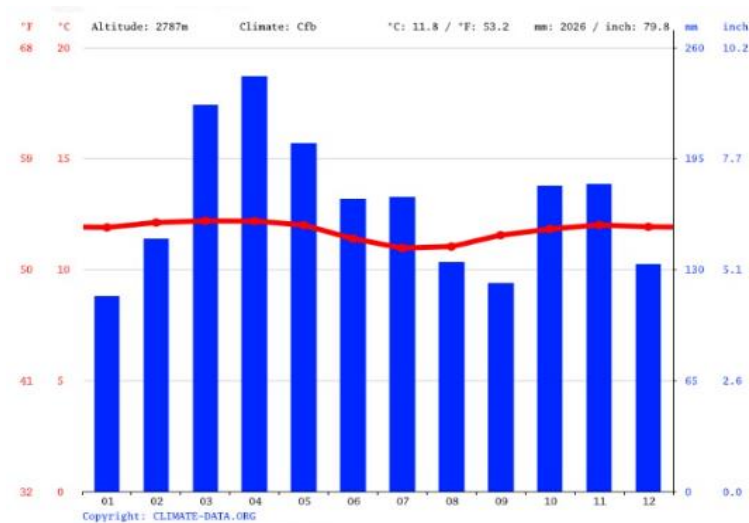


Figura 28. Precipitación Promedio Multianual Tunja

Fuente: Climate Data, 2023

El mes más seco es enero, con 114 mm de lluvia. La mayor precipitación se encuentra en abril, promediando 243 mm.

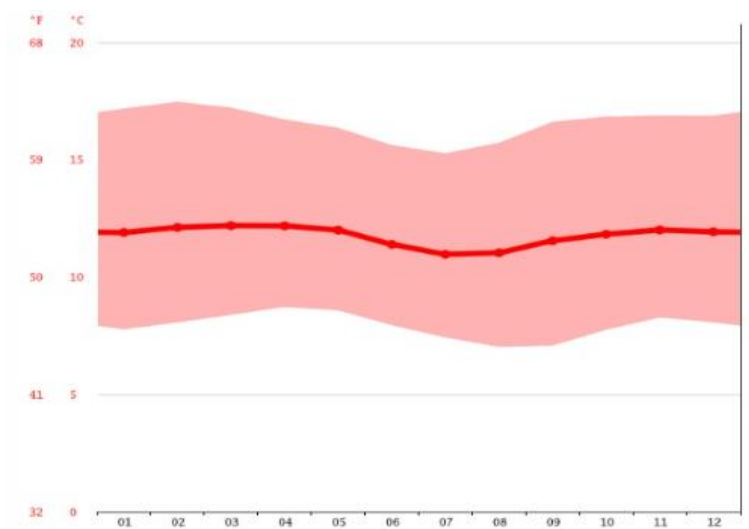


Figura 29. Variación Climática Tunja

Fuente: Climate Data, 2023

La temperatura en marzo promedios 12.2 °C., siendo el mes más caliente y julio es el mes más frío, con temperaturas promediando 11.0 °C. El mes con mayor humedad relativa es mayo (84.88 %). El mes con menor humedad relativa es febrero (79.24 %). El

mes con el mayor número de días lluviosos es julio (28.70 días). El mes con el número más bajo es enero (22.20 días).

6.5.1 Metrología de la Unidad Hidrológica

Se realiza una búsqueda de información pluviométrica para la zona de estudio y así obtener la unidad hidrológica de la parte alta del río La Vega, como se observa en la figura 29 la isoyeta del Municipio de Tunja.



Figura 30. Mapa de Isoyetas Municipio de Tunja

Fuente: Alcaldía de Tunja 2023

Según la figura 29, la unidad hidrológica tiene un rango de precipitación anual entre 640 a 610 mm, donde se ha observado que la precipitación promedio en esta área es mayor que en la ciudad de Tunja, pero menos que en el páramo teatinos. Aunque las lluvias en esta zona no son abundantes, con un promedio mensual de 80 mm, la intensidad de las precipitaciones en momentos específicos y la concentración de agua en áreas vulnerables en el área de estudio hace que se saturen los suelos y generen una corriente de agua que inunda la zona de la cárcava y zonas urbanas. Aunque no se presente cada época invernal, cuando la precipitación sobrepasa los niveles permitidos por el suelo, se producen encharcamientos en varios puntos de la zona de estudio ya que los sistemas de drenaje en la zona no tienen la capacidad suficiente para drenar el agua.

6.6 AMENAZAS PRESENTES

Se hace una revisión de los mapas disponibles del municipio en la página de la Alcaldía de Tunja, donde evidenciamos mapas de riesgo en zona urbana, amenaza sísmica y amenaza de inundación, en los cuales se puede observar los problemas presentes en la zona de estudio, que son importantes a tener en cuenta ya que son fenómenos naturales influyentes en las condiciones del suelo.

6.6.1 Amenaza en Zona Urbana

Se identifican las actividades o procesos sujetos a riesgo en la zona de estudio, así mismo cuantificar la probabilidad de estos eventos y analizar el daño asociado a su ocurrencia.



Figura 31. Amenazas Zona Urbana Municipio de Tunja

Fuente: Alcaldía de Tunja, 2023

En la zona delimitada podemos observar tipos de amenaza por erosión difusa o escurrimiento superficial en láminas o surcos de grado medio bajo, erosión en cárcavas de grado medio y erosión por escorrentía sub-superficial de grado alto.

6.6.2 Amenaza en Zona Sísmica

La ciudad de Tunja es considerada como zona de alta probabilidad de presentar un sismo, por lo cual es necesario revisar la intensidad del movimiento del terreno y posibles efectos causados por este.



Figura 32. Amenaza Sísmica Municipio de Tunja

Fuente: Alcaldía de Tunja, 2023

Se puede observar en la figura 31, que en sitio de estudio se encuentra en una susceptibilidad intermedia-alta debido a la respuesta dinámica de las formaciones presentes a la onda sísmica.

6.6.3 Amenaza de Inundación

Este sector se encuentra en una susceptibilidad intermedia-alta a presentar inundación como se observa en la figura 32.

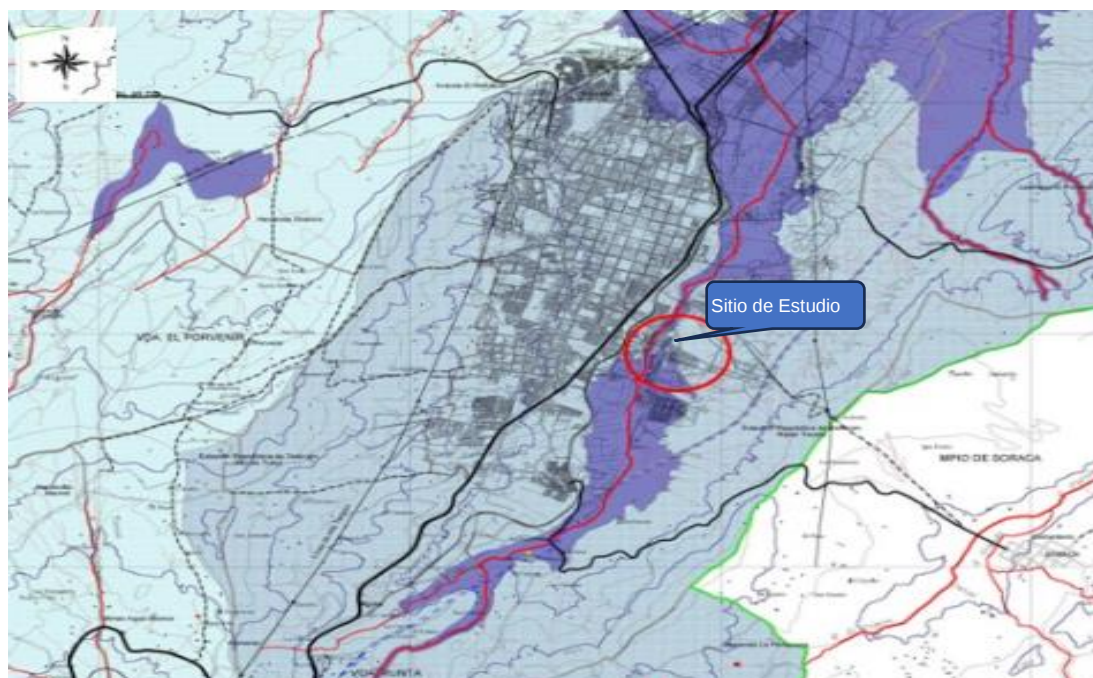


Figura 33. Amenaza de Inundación Municipio de Tunja

Fuente: Alcaldía de Tunja, 2023

8. INVESTIGACIÓN DEL SUELO

El reconocimiento de las propiedades geotécnicas de los materiales que componen el subsuelo de la zona de estudio, es una parte importante para lograr establecer los patrones del subsuelo para la definición de los parámetros del suelo de fundación. Este apartado involucra la exploración del subsuelo, la recopilación de muestras alteradas e inalteradas, el desarrollo tanto de los ensayos de laboratorio como de campo, esto, para establecer los criterios que respresentan el suelo para su respectivo análisis y diseños geotécnicos necesarios. A continuación se exponen las actividades de campo y laboratorio realizadas dentro del estudio de suelos y se dan a conocer los análisis de los resultados obtenidos.

7.1 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Se llevaron a cabo cuatro (4) sondeos utilizando equipo de perforación manual en los puntos de interés, con el objetivo de determinar las características físicas y mecánicas de los materiales presentes en el área y establecer las condiciones geotécnicas del subsuelo. Cada uno de estos sondeos abarcó profundidades de hasta 5 metros. Además de esto, se efectuó una exploración del subsuelo en cada sector para identificar las condiciones estratigráficas de la zona de estudio.



Figura 34. Exploración del Suelo

Fuente: Autores

En la tabla 1, se presentan las coordenadas de cada uno de los cuatro (4) sondeos ejecutados en el área de estudio, así mismo en los anexos se muestra la caracterización, datos obtenidos y cálculos realizados para cada una de las muestras y sondeos. Teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de interés, estos están proyectados para conocer las características geotécnicas de los diferentes materiales presentes en la zona de estudio.

ENSAYOS REALIZADOS				
N	SONDEO			
	1	2	3	4
Coordenadas	5°31'04.81" N 73°21'31.37" O	5°31'03.36" N 73°21'30.00" O	5°31'00.82" N 73°21'29.85" O	5°31'04.89" N 73°21'28.90" O
Profundidad (m)	4,20	3,50	4,50	3,80
Humedad Natural	8	7	8	7
Límites de Atterberg	3	2	3	3
Lavado Sobre tamiz N° 200	2	2	3	2
Granulometría	2	2	3	2
Gravedad Especifica	2	1	1	2
Corte Directo	1	~	~	~
Pesos Unitarios	2	2	~	~
Consolidación Unidimensional	~	1	~	1

Tabla 5. Cantidad y ensayos realizados por sondeo.

Fuente: Autores

En total se realizaron 16 metros de perforación, obteniendo muestras alteradas e inalteradas sobre las cuales se realizaron los ensayos nombrados en la Tabla 5, teniendo en cuenta la normativa colombiana INVIAS.

7.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

A partir de la información expuesta en las secciones anteriores, respecto a las apreciaciones de campo, los resultados obtenidos de la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio, es viable establecer la distribución de los diferentes tipos de materiales encontrados en la zona de estudio, así mismo las propiedades geotécnicas que ayudan a conocer el comportamiento de cada uno de los materiales.

En el sitio de estudio se encontraron suelos finos clasificados en superficie como arcillas de alta y baja plasticidad, unos con diferentes contenidos de arenas en profundidades que oscilan entre los 0,00 m y los 4,50 m. Al tener en cuenta las características

geomorfológicas encontradas en la zona de interés y basado en las características de los materiales encontrados durante la realización de los sondeos podría describirse la zona de estudio como una zona geotécnicamente bien definida.

La siguiente información presenta la explicación de cada uno de los sondeos, contando con los materiales encontrados en la exploración del subsuelo, secuencialmente se presentan las columnas estratigráficas y los resultados de los ensayos realizados en laboratorio, elaborados con cada una de las muestras analizadas.

7.3.1 Sondeo 1

En el perfil del sondeo uno, se tiene desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 2,5 m un estrato de arenas con arcillas de alta plasticidad (SC), se caracteriza por su tono de color café con trazas blancas y amarillas, cabe resaltar que el nivel freático se encontró a una profundidad de 1,40 m a partir de la superficie del terreno.

En este estrato además de presentar tonalidades diferentes se caracteriza por tener una humedad natural entre 4% y 66%, evidenciando el aumento exponencial de la humedad entre 1,00 m y 1,50.

Posteriormente se realizaron ensayos de límites de Atterberg, en el primero a una profundidad de 1,0 m, posee un límite líquido de 55,19%, un límite plástico de 40,47% teniendo como resultado un índice de plasticidad de 14,42%. En condiciones actuales, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

Después de esto se realizó el ensayo de pesos unitarios en este material, dando como resultado un peso unitario total de 1,76 t/ m³ y para la condición totalmente seca de 1,54 t/ m³. En el ensayo de gravedad específica se tiene un valor de 2,81.

A partir del ensayo de granulometría realizado sobre tamiz N° 200 se tiene un contenido de gravas 0,23%, una fracción de arenas de 54,79% y una fracción de finos de 44,98%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de arenas, pero a su vez va haber un aporte de material fino en una cantidad considerable, que puede resultar un suelo más permeable y con una resistencia considerable al corte.

Luego de esta capa, desde 2,50 m hasta 4,60 m, se presenta una arena arcillosa de baja plasticidad (SC), posee una tonalidad marrón con betas grisáceas, lo cual indica que a pesar de ser el mismo material tiene diferentes componentes químicos que cambian su tonalidad, además de esto, contiene una humedad natural promedio de 68% lo cual indica el aumento del contenido de humedad en el terreno a medida que se incrementa su profundidad.

Mediante el ensayo de límites de Atterberg, a una profundidad de 3,0m se tiene un límite líquido de 35,09, como también un límite plástico de 21,84% obteniendo como resultado un índice de plasticidad de 13,25%. Su comportamiento actual es de flujo, lo que puede

producir una deformación o desplazamiento de la capa, transportando partículas hacia la parte baja de la ladera

En el segundo ensayo de límites de Atterberg realizado, se tiene un límite líquido de 67,59, un límite plástico de 50,79% dando como resultado un índice de plasticidad de 16,80, estableciendo que su comportamiento es de flujo, lo que puede producir una deformación o desplazamiento de la capa, transportando partículas hacia la parte baja de la ladera

Después de esto se realizó el ensayo de pesos unitarios en este material, dando como resultado un peso unitario total de 1,62 t/ m³ y para la condición totalmente seca de 1,15 t/ m³, con un peso específico 2,63.

Finalmente, por medio del ensayo de penetración realizado al sondeo 1 a una profundidad entre 4,0 m y 4,60 m; se tiene un número de golpes entre 2 y 8, lo que indica que es un suelo muy blando que tiene baja resistencia y alta compresibilidad, el cual arroja un ángulo de fricción de 25°.

En el sondeo se registra nivel freático a una profundidad de 1,4 m.

Profundidad (m)	Litología	Descripción del suelo	Clasificación USCS	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (T/m ³)	γ_{seco} (T/m ³)	Gravedad Específica	Qu (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)	ϕ (°)	SPT (golpes por 15 cm)
0.0		Arena con arcillas de Alta Plasticidad	SC													
				4												
1.0				66	55,2	40,5										
1.5		Arena con arcilla de baja plasticidad	SC	62			0,2	54,8	45,0	1,76	1,54	2,81				
2.0				33												
2.5																
				41			0,0	79,9	20,1							
3.0		Arena con arcilla de baja plasticidad	SC	40	35,1	22,8						2,63				
3.5				44						1,62	1,15					
4.0				93	67,6	50,5										
																2
															25	4
																8
5.0		Arena con arcilla de baja plasticidad	SC													

Tabla 6. Columna Estratigráfica Sondeo 1

Fuente: Autores

7.3.2 Sondeo 2

En el lugar donde se realizó el sondeo 2, se encontró que desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 2,20 m se encuentra un estrato de arcilla de baja plasticidad (CL), el cuál se caracteriza por tener una tonalidad marrón oscuro. Se presenta una humedad natural que oscila entre el 21% y 24%, indicando la variación de humedad.

Posteriormente se realizaron ensayos de límites de Atterberg, en el primero a una profundidad de 1,0 m, posee un límite líquido de 35,0% , un límite plástico de 22,74% teniendo como resultado un índice de plasticidad de 12,26. En condiciones actuales, se encuentra en estado plástico lo cual evidencia que los cambios volumétricos debido a sobrecargas pueden ser considerables.

Realizando el ensayo de granulometría sobre tamiz N° 200 se tiene un contenido de gravas 3,55%, una fracción de arenas de 38,7% y una fracción de finos de 57,7%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de finos con arenas.

Se realizaron ensayos de pesos unitarios en este material, dando como resultado un peso unitario total de 1,95 t/ m³ y para la condición totalmente seca de 1,06 t/ m³, en el ensayo de gravedad específica se obtuvo un peso específico de 2,88.

En el siguiente estrato con profundidad de 2,30 m a 4,00 m; se tiene presencia de arcilla de alta plasticidad (CH), con una tonalidad marrón claro con trazas amarillas, se evidencia una humedad natural que oscila entre el 23% y 40%, indicando la variación de humedad a medida que se avanza en profundidad.

Posteriormente se realizaron ensayos de límites de Atterberg, en el primero a una profundidad de 3,5 m, posee un límite líquido de 55,6, un límite plástico de 32,8 teniendo como resultado un índice de plasticidad de 22,82. En condiciones actuales, se tiene un comportamiento plástico lo cual evidencia que los cambios volumétricos debido a sobrecargas pueden ser considerables.

Realizando el ensayo de granulometría sobre tamiz N° 200 se tiene un contenido de gravas 0,19%, una fracción de arenas de 32,10% y una fracción de finos de 67,71%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de finos, pero a su vez va haber un aporte de arena, y un porcentaje mínimo de gravas, es probable que se presente un comportamiento cohesivo y por la presencia de arenas en el suelo, podría proporcionar cierta resistencia al corte.

Después de esto se realizó el ensayo de pesos unitarios en este material, dando como resultado un peso unitario total de 1,18 t/m³ y para la condición totalmente seca de 1,14 t/m³.

Finalmente, por medio del ensayo de penetración realizado al sondeo 2 a una profundidad entre 2,90 m y 3,50 m; se tiene un número de golpes entre 2 y 4 el cuál arroja un ángulo de fricción de 24°.

Profundidad (m)	Litología	Descripción del suelo	Clasificación USCS	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (T/m ³)	γ_{seco} (T/m ³)	Gravedad Específica	Qu (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)	ϕ (°)	SPT (golpes por 15 cm)
0.0																
				21												
1.0		Arcilla de Baja Plasticidad	CL	24	35,0	22,7				1,95	1,06					
1.5				19								2,88				
2.0				21			3,6	38,7	57,7							
2.5				23												
3.0		Arcilla de Alta Plasticidad	CH	35			0,2	32,1	67,7							
																2
															24	3
																4
3.5				40	55,6	32,8				1,18	1,14					
4.0																

Tabla 7. Columna Estratigráfica Sondeo 2

Fuente: Autores

7.3.3 Sondeo 3

En la zona del sondeo 3, desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 0,25 m se encontró la subbase de relleno de la vía donde se realizó la exploración. De 0,25 a 0,65 se encontró la base de relleno. Desde 0,65 hasta 2,0 m se tiene un estrato de arcilla de baja plasticidad (CL), se caracteriza por su tono de color marrón con trazas naranjas, cabe resaltar que el nivel freático se encontró a una profundidad de 1,80 m a partir de la superficie del terreno.

En este estrato además de presentar tonalidades diferentes se caracteriza por tener una humedad natural que oscila entre el 18% y 20%, su humedad varía respecto al aumento de la profundidad.

Posteriormente se realizaron ensayos de límites de Atterberg, en el primero a una profundidad de 2,0 m, posee un límite líquido de 48,06%, un límite plástico de 33,12% teniendo como resultado un índice de plasticidad de 13,33. En condiciones actuales, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

Realizando el ensayo de granulometría sobre tamiz N° 200 se tiene un contenido de gravas 0,2%, una fracción de arenas de 22,68% y una fracción de finos de 77,12%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de finas, pero a su vez va haber un aporte de arenas y casi sin presencia de gravas.

Luego en la profundidad restante desde 2,10 m hasta 4,90 m, se presenta arcilla de alta plasticidad (CH), posee una tonalidad marrón claro con trazas naranjas, lo cual indica que a pesar de ser el mismo material tiene diferentes minerales que cambian su tonalidad, además de esto, contiene una humedad natural que oscila entre de 24% y 31% lo cual indica la variabilidad de la humedad según su profundidad.

Se realizaron dos ensayos de límites de Atterberg a diferentes profundidades, el primero realizado a una profundidad de 3,0 m se obtiene un límite líquido de 50,75, un límite plástico de 33,02 dando como resultado un índice de plasticidad de 17,72, se tiene un comportamiento plástico lo cual evidencia que los cambios volumétricos debido a sobrecargas pueden ser considerables.

El segundo límite realizado a una profundidad de 4,5 m se obtiene un límite líquido de 51,49, un límite plástico de 33,0 dando como resultado un índice de plasticidad de 18,49, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

Se realizó el ensayo de granulometría sobre tamiz N° 200 a dos muestras a profundidades de 2,7 m y 3,5 m. En la primera se tiene un contenido de gravas 0,2%, una fracción de arenas de 10,7% y una fracción de finos de 89,1%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de finos, pero a su vez va haber un pequeño aporte de arenas y casi sin presencia de gravas. En el segundo se tiene un contenido

de gravas 0,0%, una fracción de arenas de 9,29% y una fracción de finos de 90,71%, por lo que se puede establecer que en este punto se compone de finos, pero a su vez va haber un pequeño aporte de arenas y sin presencia de gravas.

En el ensayo de gravedad específica para el sondeo 3, se obtuvo un peso específico de 2,75.

Finalmente, por medio del ensayo de penetración realizado al sondeo 3 a una profundidad entre 4,20 m y 4,90 m; se tiene un número de golpes entre 2 y 4 el cuál arroja un ángulo de fricción de 24°.

El nivel freático se tiene a 1,8 m.

Profundidad (m)	Litología	Descripción del suelo	Clasificación USCS	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (T/m³)	γ_{seco} (T/m³)	Gravedad Específica	Qu (kg/cm²)	Cu (kg/cm²)	ϕ °	SPT (golpes por 15 cm)
0.0		Sub base de relleno via														
		Base de relleno via														
	Arcilla de Baja Plasticidad		CL													
1.0				20			0,2	22,7	77,12							
1.5																
2.0				18	48,1	33,1										
	Arcilla de Alta Plasticidad		CH													
				24								2,75				
2.5																
				30			0,2	10,7	89,1							
3.0				25	50,8	33,0										
3.5				24			0,0	9,3	90,71							
4.0				31												
				29	51,5	32,4									24	3
																4
																2
5.0																

Tabla 8. Columna Estratigráfica Sondeo 3

Fuente: Autores

7.3.4 Sondeo 4

En el sitio del sondeo 4, desde la superficie del terreno hasta 3,60 m se tiene un estrato de arcilla de alta plasticidad (CH), se caracteriza por su tono de color blanco y beige.

En este estrato además de presentar tonalidades diferentes se caracteriza por tener una humedad natural que oscila entre el 15% y 60%, su humedad varía proporcionalmente al aumento de la profundidad.

Posteriormente se realizaron tres ensayos de límites de Atterberg, a diferentes profundidades; con el fin de conocer mejor sus características; el primero a una profundidad de 0,40 m, posee un límite líquido de 119,34%, un límite plástico de 88,82% teniendo como resultado un índice de plasticidad de 30,52. En condiciones actuales, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

El segundo límite realizado a una profundidad de 1,8 m se obtiene un límite líquido de 126,36, un límite plástico de 97,28 dando como resultado un índice de plasticidad de 29,08, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

El tercer límite realizado a una profundidad de 3,2 m se obtiene un límite líquido de 104,33, un límite plástico de 74,81 dando como resultado un índice de plasticidad de 29,52, se encuentra en estado semisólido, lo cual resulta ser favorable, pues ante la aplicación de cargas sobre este nivel, el suelo no va a presentar cambios o deformaciones importantes, sino que, por el contrario, la capacidad de soporte será óptima.

Se realizó el ensayo de granulometría sobre tamiz N° 200 a dos muestras a profundidades de 1,2 m y 2,8 m. En la primera se tiene un contenido de gravas 0,0%, una fracción de arenas de 0,19% y una fracción de finos de 99,81%. En el segundo ensayo se tiene un contenido de gravas 0,0%, una fracción de arenas de 0,12% y una fracción de finos de 99,89%, por lo que se puede establecer que el material del sondeo cuatro se compone de finos y debido a esto se pueden generar problemas de estabilidad gracias a su alta cohesión y baja resistencia al corte de este tipo de suelos. Los suelos con alta cantidad de finos, tienden a expandirse cuando absorben agua y a contraerse cuando estos se secan, lo que podría causar problemas de asentamientos y agrietamientos en estructuras edificadas sobre este tipo de suelo, que es la problemática actual.

En los ensayos de gravedad específica para el sondeo 4 a una profundidad de 0,40 m es de 2,73 y a una profundidad de 3,2 m es de 2,84

Profundidad (m)	Litología	Descripción del suelo	Clasificación USCS	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (T/m ³)	γ_{seco} (T/m ³)	Gravedad Específica	Qu (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)	ϕ (°)	SPT (golpes por 15 cm)
0.0																
				15	119,3	88,7						2,73				
				40												
1.0																
				36			0,0	0,2	99,8							
1.5																
				40	126,4	96,6										
2.0																
				40												
2.5																
				43			0,0	0,1	99,9							
3.0																
				60	104,3	74,9						2,84			26	4
																4
																9
3.5																
4.0																

Tabla 9. Columna Estratigráfica Sondeo 4

Fuente: Autores

7.3 PERFIL GEOTÉCNICO

Después de clasificar el material presente en la zona de estudio e identificando sus características básicas y mecánicas, se realiza el perfil geotécnico del sector, para determinar la forma como se encuentran los estratos del suelo.

Se puede observar en la figura 34, que la zona de estudio se encuentra definida por arcillas, en el primer sector con presencia de arenas y el resto con pocos contenidos de finos, este se encuentra con plasticidades altas y bajas, lo que hace que se presenten cambios volumétricos ante la presencia de flujo de agua por infiltración en el suelo o por escorrentía sub superficial

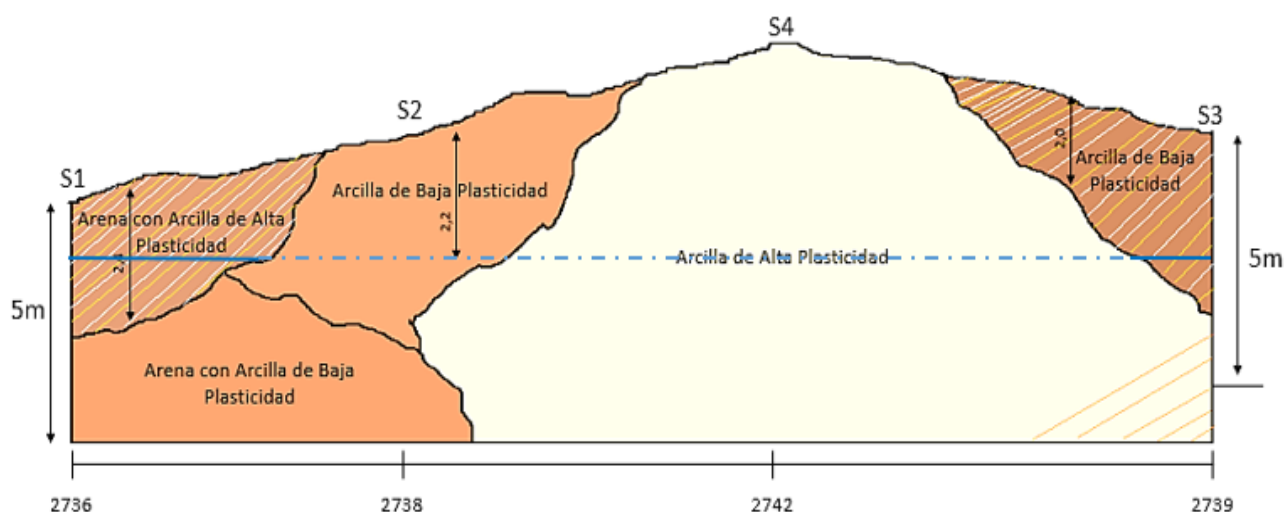


Figura 35. Perfil Geotécnico del Sitio de Estudio

Fuente: Autores

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta la clasificación de estos suelos y las características de los materiales presentes después de realizar ensayos de laboratorio con el fin de conocer sus propiedades, se analiza según sus contenidos granulométricos, la humedad de los materiales, límites de Atterberg y parámetros de resistencia, donde se encuentran materiales similares en los cuatro sondeos realizados y así poder establecer el comportamiento que presenta el suelo y las condiciones que podría presentar a futuro, ante el cambio de contenido de humedad o la presencia de un evento sísmico, los cuáles son eventos que se deben considerar.

7.4.1 Granulometría

Se seleccionaron muestras de cada uno de los sondeos, con el fin de conocer su caracterización granulométrica, para esto fue necesario macerar la muestra para posteriormente lavarla sobre el Tamiz N° 200, dejarla en un proceso de secado al horno por 24 horas a 110 °C según lo indica la norma y finalmente pasar la muestra por una serie de tamices de diferente tamaño de malla, como se muestra en la siguiente tabla:

Número de tamiz	Malla del Tamiz (Mm)
1/2	12,7
3/8	9,51
1/4	6,35
4	4,76
8	2,38
10	2
16	1,19
20	0,841
30	0,595
40	0,425
50	0,297
80	0,177
100	0,149
200	0,074
Fondo	0

Tabla 10. Medida en mm de la malla de los Tamices

Fuente: Autores

Se realizó el ensayo de granulometría para nueve (9) muestras, distribuidas en los cuatro sondeos de la siguiente forma; (2) muestras del sondeo 1, (2) muestras del sondeo 2, (3) muestras del sondeo 3 y (2) del sondeo 4, con el fin de conocer el contenido granulométrico de la zona. Posteriormente, se graficaron los datos obtenidos para identificar la curva granulométrica de cada muestra.

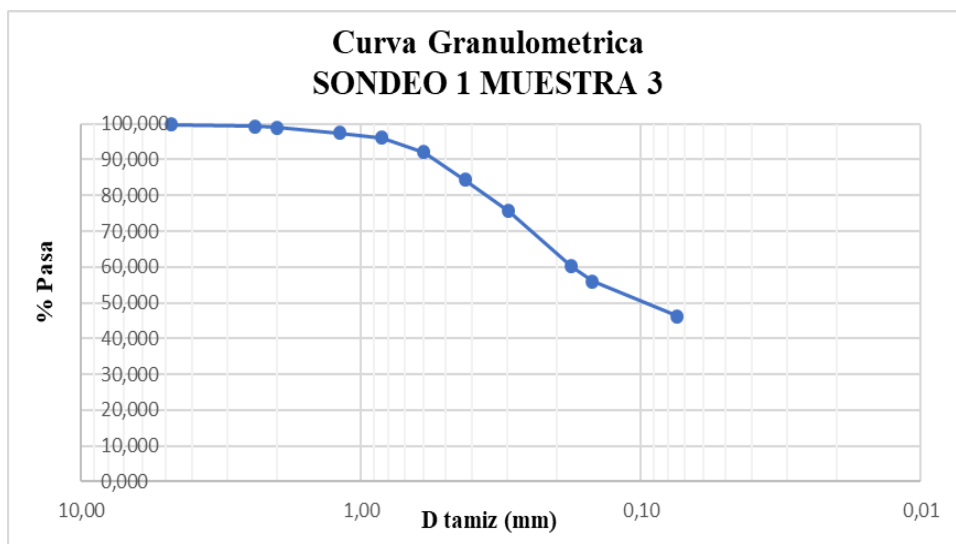


Figura 36. Curva Granulométrica Sondeo 1 Muestra 3

Fuente: Autores

En la figura 35, se observa la curva granulométrica para el sondeo 1 muestra 3, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 46,3 %.

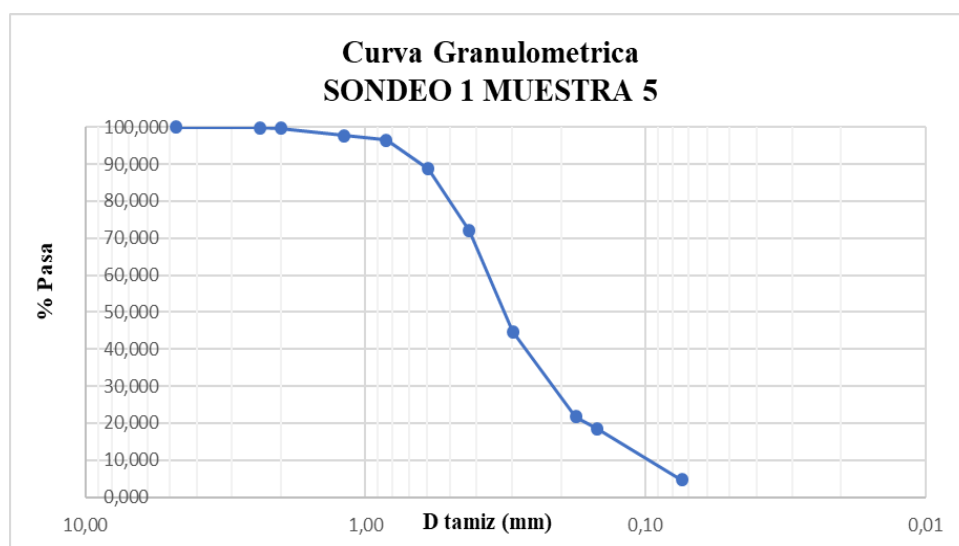


Figura 37. Curva Granulométrica Sondeo 1 Muestra 5

Fuente: Autores

En la figura 36, se observa la curva granulométrica para el sondeo 1 muestra 5, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 4,6 %. Comparando con la curva granulométrica de la anterior muestra del mismo

sondeo, el porcentaje que pasa el tamiz N°200 es menor a medida que se aumenta su profundidad.

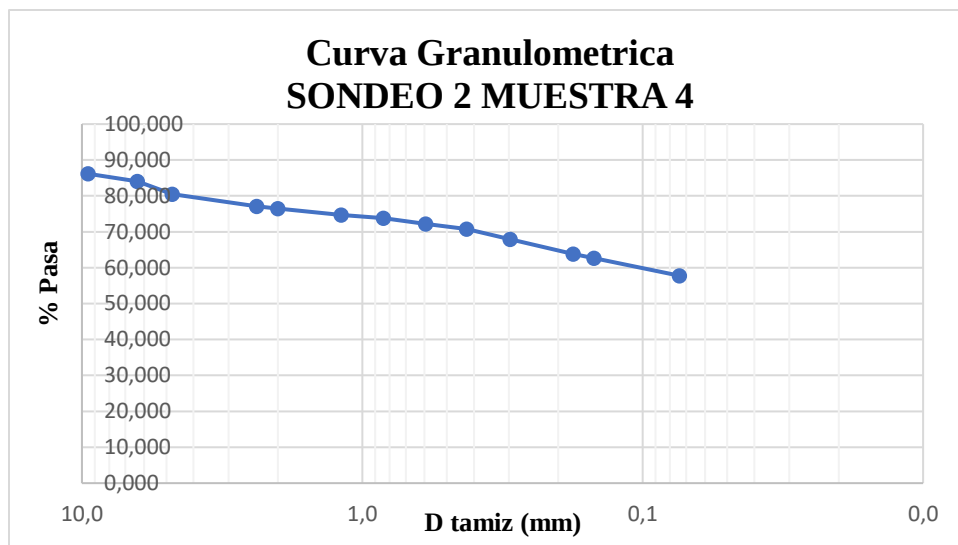


Figura 38. Curva Granulométrica Sondeo 2 Muestra 4

Fuente: Autores

En la figura 37, se observa la curva granulométrica para el sondeo 2 muestra 4, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. Entre el sondeo 1 y sondeo 2 podemos comparar la diferencia de forma de la curva granulométrica. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 57,7%.

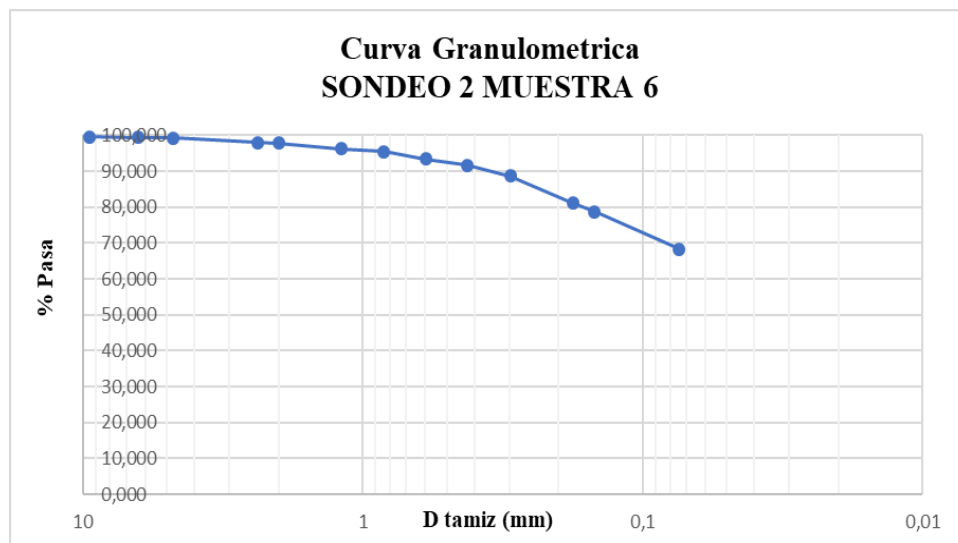


Figura 39. Curva Granulométrica Sondeo 2 Muestra 6

Fuente: Autores

En la figura 38, se observa la curva granulométrica para el sondeo 2 muestra 6, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. A medida que se incrementa su profundidad, el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es mayor, en este caso observamos que pasa un 68,3 %.

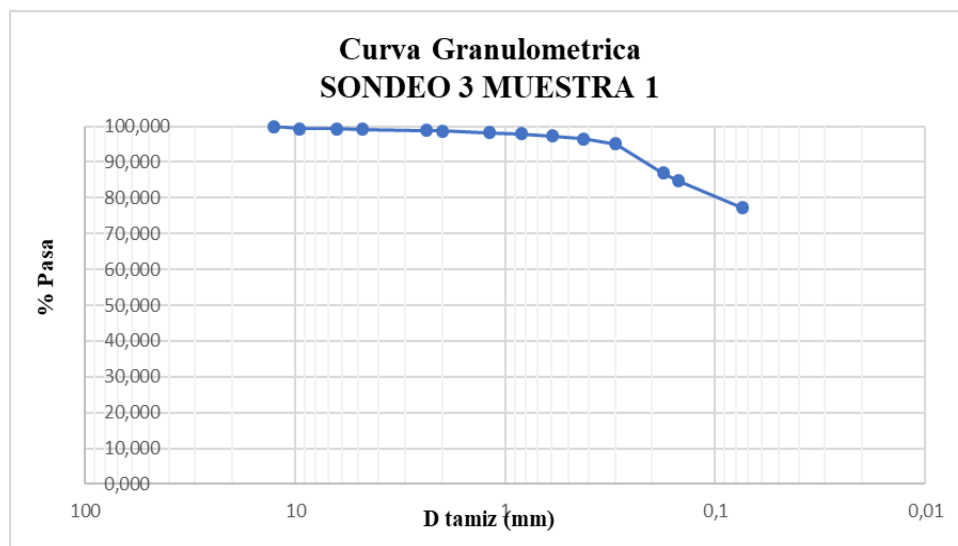


Figura 40. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 1

Fuente: Autores

En la figura 39, se observa la curva granulométrica para el sondeo 3 muestra 1, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 77,1 %.

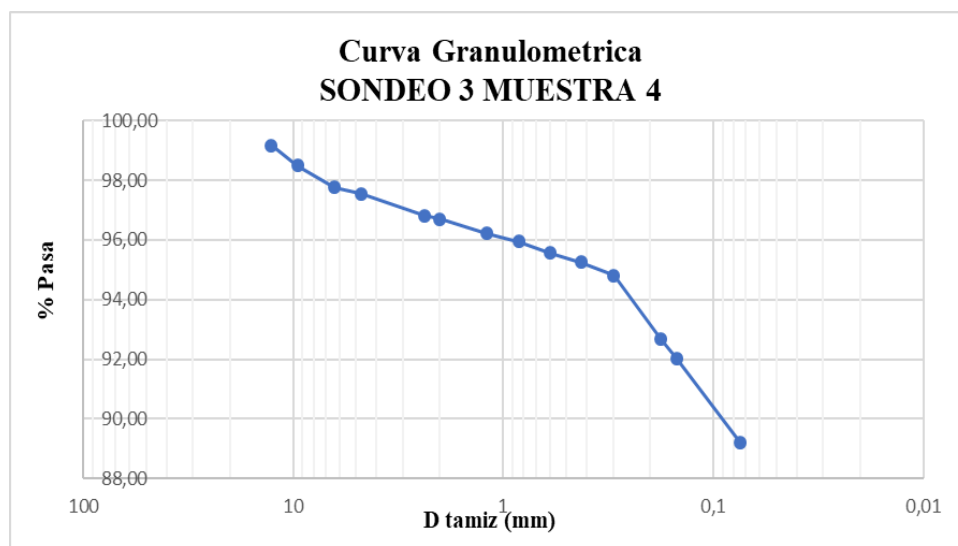


Figura 41. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 4

Fuente: Autores

En la figura 40, se observa la curva granulométrica para el sondeo 3 muestra 4, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. Entre el sondeo 2 y sondeo 3 podemos comparar la diferencia de forma de la curva granulométrica. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 89,1%.

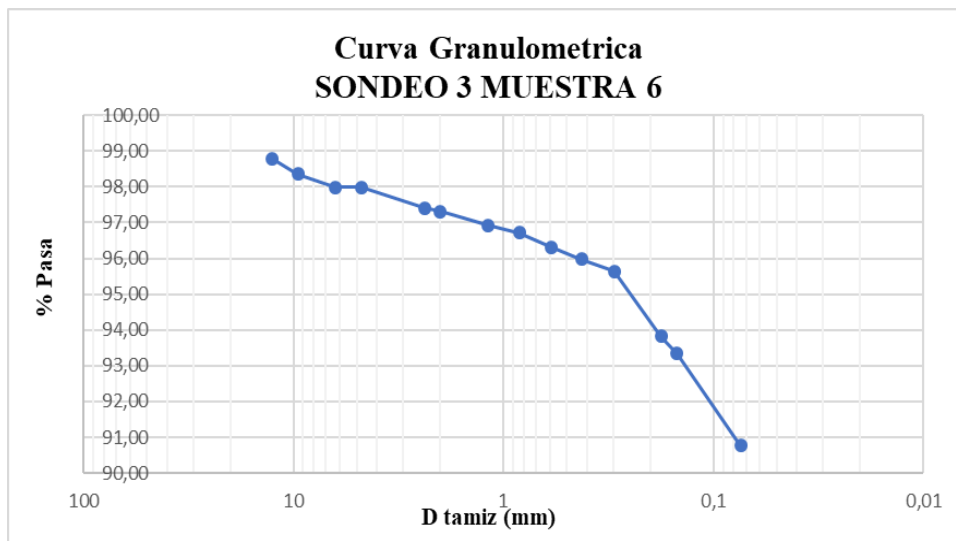


Figura 42. Curva Granulométrica Sondeo 3 Muestra 6

Fuente: Autores

En la figura 41, se observa la curva granulométrica para el sondeo 3 muestra 6, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. A medida que se incrementa su profundidad, el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es mayor, en este caso observamos que pasa un 90,7 %.

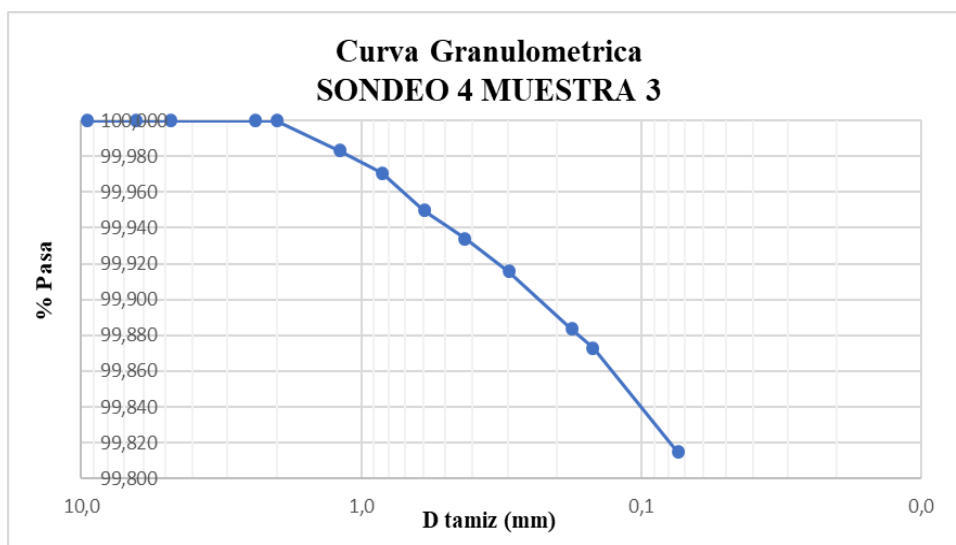


Figura 43. Curva Granulométrica Sondeo 4 Muestra 3

Fuente: Autores

En la figura 42, se observa la curva granulométrica para el sondeo 4 muestra 3, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 99,8 %.

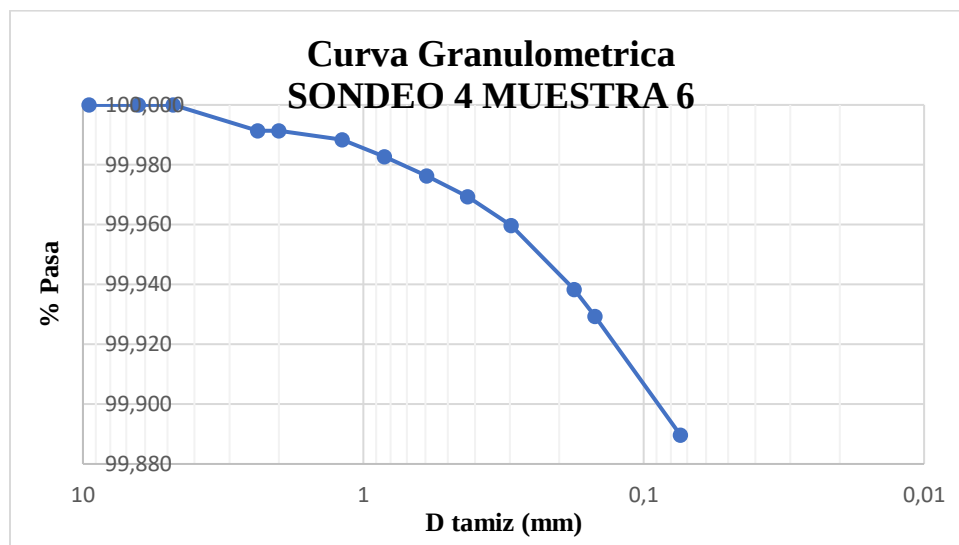


Figura 44. Curva Granulométrica Sondeo 4 Muestra 6

Fuente: Autores

En la figura 43, se observa la curva granulométrica para el sondeo 3 muestra 4, donde se grafica el diámetro de la malla de los tamices vs el porcentaje de material que pasa por cada uno de los tamices. En este caso observamos que por el tamiz N°200 pasa un 99,8 %. Podemos comparar el sondeo 4 con los anteriores, que casi el 100% de la muestra para por el tamiz N°200.

7.4.2 Contenido Granulométrico

De acuerdo al ensayo de granulometría y de lavado sobre tamiz N°200, se puede concluir que en los cuatro sondeos, predominan materiales Finos. Haciendo un análisis de cada uno de los sondeos, se observa que en el sondeo uno se encontraron materiales arenosos, con porcentajes de finos de más del 20%, por el contrario en el sondeo dos, va disminuyendo el porcentaje del material arenoso, e incrementando la cantidad de finos. En el sondeo tres, es menos del 20% del material arenoso, llegando al sondeo cuatro con menos del 1% de contenido de arenas.

El siguiente análisis tiene el fin de realizar la distribución granulométrica para cada uno de los sondeos según las muestras extraídas, realizando un tamizado desde el tamiz (3/8) de malla de 9,51 mm hasta el tamiz numero (200) de malla de 0,074 mm incluyendo el fondo como está establecido en la norma INVIAS E 213-13.

7.4.2.1 Sondeo 1

Inicialmente se analiza una muestra extraída a una profundidad entre 1,20 m y 1,65 m, que hace parte del estrato arena con arcilla de alta plasticidad (SC), donde se establece que el material predominante son las arenas, el cuál determina el comportamiento del estrato, ya que tiene la siguiente franja granulométrica: Arenas 54,7%, Finos 44,9% y Gravas 0,23%; con los resultados anteriores, se puede determinar que se presentan fenómenos de erosión y retención de agua, afectando considerablemente la cimentación y la estructura del lugar.

Continuando el análisis a una profundidad entre 2,10 m y 2,65 m, corresponde al estrato de arena con arcilla de baja plasticidad (SC) donde se encuentra un porcentaje de Arenas de 78,86%, Finos de 20,1% y 0,0% de Gravas, estableciendo que el comportamiento de este estrato y en general del sondeo uno, para las estructuras cimentadas en este lugar van ser soportadas por un suelo arenoso con contenido de material fino.

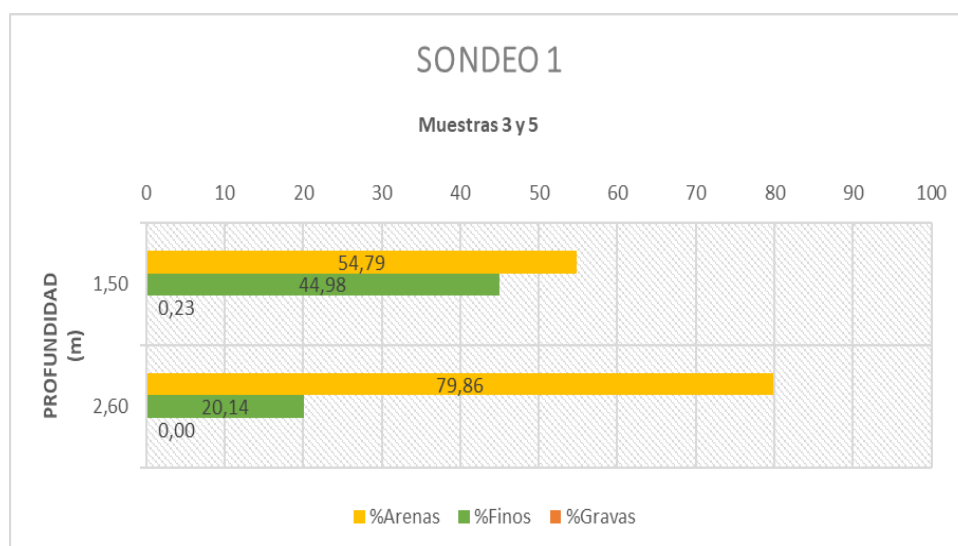


Figura 45. Perfil Granulométrico Sondeo 1

Fuente: Autores

7.4.2.2 Sondeo 2

En el sondeo 2 se hizo un análisis a una profundidad de 1,66 m a 2,00 m, que hace parte del estrato arcilla de baja plasticidad (CL) donde se establece que la fracción granular está entre finos y arenas, con un mínimo contenido de gravas con los siguientes porcentajes granulométricos: Arenas 38,7%, Gravas 3,5% y Finos 57,7%.

Posteriormente se analiza una muestra de 2,40 m a 2,90 m, que corresponde al estrato de arcilla de alta plasticidad (CH), presentando un porcentaje granulométrico de: Arenas

32,1%, Gravas 0,2% y Finos 67,7%, estableciendo que el material predominante en el sondeo dos, son finos con contenido de arena.

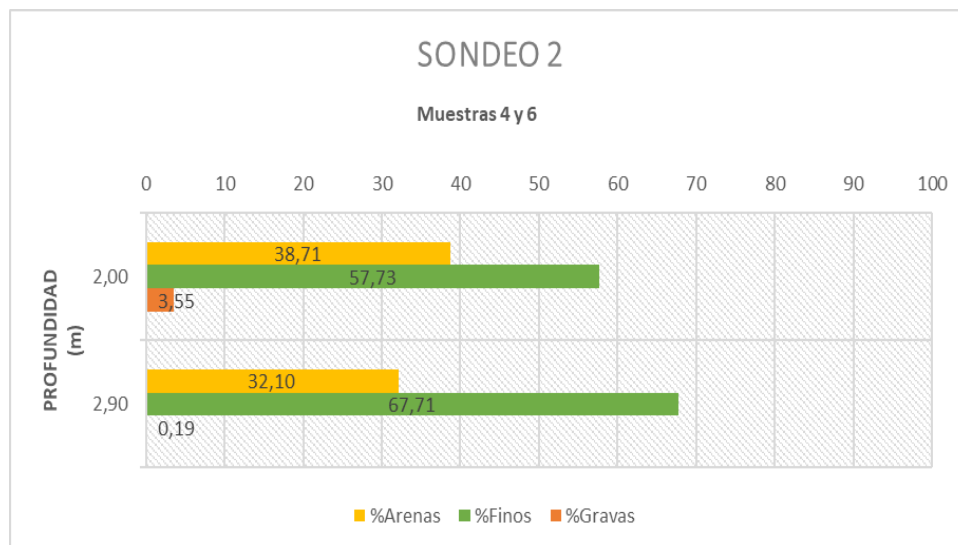


Figura 46. Perfil Granulométrico Sondeo 2

Fuente: Autores

7.4.2.3 Sondeo 3

En el sondeo 2 se hizo un análisis a una profundidad de 0,70 m a 1,40 m, que hace parte del estrato arcilla de baja plasticidad (CL) donde se establece que la fracción granular está entre finos y arenas, con los siguientes porcentajes granulométricos: Arenas 22,6%, Gravas 0,2% y Finos 77,1%.

Continuando el análisis a una profundidad entre 2,50 m y 3,00 m, corresponde al estrato de arcilla de alta plasticidad (CH), donde se encuentra un porcentaje de Arenas de 10,7%, Finos de 89,1% y 0,2% de Gravas, estableciendo que el comportamiento de este estrato y en general del sondeo tres, está compuesto por material fino y arenoso, el cuál determina su comportamiento.

Finalmente se analiza una última muestra extraída a una profundidad entre 3,00 m y 3,50 m, que hace parte del estrato arcilla de alta plasticidad (CH), donde se establece que el material predominante son finos, el cuál determina el comportamiento del estrato, ya que tiene la siguiente franja granulométrica: Arenas 9,3%, Finos 90,7% y Gravas 0,0%; con los resultados anteriores, se puede determinar que es suelo fino con poco contenido de arenas.

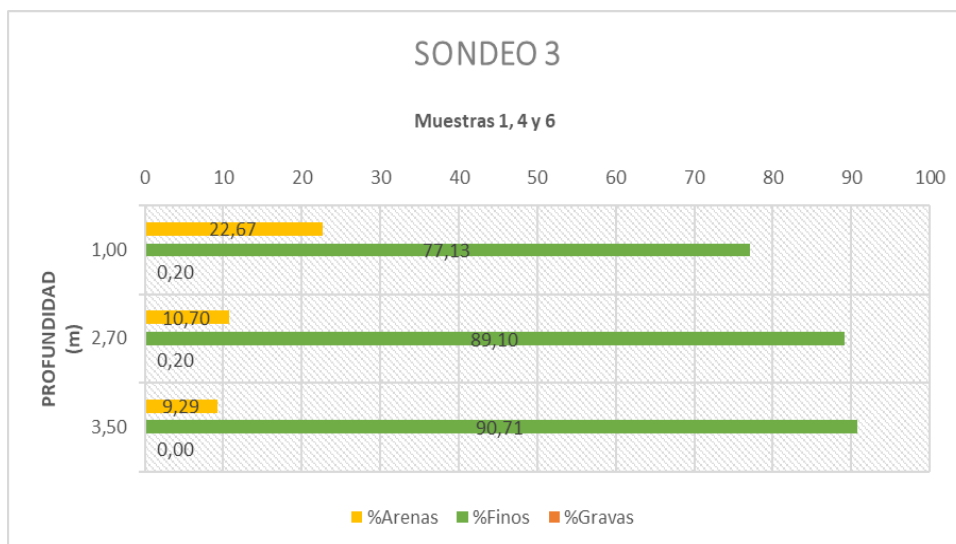


Figura 47. Perfil Granulométrico Sondeo 3

Fuente: Autores

7.4.2.4 Sondeo 4

En este último sondeo, se analiza la muestra extraída a una profundidad entre 0,80 m y 1,50 m, que hace parte del estrato arcilla de alta plasticidad (CH), donde se establece que el material predominante son finos, el cuál determina el comportamiento del estrato, ya que tiene la siguiente franja granulométrica: Arenas 0,2%, Finos 99,8% y Gravas 0,0%; con los resultados anteriores, se puede determinar que es suelo fino.

Continuando el análisis a una profundidad entre 2,50 m y 3,00 m, que hace parte del estrato arena con presencia de limos de alta plasticidad (MH), donde se establece que el material predominante son las arenas, el cuál determina el comportamiento del estrato, ya que tiene la siguiente franja granulométrica: Arenas 95,9%, Finos 4,0% y Gravas 0,00%; con los resultados anteriores, se puede determinar que es suelo arenoso con contenido de finos.

Por último el análisis a una profundidad entre 2,50 m y 3,00 m, que hace parte del estrato arcilla de alta plasticidad (CH), donde se establece que el material predominante son finos, el cuál determina el comportamiento del estrato, ya que tiene la siguiente franja granulométrica: Arenas 0,10%, Finos 99,9% y Gravas 0,0%; por ende, se puede determinar que el sondeo 4 es un material con sola presencia de finos los cuales tienden a expandirse cuando absorben agua y a contraerse cuando estos se secan, lo que podría causar problemas de asentamientos y agrietamientos en estructuras edificadas sobre este tipo de suelo.

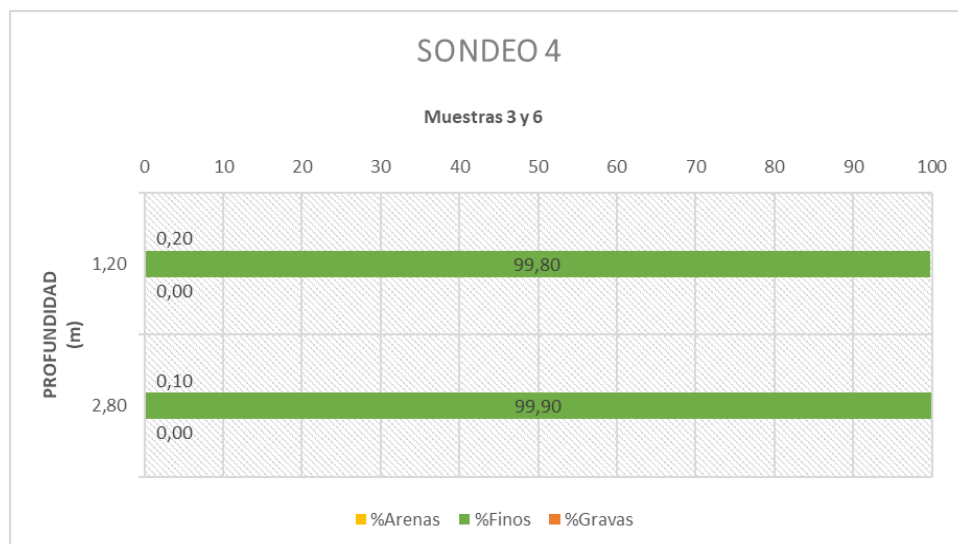


Figura 48. Perfil Granulométrico Sondeo 4

Fuente: Autores

7.4.3 Variación de la Humedad y Límites de Atterberg

En el sondeo uno, se tiene el nivel freático cerca a la superficie a una profundidad a 0,70 m y un material de arena con arcilla de alta y baja plasticidad, analizando desde la superficie hasta 0,70 m, se puede describir que el material posee poca permeabilidad, por lo tanto la humedad natural no ha sobrepasado la humedad de equilibrio ni el límite plástico; por otra parte se observa que el material se encuentra en estado semisólido, lo que nos indica que el suelo está en una condición favorable actualmente y que ante la aplicación de cargas se presentarán pocas deformaciones.

A pesar que cerca a la superficie se presenta una baja humedad, a medida que se profundiza, la humedad natural aumenta, en el caso desde 0,70 m a 1,80 m, donde se observa un aumento considerable en su humedad natural siendo un 65%, sobrepasando el límite líquido y plástico, encontrándose en un comportamiento de flujo lo que produce una deformación en su capa por expansión, generando desplazamiento de las partículas hacia la parte baja del terreno, lo que produce que las estructuras se deformen y se presenten agrietamientos, ya que su nivel de cimentación se encuentra aproximadamente a 0,70 m y al aplicar la carga vertical en el bulbo de esfuerzos, el cuál es el lugar geométrico del espacio en el suelo donde se soporta su cimentación haciendo que el suelo aumente su esfuerzo y las partes de masa del suelo que serán afectadas tanto en profundidad como en extensión lateral.

Sin embargo, a una profundidad entre 2,00 a 3,20 m, se observa que la humedad natural se encuentra por encima del límite plástico, pero por debajo del límite líquido lo que indica que el material se encuentra en estado plástico, lo que indica que si bien sus deformaciones disminuyen se siguen presentando deformaciones y desplazamientos.

Después de esta profundidad su humedad vuelve a aumentar encontrándose en condición de flujo. En conclusión el estrato es variable, ya que dependiendo la profundidad cambia su comportamiento entre estado semisólido y de flujo.

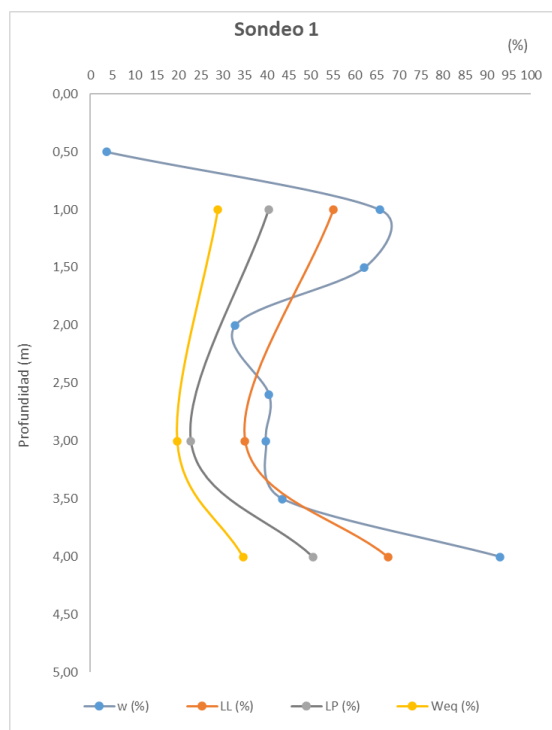


Figura 49. Variación de Humedad y Límites Sondeo 1

Fuente: Autores

Para los suelos encontrados en el sondeo dos, en el primer estrato que corresponde a una arcilla de baja plasticidad (CL), se tiene desde la superficie hasta una profundidad de 1,00 m una humedad natural de 24% aproximadamente, encontrándose levemente por encima del límite plástico y por debajo del límite líquido estando en condición plástica, el cuál al recibir una carga está propenso a presentar una deformación considerable. Continuando a una profundidad entre 1,00 m y 2,40 m se tiene una humedad natural de 19% ubicándose bajo la humedad de equilibrio, presentándose en estado semisólido siendo una condición favorable, pues ante la aplicación de cargas, las deformaciones que se podrían generar no van a ser importantes, además que en este nivel pueden absorber mayores cantidades de agua y no se verá afectada respecto a su forma y volumen.

Continuando con el estrato de arcilla de alta plasticidad (CH) donde su humedad natural es mayor al límite plástico, pero menor que el límite líquido, estando en condición plástica, el cuál al recibir una carga estaría propenso a darse una deformación considerable por el resto del sondeo hasta una profundidad de 3,50 m.

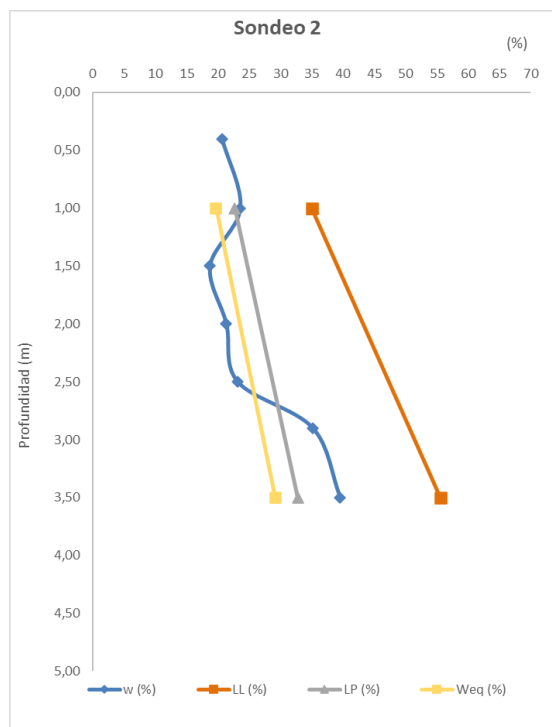


Figura 50. Variación de Humedad y Límites Sondeo 2

Fuente: Autores

En el sondeo tres, se tiene el nivel freático a una profundidad de 1,00 m y un material de arcilla de baja plasticidad (CL), en condiciones actuales todo el material se encuentra en una consistencia que se consideraría como ideal, ya que todo el material está en el rango entre el límite de contracción y límite plástico, por lo cual su humedad es baja debido a la permeabilidad del material, además estas muestras pueden estar compactas y totalmente saturadas pero que no almacenen mucha agua.

Sin embargo el problema de esta zona llega cuando se analiza con altos contenidos de humedad o en condiciones extremas, donde es necesario determinar la humedad de saturación, lo que indica el porcentaje de agua en su estructura. En este caso el material se podría saturar en el momento que se incremente su humedad y esto depende de las condiciones geológicas y climáticas, en condiciones de precipitación o en temporada de invierno, donde se presente un aumento de humedad y si sobrepasa los límites plástico y líquido, se tendrán deformaciones y desplazamientos de la capa, es el caso que ya se presentó en las viviendas afectadas las cuales muestran asentamientos y cambios en su estructura.

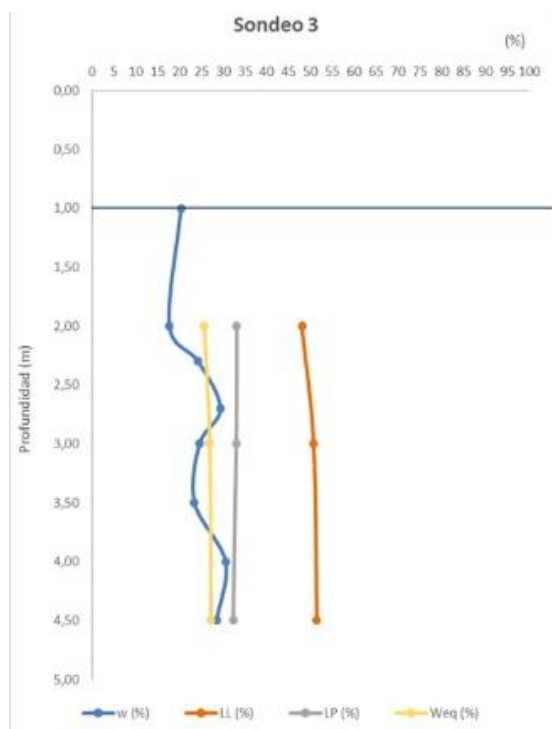


Figura 51. Variación de Humedad y Límites Sondeo 3

Fuente: Autores

Para los suelos registrados en el sondeo cuatro, se tiene un estrato de arcilla de alta plasticidad (CH), el cuál posee una humedad muy baja la cual está por debajo de la humedad de equilibrio y del límite plástico, lo que quiere decir que se encuentra en estado sólido por lo que el material tiene poco contenido de humedad, este se retrae y en el se forman un tipo de “hojuelas” siendo una condición negativa ya que se presentan fisuras. La pérdida de cohesión de este suelo, puede hacer que sea más susceptible a la erosión causada por el flujo del agua logrando que este pierda capacidad portante.

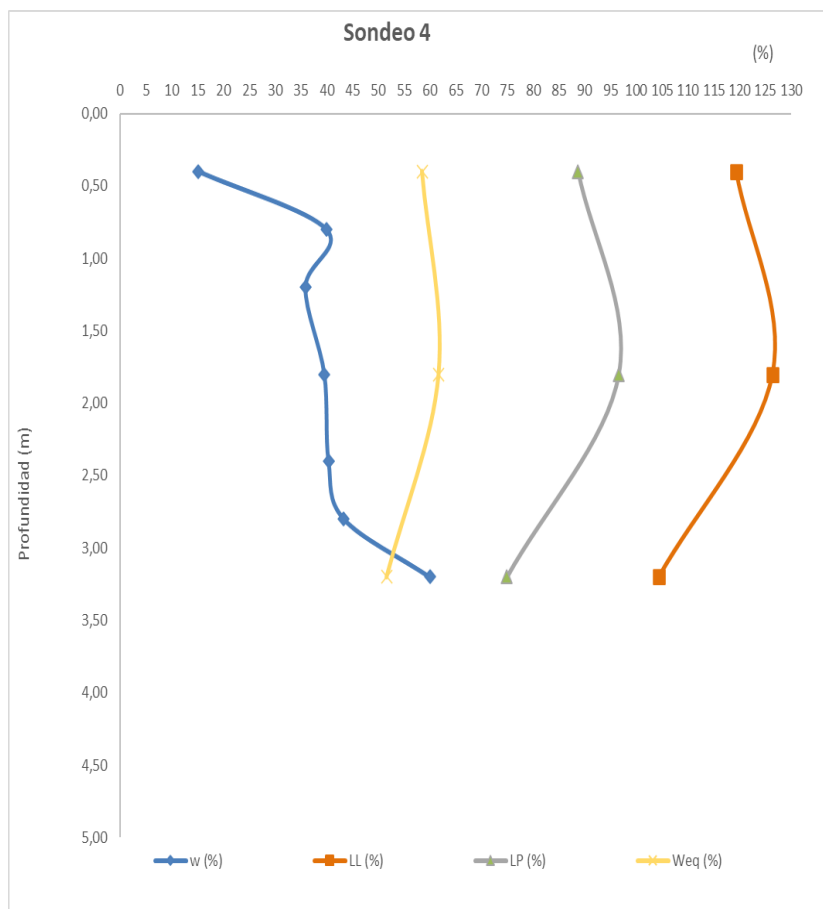


Figura 52. Variación de Humedad y Límites Sondeo 4

Fuente: Autores

Por último, se realizó la comparación de las gráficas del contenido de humedad natural en función de la profundidad.

En la figura 52, se puede establecer un patrón de saturación en las capas, se puede decir que, aproximadamente a 1,8 m, se encuentra el nivel freático, además de que en superficie cerca a los 0,50 m en algunas zonas, puntualmente donde se encuentran las viviendas se tiene saturación demasiado alta, debido a la infiltración de agua proveniente de las lluvias, lo que produce las afectaciones del material.

También se puede observar el cambio de comportamiento del sondeo 1 comparado con los otros sondeos, debido al cambio de humedades y materiales en ese estrato, siendo uno de los puntos de interés más afectados, encontrando una humedad natural sobre el 65 % a 1 metro de profundidad y el punto máximo encontrándose sobre los 4 metros con una humedad natural del 95 %, siendo esto muy negativo ya que esta por alcanzar la máxima saturación del material.

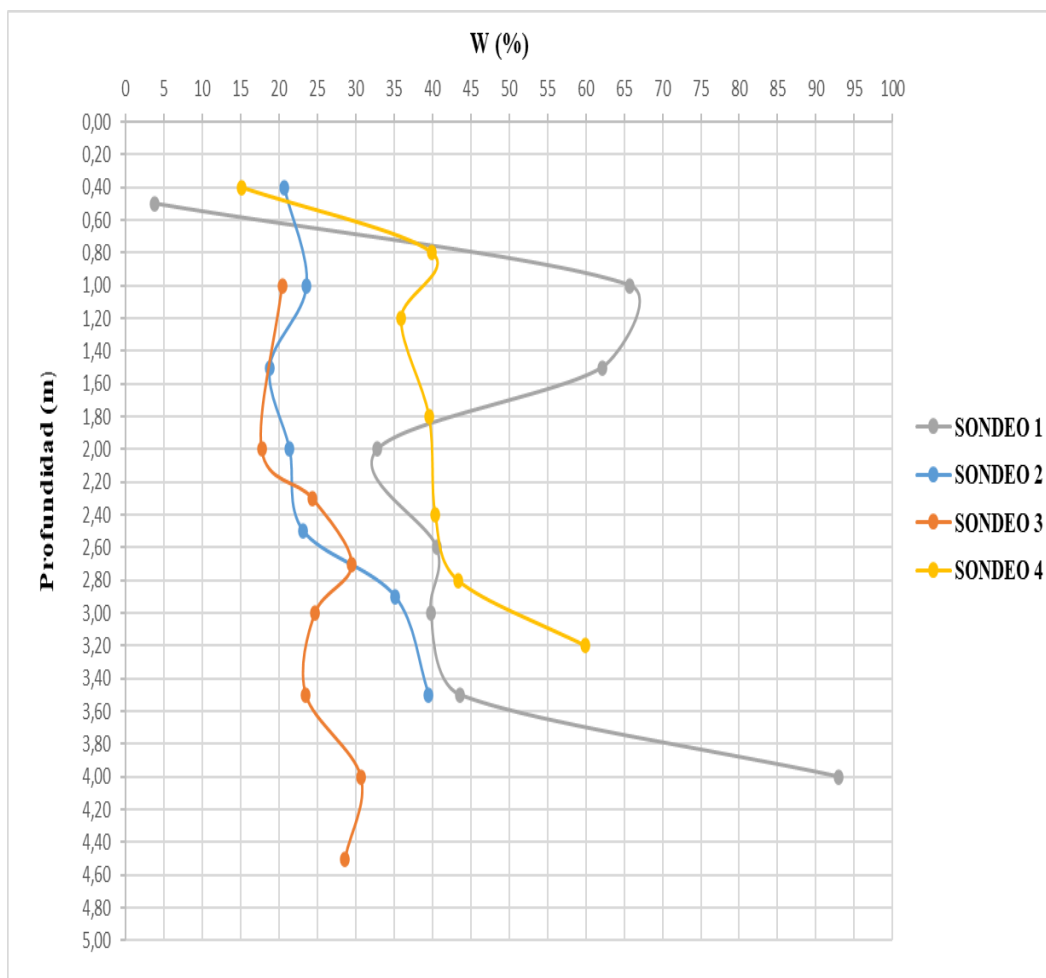


Figura 53. Variación de Humedad de los Cuatro Sondeos

Fuente: Autores

7.4.4 Condiciones de Humedad de Saturación

Para el sondeo uno, teniendo en cuenta que el material está constituido por arenas y también arcillas de alta y baja plasticidad, se realiza el análisis donde se presentan los estados del material según su contenido de humedad para este estrato. Se determina que el material se encuentra en estado semisólido, lo que nos indica que el suelo está en una condición favorable actualmente y que ante la aplicación de cargas se presentarán pocas deformaciones.

Al aumentar la profundidad desde 0,70 m a 1,80 m, se encuentra en comportamiento de flujo y como se observa en la gráfica (figura 53) la humedad natural es mayor que la humedad de saturación, la cual indica la cantidad de agua que soporta este tipo de suelo. Debido a su comportamiento, se produce una deformación en su capa por expansión,

generando desplazamiento de las partículas hacia la parte baja del terreno, lo que genera que las estructuras se deformen y presenten agrietamientos.

Luego, entre 2,00 a 3,50 m, se observa que la humedad natural se encuentra por debajo de la humedad de saturación, por lo cual a este nivel puede llegar a absorber mayor cantidad de agua a la actual y no se presentará cambio de forma como de volumen. Desde 3,50 m en adelante, la humedad natural nuevamente sobre pasa la humedad de saturación.

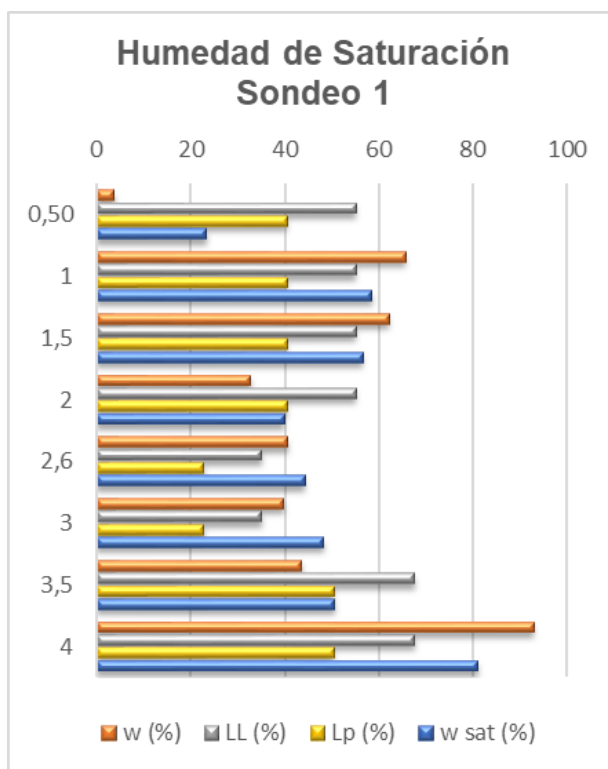


Figura 54. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 1

Fuente: Autores

Para el sondeo dos, para el análisis ante la condición de saturación corresponde a una arcilla de baja y alta plasticidad (CL) (CH), como se observa en la siguiente grafica (figura 54), este material presenta un comportamiento de plástico a semisólido, lo cual resulta favorable, ya que al aplicar cargas las deformaciones que se puedan presentar no serán de gran importancia, además de esto, el nivel puede llegar a absorber mayores cantidades de agua a las actuales como se observa en la gráfica, sin presentae una afectación importante ante cambios tanto de forma como de volumen.

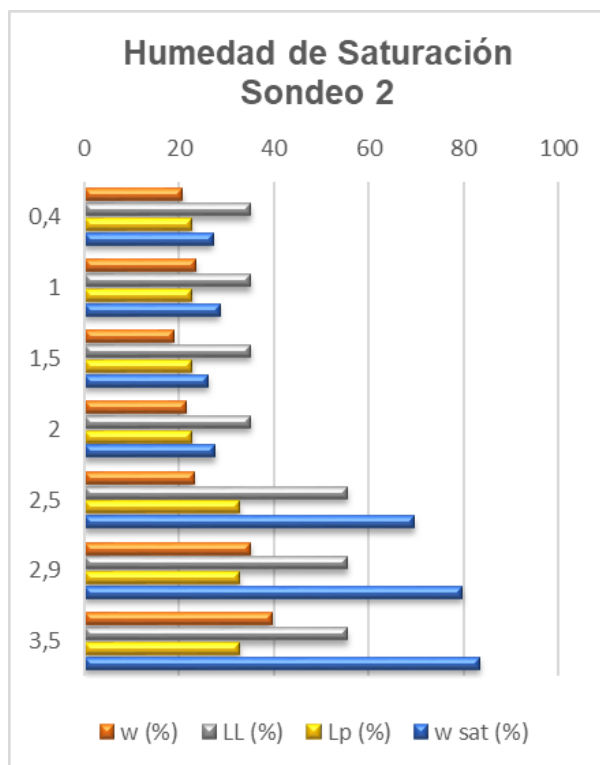


Figura 55. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 2

Fuente: Autores

Para el sondeo tres, se tiene un estrato de arcilla de baja plasticidad (CL) encontrándose en comportamiento semisólido el cual es favorable en este momento, ya que este suelo presenta grandes afectaciones a las estructuras presentes, pero en el momento del estudio al analizar la condición de saturación se puede observar que este nivel puede llegar a absorber mayores cantidades de agua a las actuales hasta una profundidad de 2,30 m, ya que al aumentar su profundidad después de este punto, la humedad natural se encuentra entre un 80% y 95% de la saturación máxima. Cabe resaltar que en condiciones de precipitación o una temporada invernal, este suelo podría ser el más afectado debido a las condiciones presentadas anteriormente cuando la humedad natural, sobrepasó la humedad de saturación, lo cual produjo asentamientos y agrietamientos a las viviendas y estructuras presentes.

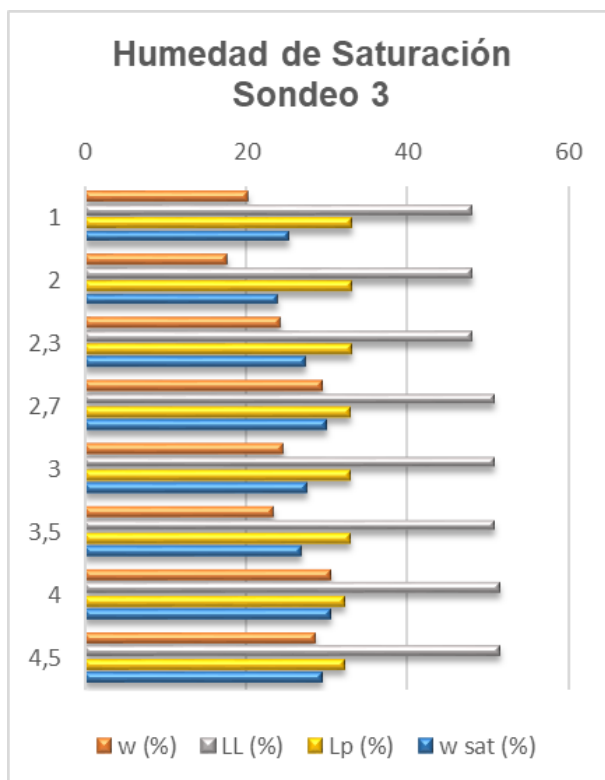


Figura 56. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 3

Fuente: Autores

Para el sondeo cuatro, se tiene un estrato de arcilla de alta plasticidad (CH), el cuál posee una humedad muy baja pero al realizar el análisis de saturación, se puede observar que la humedad natural ya se encuentra muy cerca del máximo de la humedad de saturación, por lo cual este suelo no podrá tener un porcentaje mayor de humedad ya que podría presentar una afectación a su composición que se encuentra en estado sólido que sería su condición ideal por lo que un aumento o disminución de su humedad generaría cambios en su composición.

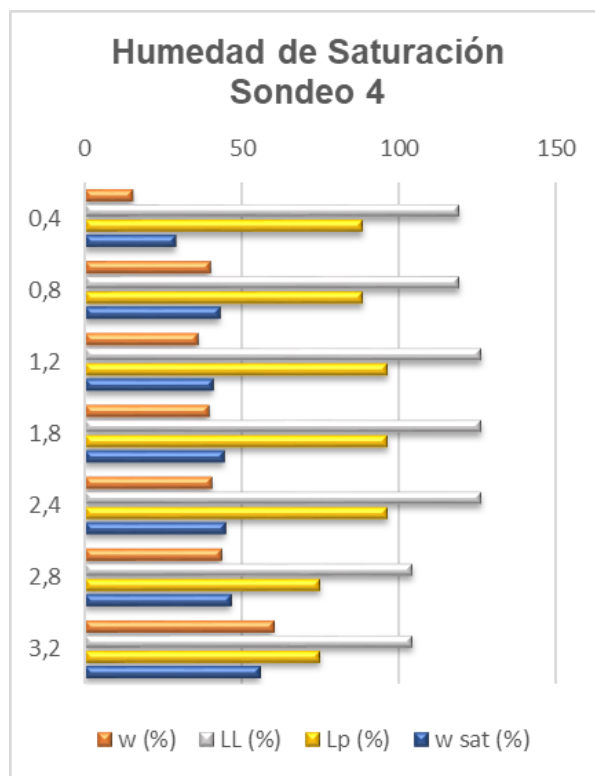


Figura 57. Condiciones del Material ante la Saturación Sondeo 4

Fuente: Autores

7.4.5 Cohesión Mediante Ensayo de Corte Directo

De acuerdo al ensayo de corte directo realizado en condición Consolidado No Drenado (CU) sobre una muestra inalterada en condición natural son parámetros a tener en cuenta para los análisis de capacidad portante en suelos finos a corto y largo plazo durante la construcción.

El ensayo varia con respecto al ensayo del SPT, ya que tenemos que el valor del SPT mantiene una condición no drenada, siendo un ensayo rapido donde no se presenta la salida del agua. En cambio, cuando se realiza un ensayo de corte directo, empiezan a trabajar todas las particulas que se tienen y es en condición drenada, donde la cohesion y el angulo de fricción empiezan a trabajar los dos y para equiparar la resistencia el angulo de fricción disminuye, por ende, se obtuvieron los siguientes resultados.

Sondeo	Profundidad (m)	Peso unitario (t/m ³)	Cohesión no drenada (Cu) (Kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Material
1	2	1,76	0,05	7	Arena con arcilla de alta plasticidad (SC)

Tabla 11. Resistencia al Corte Directo Material Natural

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla 11, se tiene que los materiales presentes en el sitio para la cohesión consolidada no drenada de 0,05 Kg/c m² y un ángulo de fricción interna de 7°, lo cual indica que debido a la presencia de agua en el subsuelo, y la generación de un efecto expansivos, las partículas de arcilla tienen a separarse, provocando con esto un aumento en la relación de vacíos del material, y por consiguiente una reducción de la resistencia de forma significativa, por lo cual a nivel mecánico, se puede establecer que el subsuelo presente en el sitio, no garantiza unas buenas condiciones de estabilidad, ante la aplicación de cargas de baja magnitud, es mas, ante la construcción de una edificación en este sector, debe considerarse la implementación de un sistema de cimentación que sea capaz de distribuir las cargas en el mayor área posible, las cuales pueden llegar a ser zapatas aisladas, ya que, distribuyen la carga de la estructura sobre el área, lo que ayuda a reducir la presión sobre el suelo expansivo e infiere en los cambios de humedad del suelo ya que los minimiza. También se pueden implementar losas de cimentación flotante, apoyándolas sobre una capa de material granular como grava, que proporciona un espacio de expansión y contracción sin que la losa se afecte. Por último, una cimentación mediante pilotes, ya que pueden penetrar el suelo expansivo hasta alcanzar una capa más estable, de esta forma se evita que la cimentación este en contacto directo con el suelo problemático y así reduce la posibilidad de expansión y contracción, siendo este tipo de cimentación la mas costosa con base al tipo de estructuras predominante del sector.

7.4.6 Ángulo de Fricción

Como se mencionó anteriormente, el sitio de estudio se caracteriza por presentar materiales de composición fina, los cuales dependiendo de la profundidad presentan contenidos de material granular como arena, generando una variación en los comportamientos, por lo cual es importante conocer la densidad relativa para identificar la posibilidad de que se generen procesos de licuación que afecten estructuras cercanas.

En la tabla 12, se evidencia los resultados obtenidos en el ensayo de penetración estándar (SPT), se identifica que en el sondeo uno corresponde a un estrato de arena con arcilla presenta un ángulo de fricción interna de 25° a 4,30 m de profundidad. En el sondeo dos se tiene un estrato de arcilla (C) presenta un ángulo de fricción interna de

24° a 3,20 m de profundidad. En el sondeo tres se tiene un estrato de arcilla (C) presenta un ángulo de fricción interna de 24° a 4,55 m de profundidad y en el sondeo cuatro se tiene un estrato de arcilla (C) presenta un ángulo de fricción interna de 26° a 3,30 m de profundidad.

Sondeo	Profundidad (m)	γ [T/m ³]	ϕ	N	σ [T/m ²]	Densidad Relativa
1	4,30	1,62	25	4	5,27	3
2	3,20	1,95	24	2	6,24	2
3	4,55	1,95	24	2	6,32	2
4	3,30	1,18	26	5	3,89	4

Tabla 12. Variación de Densidad Relativa

Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos en la tabla 12, después de hacer una serie de ensayos de laboratorio, el ángulo de fricción interna es mayor en las arcillas debido a que las arcillas se componen de partículas más pequeñas y laminadas, lo que indica se compactan unas sobre otras, dificultando el movimiento de las partículas y aumentando la resistencia al corte.

7.5 COMPORTAMIENTOS ESPERADOS

Según la caracterización geotécnica y los análisis realizados anteriormente, se tiene que el sitio de estudio está conformado por niveles de material fino de arcilla de baja y alta plasticidad (CL) (CH), con contenidos variables de arena según su profundidad. Se evaluará condiciones desfavorables, donde se contempla la saturación total y la presencia de un evento sísmico, ya que estos son los fenómenos que tienen más probabilidad de presentarse.

A continuación se hará una evaluación de los fenómenos que se podrían presentar en la zona de estudio.

7.5.1 Potencial de Expansión de Suelos Finos

Potencial de expansión	Expansión Consolidómetro (%)	LL (%)	LC (%)	IP (%)	Partículas menores 1 μ (%)	Expansión libre en probeta (%)
Muy alto	>30	>63	<10	>32	>37	>100
Alto	20-30	50-63	6-12	23-45	18-37	>100
Medio	10-20	39-50	8-18	12-34	12-37	50-100
Bajo	<10	<39	>13	<20	<17	<50

Tabla 13. H9.1-1 Clasificación de Suelos Expansivos

Fuente: NSR-10

Los estratos presentes en la zona, poseen arcillas de baja y alta plasticidad con contenidos de arenas; de acuerdo a esto por sus características mineralógicas se pueden presentar procesos de expansión al momento de entrar en contacto con el agua. Para esta clasificación es necesario revisar el título H, capítulo H9.1-1 de la NSR-10 con el fin de conocer la susceptibilidad de estos materiales.

Sondeo	Muestra	Prof. (m)	LL %	LP %	Potencial	IP %	Valoración Final
1	1	1	55,19	40,47	alto	14,72	alto
	6	3	35,09	22,82	bajo	12,27	bajo
	8	4	67,59	50,52	muy alto	17,07	muy alto
2	2	1	35	22,69	bajo	12,31	bajo
	7	3,5	55,61	32,79	alto	22,82	alto
3	2	2	48,06	33,12	medio	14,94	medio
	5	3	50,75	33,02	alto	17,73	alto
	8	4,5	51,49	32,39	alto	19,10	alto
4	1	0,4	119,34	88,7	muy alto	30,64	muy alto
	4	1,8	126,36	96,61	muy alto	29,75	muy alto
	7	3,2	104,33	74,89	muy alto	29,44	muy alto

Tabla 14. Potencial de Expansión de los Suelos

Fuente: Autores

En la tabla 14, se detalla la valoración ante el fenómeno de expansión que presentan los materiales que corresponden a arcillas con contenidos de arena de baja y alta plasticidad, el potencial de expansión que presentan estos materiales según el sondeo y su

profundidad, comprendidos entre bajo y muy alto, lo que indica que ante el aumento de la humedad del terreno, se presentarán deformaciones. Para evitar que estos materiales presenten cambios repentinos en su contenido de humedad se adicionará Cal y Cemento para evaluar su reacción y comportamiento posterior, haciendo referencia al título H.9.1.6 de la NSR-10 donde se menciona estos métodos para evitar expansión y reducir cambios considerables de humedad.

En la tabla 15 se presentan las presiones de expansión de cada uno de los sondeos a diferentes profundidades; el esfuerzo geoestático vertical, la presión actual existente y la presión con sobrecarga evaluando la distribución de esfuerzos.

S.	M.	Prof. (m)	LI %	Lp %	Potencial	IP%	P. expansión (Kg/cm ²)	Peso unitario (t/m ³)	E SF. VERT. T/m ²	P. actual (Kg/cm ²)	P. con sobrecarga (Kg/cm ²)
1	1	1	55,19	40,47	alto	14,72	0,78	1,75	1,75	0,18	0,48
	6	3	35,09	22,82	bajo	12,27	0,65	1,75	5,25	0,53	0,83
	8	4	67,59	50,52	muy alto	17,07	0,90	1,75	7,00	0,70	1,00
2	2	1	35	22,69	bajo	12,31	0,65	1,87	1,39	0,14	0,44
	7	3,5	55,61	32,79	alto	22,82	1,20	1,77	5,82	0,58	0,88
3	2	2	48,06	33,12	medio	14,94	0,79	1,77	3,16	0,32	0,62
	5	3	50,75	33,02	alto	17,73	0,93	1,77	4,93	0,49	0,79
	8	4,5	51,49	32,39	alto	19,10	1,01	1,70	7,48	0,75	1,05
4	1	0,4	119,3	88,7	muy alto	30,64	1,61	1,70	0,51	0,05	0,35
	4	1,8	126,4	96,61	muy alto	29,75	1,57	1,70	2,89	0,29	0,59
	7	3,2	104,3	74,89	muy alto	29,44	1,55	1,70	5,27	0,53	0,83

Tabla 15. Condiciones de Presión de Expansión de los Suelos

Fuente: Autores

A continuación, se presentan los diagramas de transmisión de sobre carga, asumiendo un medio elástico; en los diagramas se grafican los esfuerzos en función de la profundidad Vs la presión de expansión, la presión actual y la presión con sobrecarga; en los sondeos uno, dos y tres las presiones de expansión no son relativamente altas y se podrían controlar con las presiones de sobrecarga. Por el contrario en el sondeo cuatro se tiene una presión de expansión mayor, la cual es la causante de generar afectaciones a las estructuras presentes.

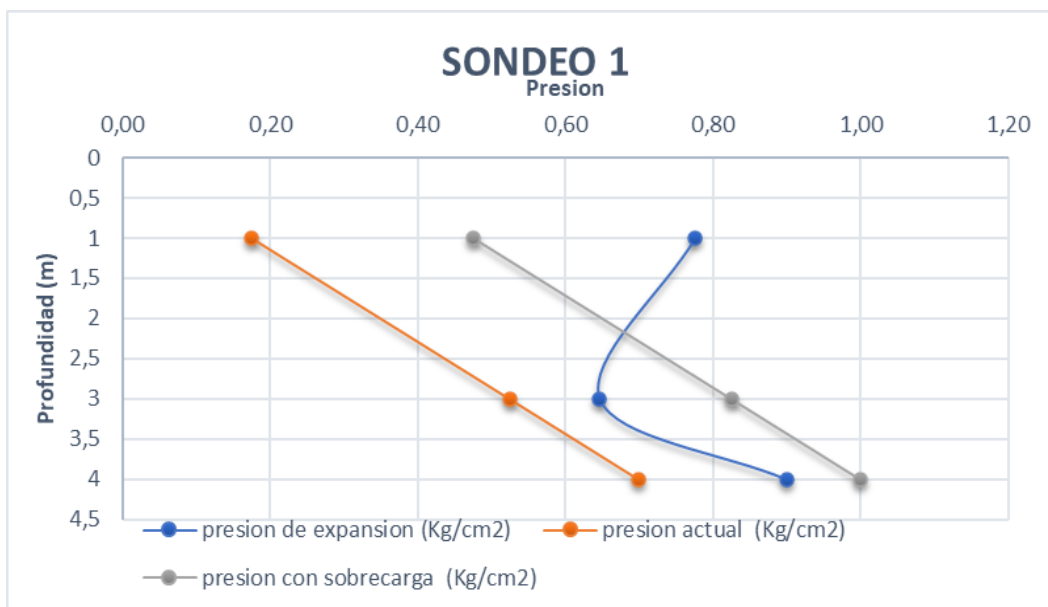


Figura 58. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 1

Fuente: Autores

En la figura 57, se observa el comportamiento que tiene el material respecto a la presión de expansión, presión de sobrecarga y la presión actual en el sondeo 1.

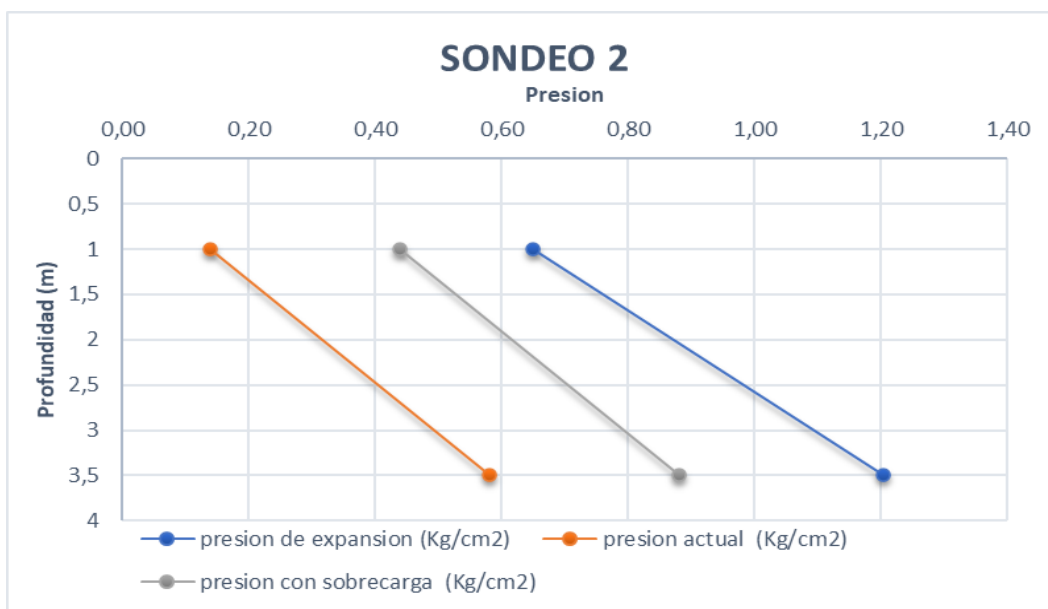


Figura 59. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 2

Fuente: Autores

En la figura 58, se observa el comportamiento que tiene el material respecto a la presión de expansión, presión de sobrecarga y la presión actual en el sondeo 2.

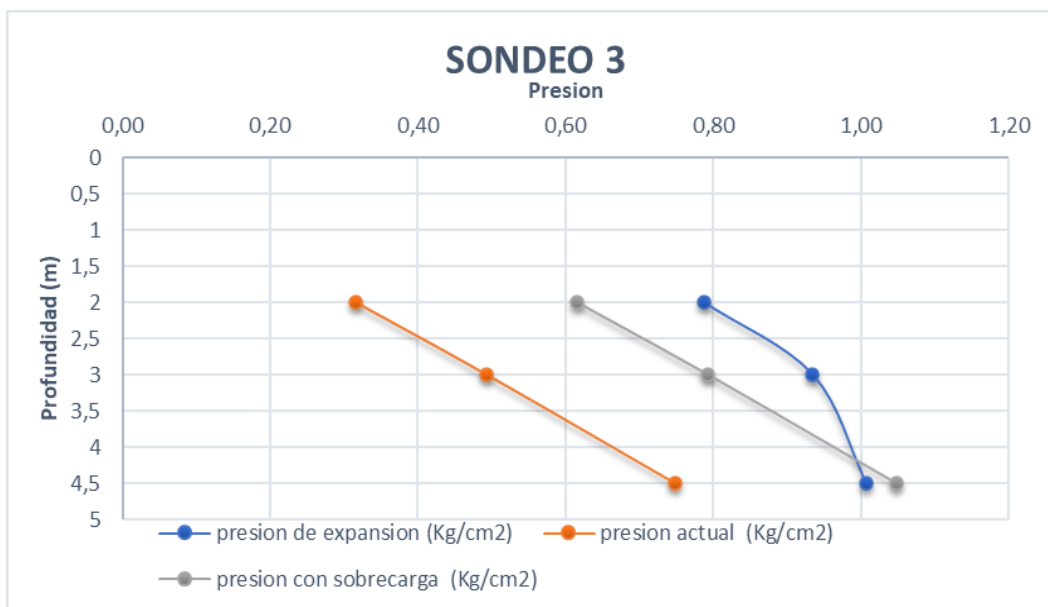


Figura 60. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 3

Fuente: Autores

En la figura 59, se observa el comportamiento que tiene el material respecto a la presión de expansión, presión de sobrecarga y la presión actual en el sondeo 3.

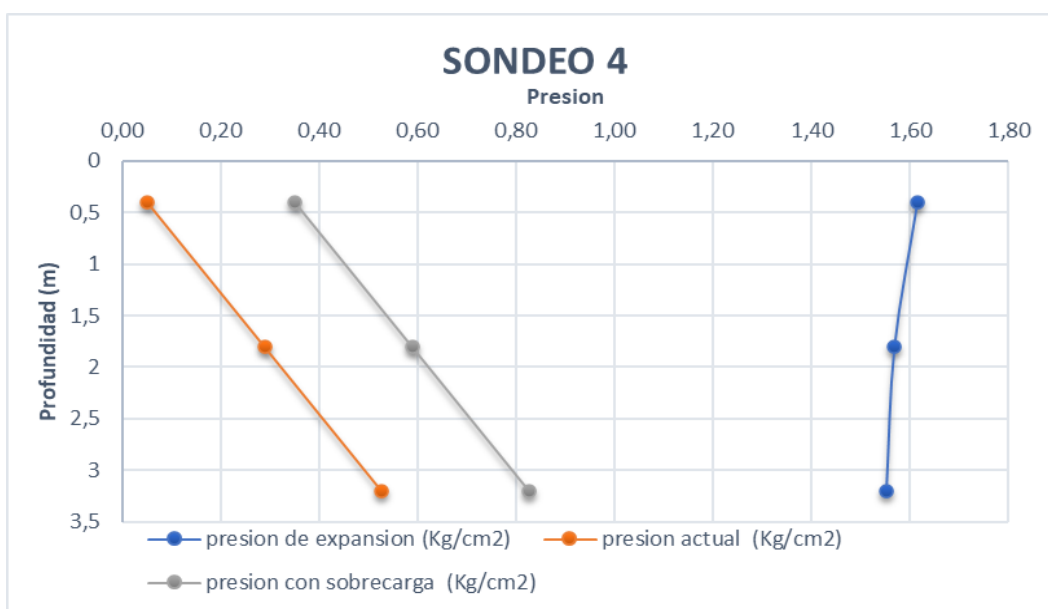


Figura 61. Variación de Presión de Expansión con Esfuerzos Sondeo 4

Fuente: Autores

En la figura 60 se observa el comportamiento que tiene el material respecto a la presión de expansión, presión de sobrecarga y la presión actual en el sondeo 4.

Para comprender el análisis de las variaciones de presión de expansión con esfuerzos, en la gráfica, la línea gris indica el esfuerzo geostático que podríamos tener en el momento de la construcción de las viviendas por una sobrecarga, y el sector al tener una condición de saturación lo que va a hacer es que la presión del suelo aumente hasta donde se encuentra la línea azul, por lo que se puede comprender que si la línea azul está por debajo de la línea gris, estaría en un comportamiento perfecto, ya que estaría dentro del rango permitido para generar una condición estable y en el caso de que la línea azul sobrepase este rango, indicaría que se va a generar una expansión.

7.5.2 Potencial de Expansión y Consolidación del Material Natural

Con el fin de identificar las condiciones expansivas se realizó el ensayo de expansión libre teniendo en cuenta un proceso, como primera etapa se llevó la muestra al esfuerzo normal, para que de esta forma simule las condiciones de carga a la que se encuentra sometida, luego de esto se añade el agua, generando la saturación del material, lo cual genera un cambio volumétrico de grandes dimensiones si el suelo corresponde a un material altamente expansivo o por el contrario la deformación que se genera con la saturación sigue siendo de contracción o se tiene una condición baja de expansión.

Por medio de la prueba de expansión del material, se observa que se encuentra en una condición media alta por ende, se analiza la proporción que puede llegar a cambiar volumétricamente el suelo y si las deformaciones pueden llegar a ocasionar afectaciones a las estructuras de los materiales que sirven como material de fundación a las viviendas y demás edificaciones presentes o ver si por el contrario los daños estructurales se presentan por falta de capacidad de carga y asentamientos diferenciales de los elementos de cimentación.

En la figura 61, se presenta la condición de expansión y consolidación de la muestra natural, donde la línea roja representa la magnitud de expansión que posee el material ante la presencia de agua en su interior, lo cual genera una variación en su relación de vacíos de 3%, lo que indica que el material presenta un potencial de expansión alto.

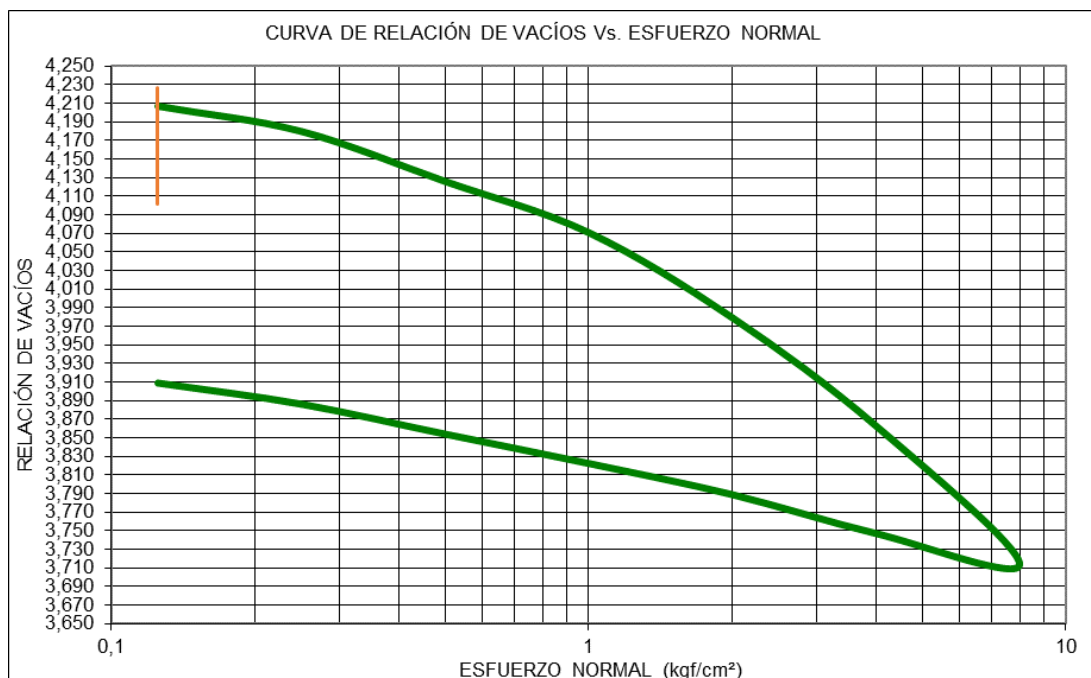


Figura 62. Consolidación y Expansión en Condición Natural

Fuente: Autores

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	3,66

Tabla 16. Condición de Expansión del Material Natural

Fuente: Autores

En la tabla 16, se muestra la magnitud de expansión que se puede presentar en un estrato de 2,40 m, en el cual el cambio volumétrico es abrupto, pues tiene posibilidad de que el material se expanda alrededor de 3,66 cm, por ende, se presentarían agrietamientos en la estructura.

Teniendo en cuenta estas condiciones de expansión, se tiene un coeficiente de compresión (C_c) de 0,419 y un coeficiente de re-compresión (C_r) de 0,082, por lo que se puede establecer que la compresibilidad del material es elevada y al aplicar cargas se generaran cambios volumétricos significativos, que pueden afectar edificaciones y demás estructuras presentes.

7.6 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS Y SUELOS FINOS

Con el fin de establecer el método de estabilización para mejorar el nivel de expansión del suelo, se realiza la clasificación de las arcillas a partir de los Límites de Atterberg, identificando así, que tan susceptibles pueden llegar a ser ante la presencia de un agente externo de tipo químico y cuál puede ser la influencia de este en su comportamiento físico – mecánico.

En la figura 62, se presenta la clasificación general de los suelos finos presentes en el sitio de estudio, los cuales presentan variación, pues se tiene presencia de suelos con

altas resistencias, correspondiente a materiales caoliniticos, los cuales tienen la condición de expansión baja, pero también se encuentran materiales como illitas, en los cuales, se presenta un grado de expansión medio, por lo que estos son los que se encuentran generando deformaciones en la superficie y bajo los elementos de la cimentación presente en las viviendas de las zonas aledañas.

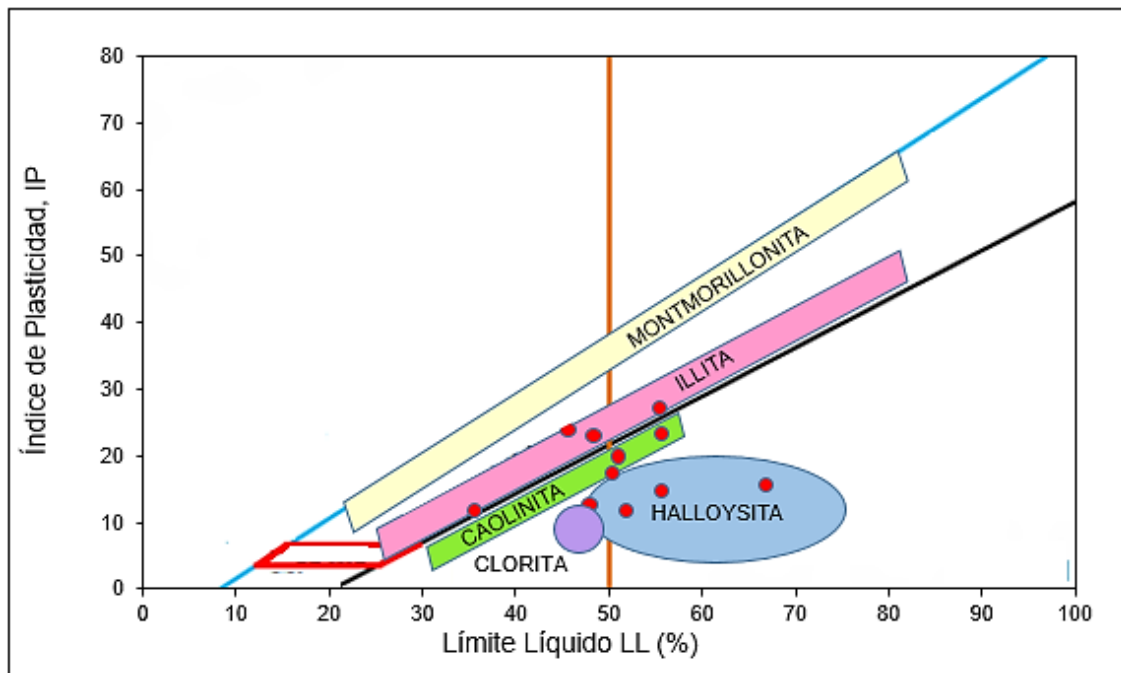


Figura 63. Clasificación General del Tipo de Arcilla Según Límites de Consistencia

Fuente: Autores

Además de las arcillas identificadas como caolinitas e illitas, también se tiene la presencia de materiales como la halloysita, que presentan condiciones variadas porque pueden estar compuestas de dickita, caolinita, montmorillonita y otros minerales de la arcilla, los cuales pueden generar condiciones expansivas. En la tabla 17, se evidencia la clasificación general del tipo de arcilla según los límites de consistencia.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Clasificación
1	2	1	Halloysita
1	6	3	Illita
1	8	4	Halloysita
2	2	1	Illita
2	7	3,5	Illita
3	2	2	Halloysita
3	5	3	Caolinita
3	8	4,5	Caolinita
4	1	0,5	Halloysita
4	4	1,8	Halloysita
4	7	3,2	Illita

Tabla 17. Clasificación General del Tipo de Arcilla

Fuente: Autores

Posteriormente, se realiza una clasificación más detallada de los materiales como se muestra en la figura 63, con el fin de identificar que otras características físicas de importancia se puede llegar a presentar, en parte corresponden a arcillas caolinitas, arcillas glaciares y de descalcificación, por lo que, al contacto con altas cantidades de agua, sufren cambios en su estructura.

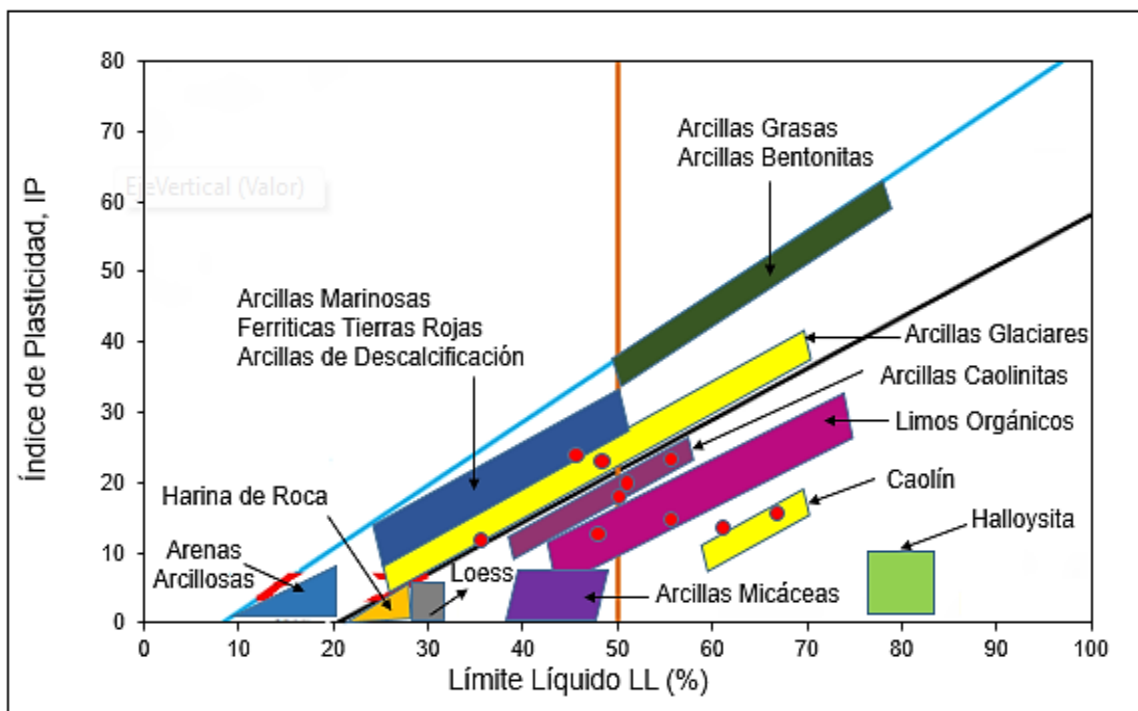


Figura 64. Clasificación Detallada del Tipo de Arcilla Según Límites de Consistencia

Fuente: Autores

Con esta clasificación más detallada se puede identificar que los materiales que se clasifican como caolinitas o suelos altamente resistentes y poco deformables se encuentran localizados en las partes bajas del subsuelo y los materiales como las illitas se encuentran en los primeros metros del subsuelo y en la zona media, por lo que la condición expansiva que posee el sector, no se presenta a grandes profundidades, sino que se presenta desde la superficie hasta los 3,5 metros.

7.7 SELECCIÓN DE PORCENTAJES DE LOS ADITIVOS

A partir de la información consultada previamente, (Camacho, J, Reyes Ortiz, OJ, Mayorga Antolínez, C., & Méndez G. *Evaluación de Aditivos Usados en el Tratamiento de Arcillas Expansivas.*) Evidencian, que estadísticamente si se incluye un porcentaje mayor al 20 % de cal, tiene un comportamiento casi horizontal, lo que quiere decir que la variación en la deformación del material no va a ser significativo y por el contrario va a afectar la resistencia que se tiene, por ende, se utilizan porcentajes de cal menores al 20 %, donde se evidencia realmente su aportación estabilizando el material, es por esto que se aumenta el porcentaje progresivamente cada 5% hasta llegar al 15% de Cal.

Por el lado del cemento, un porcentaje entre el 20 % y 35% no va a ser relevante, ya que tiene un comportamiento lineal y casi no va a ser representativo su cambio. Por ende, se utiliza un porcentaje menor al 20%, disminuyendo la cantidad de cemento y aportando

más a la estabilización del material, donde la proporción en el cambio volumétrico va a ser menor por debajo del 20% de cemento, donde se ha comprado que disminuye la deformación del material.

Basándose en estos estudios experimentales, las cenizas volantes tienen componentes similares al cemento, es por esto que se emplea en este trabajo de grado este aditivo, ya que tiene mejores características ante suelos que presentan estas problemáticas.

Finalmente, después de hacer un análisis se escogen tres (3) porcentajes de hidróxido de Cal y Cemento Tipo I, al 5%, 10% y 15% para cada uno de los aditivos, los cuales se van a aplicar a muestras para evaluar el comportamiento en suelos expansivos.

9. MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DEL SUELO

Debido a la condición de expansión y contracción del material, se plantea un sistema de estabilización, para controlar los cambios de volumen que se puedan llegar a presentar en el sitio por flujos de agua subsuperficiales que aumenten el contenido de agua del suelo, y ocasionen algunas deformaciones a los elementos de cimentación.

Debido a la condición de consolidación de los materiales presentes en el sector, la estabilización del suelo se lleva a cabo con las muestras inalteradas en los puntos de mayor afectación, a las cuales se les realiza una adición de dos agentes químicos, como lo son el Hidróxido de Calcio (Cal), y Cemento gris tipo 1, con porcentajes del 5 %, el 10% y el 15% en volumen; estos agentes estabilizadores, se adicionan por separado, para establecer cuál de ellos genera una mejor combinación y genera un efecto químico favorable en el suelo.

Para simular las condiciones de estabilización del terreno, la adición de los agentes estabilizantes, se realiza en las probetas de la misma forma que se requiere llevar a cabo en el sitio de estudio a escala real, la cual corresponden a inyección y pilotes de cal o cemento, con los cuales se genera una disgregación del material inyectado en los momentos en que se presenten flujos subsuperficiales, y se logre un confinamiento del suelo, debido a la presencia de los pilotes.

Una vez realizadas las probetas con la adición del cemento en algunas, y el Hidróxido de Calcio en otras, se realiza el ensayo de expansión, estableciendo cual es el grado de hinchamiento, ante las condiciones más desfavorables que consideran la saturación total, e inmersión del suelo.

8.1 ANÁLISIS CON HIDROXIDO DE CALCIO (CAL)

Para establecer cuál es el comportamiento físico del material ante la adición de Cal, se realiza el análisis de expansión, mediante diferentes contenidos de 5%, 10% y 15% en la muestra adicionándolos en forma homogénea, para simular la presencia de un pilote del material, dentro del subsuelo.

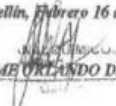
ANALQUÍMICOS LABORATORIO QUÍMICO ANALQUÍMICOS LTDA. STP 990.000.400 - 1	
RESULTADO DE ANÁLISIS	
Informe No. 36.642	FRE-03
Muestra de:	Hidróxido Calcio.
Interesado:	PRODUCTOS MINERALES CALCÁREOS
	PROMICAL LTDA.
	Sr. Diego Londoño.
Procedencia:	Itagüí-Antioquia.
Fecha de Recibo:	10-02-16
Referencia Muestra:	Resical
Registro Laboratorio:	282
Resultados:	
Humedad:	17,73%
Pérdidas por Calcificación:	26,48%
Residuo Insoluble en Acido:	4,24%
Silicio-SiO ₂ :	3,37%
Hierro-Fe ₂ O ₃ :	0,29%
Aluminio-Al ₂ O ₃ :	0,40%
Calcio total-CaO:	46,17%
Magnesio Total-MgO:	8,30%
Hidróxido de Calcio	
Total-Ca (OH) ₂ :	60,94%
Hidróxido	
Magnesio-Mg (OH) ₂ :	12,01%
Cal Disponible-Ca (OH) ₂ :	45,20%
Dióxido Carbono-CO ₂ :	1,19%
Análisis según Técnicas de Absorción Atómica y normas referenciadas de ASTM C 25-72.	
NOTA: Los resultados corresponden a la muestra enviada por el interesado.	
Medellín, Febrero 16 de 2010.	
 JAIME ORLANDO DÍAZ J.	 CAMILO A. ÁLVAREZ R.
CALLE 49B No. 68 - 23 Barrio Sumneriana Tel: 230 54 67 - Fax: 260 04 90 E-mail: analquimicos@una.net.co - Medellín - Colombia	

Figura 65. Ficha Técnica Cal Empleada

Fuente: Analquimicos

Al haber seleccionado el tipo de cal, se realiza la adición a las probetas, la primera con un porcentaje en volumen del 5%, la segunda con un porcentaje en volumen del 10% y la tercera con un porcentaje en volumen del 15%. Para la primera probeta, se llevó a cabo la adición en la parte intermedia de la muestra por ambos lados, para que, al contacto con el agua, se de una disgregación en las partes periféricas, y generen reacciones químicas favorables. Como se muestra en la figura 63, a la probeta que posee un volumen de 30.9 cm³ se le adicionaron cuatro cilindros (dos por cada lado) de cal de 0.8 cm de diámetro y 0.5 cm de profundidad, para con esto, obtener un volumen de agente estabilizante de 1.00 cm³, con lo que se obtiene un porcentaje del 5% respecto al volumen total de la muestra.



Figura 66. Probeta 1 (5% de Cal)

Fuente: Autor

En la figura 64, se presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 5% de cal en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 4.496 a 4.683, con una diferencia de 0.187, siendo una relación de vacíos demasiado alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 4%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse una expansión de 5,10 cm, que sería de gran importancia generando afectaciones para la estructura.



Figura 67. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cal)

Fuente: Autor

En la tabla 17, se muestra la condición de la expansión del material, y la magnitud de esta, aunque también es importante aclarar que este valor corresponde a la expansión máxima que se puede llegar a presentar, aunque si se realiza una estabilización con este tipo de sustancias, y una dosificación similar, los problemas de cambios volumétricos en el suelo, van a ser altos, y no se tendrán buenas condiciones de estabilidad.

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	5,10

Tabla 18. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cal)

Fuente: Autores

Debido a que la adición con Cal en un porcentaje 5%, generó un efecto adverso gracias a la reacción química dada entre el suelo y el hidróxido de calcio, se demostró que su aumento en el cambio volumétrico fue de 1,44 cm. Luego se realiza el ensayo bajo la adición de un 10% de Cal, está incorporada de forma similar a la anterior, pero simulando una mayor cantidad de pilotes, para que no solo se genere una disgregación al contacto con el agua, sino que también se genere un efecto de consolidación y confinamiento al material, debido a la presencia de varios cilindros de distinto material al expansivo.

En la figura 65, se presenta la distribución de los cilindros de cal en la muestra, todos los cilindros presentan un diámetro de 0,8 cm y una altura de 0,5 cm, en total se ubicaron 8 cilindros (cuatro por cada lado) distribuidos simétricamente por ambos lados de la probeta, para con esto generar un volumen de hidróxido de calcio del 2,01 cm³, correspondientes al 10 % del volumen total.



Figura 68. Probeta 2 (10% de Cal)

Fuente: Autor

En la figura 66, se presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 10% de cal en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 3.496 a 4.651, con una diferencia de 0.155, siendo una relación de vacíos demasiado alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 5%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse aproximadamente una expansión de 3,45 cm, que sería de gran importancia generando afectaciones para la estructura.



Figura 69. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cal)

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede establecer que, si se elige por estabilizar el suelo con este tipo de sustancia, y con una dosificación mayor a la empleada en el ensayo, se va a conseguir un mejoramiento del terreno, teniendo en cuenta que respecto al ensayo realizado en condiciones naturales se tenga una expansión en el estrato aproximada de 3,66 cm, lo que indica que se obtuvo una disminución de 0,21 cm, cabe aclarar que en este punto y para este tipo de suelo aún se presenta una expansión importante, pues es de aproximadamente 3,45 cm siendo alta y puede generar afectaciones considerables a la estructura.

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	3,45

Tabla 19. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cal)

Fuente: Autores

En la figura 67, se presenta la distribución de los cilindros de cal en la muestra, todos los cilindros presentan un diámetro de 0,8 cm y una altura de 0,5 cm, en total se ubicaron 12 cilindros (seis por cada lado) distribuidos simétricamente por ambos lados de la probeta, para con esto generar un volumen de hidróxido de calcio del 3,01 cm³, correspondientes al 15% del volumen total.



Figura 70. Probeta 3 (15% de Cal)

Fuente: Autor

En la figura 68, se presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 15% de cal en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 3.501 a 3.594, con una diferencia de 0.093, siendo una relación de vacíos demasiado alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 3%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse una expansión de 1,65 cm, siendo un valor más bajo en relación a los demás pero que no deja de ser preocupante.

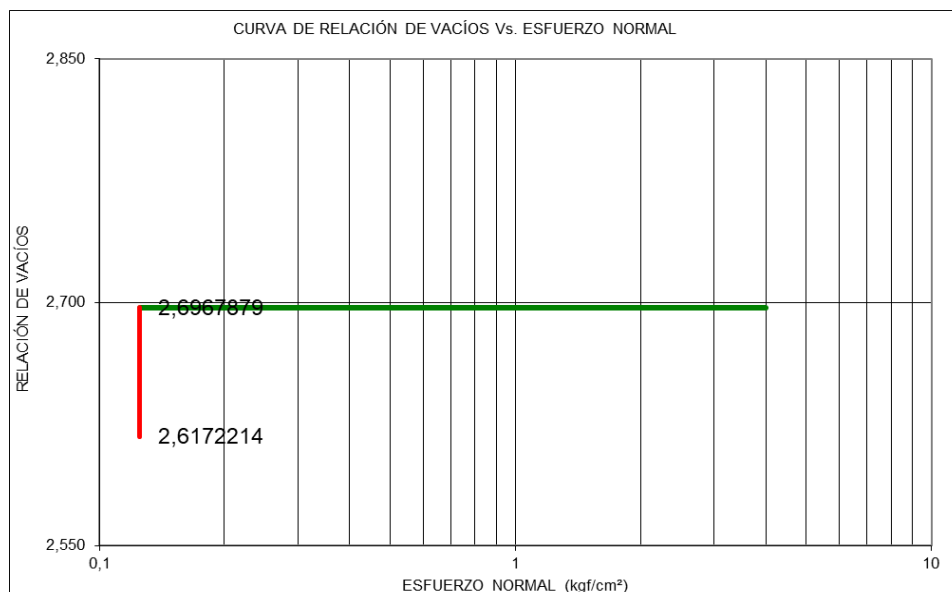


Figura 71. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cal)

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede establecer que, si se elige por estabilizar el suelo con este tipo de sustancia, y con una dosificación mayor a la empleada en el ensayo, se va a conseguir un mejoramiento óptimo del terreno, teniendo en cuenta que respecto al ensayo realizado en condiciones naturales se tenga una expansión en el estrato aproximada de 3,66 cm, lo que indica que se obtuvo una disminución de 2,01 cm, cabe aclarar que en este punto y para este tipo de suelo aún se presenta una expansión importante, pues es de aproximadamente 1,65 cm siendo alta y puede generar afectaciones considerables a la estructura.

No obstante, esta situación vendría siendo favorable y demuestra que un mayor porcentaje de hidróxido de calcio permite la disminución en el potencial de expansión de este tipo de suelo, de igual manera es importante conocer las características del área de aplicación y si es rentable su uso en el tipo de suelo que se tenga.

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	1,65

Tabla 20. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cal)

Fuente: Autores

8.2 ANÁLISIS DE CEMENTO GRIS TIPO I

Se realiza la estabilización del suelo, con la adición de cemento gris tipo 1, marca Argos, con el cual, ante el contacto con el agua, no solo genere una disgregación parcial, y reaccione con los minerales de arcilla, sino que parte de este, se solidifique, generando una acción de confinamiento, y por lo tanto una barrera a la expansión del suelo.

Debido a que es importante conocer las especificaciones de los agentes estabilizantes, se presenta en la (figura 69), la ficha técnica del material utilizado en el ensayo.

Especificaciones Técnicas			
PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	–
Tróxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50	3.50	–
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	45	45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	420	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8	0.8	0.8
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	–	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	9.0	8.0	13.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	16.0	15.0	20.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	26.0	24.0	28.0
Blaine, mínimo (cm ³ /gr)	2800	2800	–

(1) Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118 (ASTM C109)

(2) Ensayo en barras de mortero a 28 días según NTC 4927 (ASTM C268)

(3) Ensayo a compresión sobre bloques de mortero con arena normalizada según NTC 220 (ASTM C109)

Recomendaciones

Las especificaciones del Cemento Gris de Uso General producido por Cementos Argos S.A. cumplen con los valores de la norma colombiana NTC 121 y 321.

Adicionalmente, en la elaboración de concretos se recomienda la revisión y aplicación de la NTC 3318 y NSR-10; requisitos de producción, calidad y durabilidad.

Figura 72. Ficha Técnica Cemento Empleado

Fuente: Argos

Para la realización de estos ensayos, se utilizó la misma dosificación y distribución del material que las empleadas con la Cal. En la primera probeta, se adiciono un porcentaje del 5% del volumen total de la muestra, ubicados simétricamente en la muestra por ambos lados como se muestra en la (figura 70).



Figura 73. Probeta 1 (5% de Cemento)

Fuente: Autor

En la figura 71, se presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 5% de cemento en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 2,827 a 2,912, con una diferencia de 0.085, siendo una relación de vacíos demasiado alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 5%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse una expansión de 2,67 cm, que sería de gran importancia generando afectaciones para la estructura.



Figura 74. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cemento)

Fuente: Autor

Debido a que es muy poco probable que se presente este fenómeno ante la presencia de flujos subsuperficiales de forma transitoria, como en el sitio de estudio, la expansión del material no alcanzara a desarrollarse completamente, pero si en un porcentaje que pueda afectar la vivienda.

En la siguiente tabla (20) se muestra la condición de expansión por estrato del material y la magnitud de esta, este valor corresponde a la expansión máxima que se puede llegar a presentar en el suelo, aunque si se realiza una estabilización con este aditivo y una dosificación similar, los problemas de cambio volumétricos van a disminuir en comparación con la cal.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede establecer que, si se elige por estabilizar el suelo con este tipo de sustancia, se va a conseguir un mejoramiento óptimo del terreno, teniendo en cuenta que respecto al ensayo realizado en condiciones naturales se tenga una expansión en el estrato aproximada de 3,66 cm, lo que indica que se obtuvo una disminución de 0,99 cm, cabe aclarar que en este punto y para este tipo de suelo aún se presenta una expansión importante, pues es de aproximadamente 2,67 cm siendo alta y puede generar afectaciones considerables a la edificación.

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	2,67

Tabla 21. Condición de Expansión Probeta 1 (5% de Cemento)

Fuente: Autores

Debido a que la deformación del material con la adición de cemento, presenta una reducción en la condición expansiva, se realiza un segundo análisis, este con la adición del 10% de cemento en relación de volumen, con la misma distribución a la probeta adicionada con cal a este porcentaje, para que no solo se genere una reacción química

por la interacción de las partículas de cemento con el suelo, sino que también al solidificarse, se genere una barrera que impida que el material siga expandiéndose libremente.

En la figura 72, presenta la distribución de los cilindros de cemento, los cuales se encuentran ubicados simétricamente ocho perforaciones. Esta condición se presenta por las dos caras, cada una con cuatro para simular que los pilotes de cemento van a estar localizados, en todo el espesor del material expansivo.



Figura 75. Probeta 2 (10% de Cemento)

Fuente: Autor

En la figura 73, presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 10% de cemento en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 2,473 a 2,592, con una diferencia de 0.119, siendo una relación de vacíos alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 4%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse una expansión de 4,14 cm, que sería de gran importancia generando afectaciones para la estructura.



Figura 76. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cemento)

Fuente: Autor

Se tiene una particularidad en la expansión entre la probeta en condiciones naturales y el 10% de cemento, ya que se presenta una expansión que pudo haber sido causada por la reacción química dada entre el suelo y el cemento variando 0,48 cm y también respecto a la probeta número dos con 5% de cemento, presentando una variación de 1,47 cm. Esto quiere decir que se presenta una curva de aumento con este porcentaje de cemento y que habrá un cambio en el volumétrico respecto a la condición inicial. En el caso de la probeta 2 con cemento, es importante mencionar que, a 4,14 cm de deformación, corresponde a la máxima magnitud que se tendrían si se presentan periodos de alta precipitación y toda esta agua se infiltraría en el subsuelo, generando la saturación total del material

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	4,14

Tabla 22. Condición de Expansión Probeta 2 (10% de Cemento)

Fuente: Autores

De acuerdo con lo anterior y las condiciones obtenidas mediante el ensayo de expansión con cemento al 10%, es necesario realizar más pilotes e incrementar el agregado hasta el 15% para ver su comportamiento y analizar si sigue aumentando o disminuyendo la relación de vacíos, dado el caso que aumente su saturación se logre la interacción de suelo – cemento y además forme una barrera que logre controlar las deformaciones del suelo.

En la figura 74, se presenta la distribución de los cilindros de cemento en la muestra, todos los cilindros presentan un diámetro de 0,8 cm y una altura de 0,5 cm, en total se ubicaron 12 cilindros (seis por cada lado) distribuidos simétricamente por ambos lados

de la probeta, para con esto generar un volumen del 3,01 cm³, correspondientes al 15% del volumen total.



Figura 77. Probeta 3 (15% de Cemento)

Fuente: Autor

En la figura 75, se presenta la condición de variación en la relación de vacíos mediante el uso del 15% de cal en la muestra, el cual se observa que la expansión del material es considerable, pues pasa de una relación de vacíos de 2,617 a 2,696, con una diferencia de 0,079, siendo una relación de vacíos alta, pues sobrepasa el 1,0 y por consiguiente genera cambios volumétricos. Debido a lo anterior se puede analizar, que, la muestra tuvo una expansión cercana al 4%, que, en campo, con un espesor que posiblemente puede llegar a ser inestable cercano a los 3,0 m, llegaría a darse una expansión de 1,76 cm, siendo un valor más bajo en relación a los demás pero que no deja de ser preocupante.

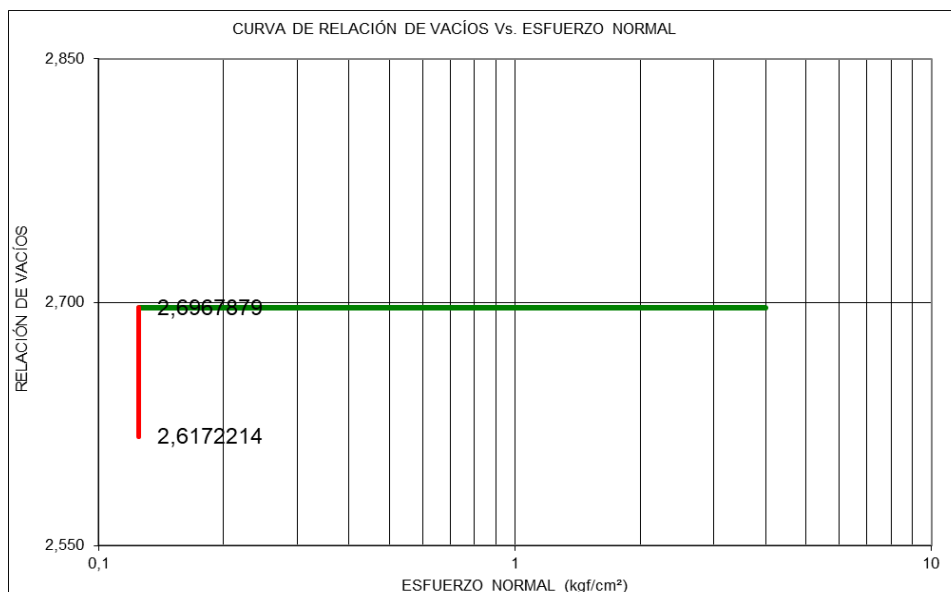


Figura 78. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cemento)

Fuente: Autor

Se tiene una particularidad en la expansión entre la probeta con 10 % y 15% de cemento, ya que se presenta una expansión por saturación mayor en el caso del 10% y en el ensayo de expansión de 15% se obtuvo una menor expansión con una variación de 2,38 (cm) comparándolo con la probeta 3. Esto quiere decir que se presenta una curva de disminución con este porcentaje de cemento. En el caso de la probeta 3 con cemento, cabe mencionar que a 1,76 cm de deformación corresponde a la máxima magnitud de expansión que se tendría si este suelo llega a saturarse por completo.

EXPANSIÓN ESTRATO = 2,40 m		
Por Saturación	S (cm)	1,76

Tabla 23. Condición de Expansión Probeta 3 (15% de Cemento)

Fuente: Autor

Cabe resaltar que, si se elige por estabilizar el suelo con cemento, usando una dosificación mayor a la empleada en el ensayo, se va a conseguir un mejoramiento óptimo del terreno, teniendo en cuenta que respecto al ensayo realizado en condiciones naturales se tenga una expansión en el estrato aproximada de 3,66 cm, lo que indica que se obtuvo una disminución de 1,9 cm, cabe aclarar que en este punto y para este tipo de suelo aún se presenta una expansión importante, pues es de aproximadamente 1,76 cm siendo alta y puede generar afectaciones a la estructura.

No obstante, esta situación vendría siendo favorable y demuestra que un mayor porcentaje de cemento permite la disminución en el potencial de expansión de este tipo de suelo, de igual manera es importante conocer las características del área de aplicación y si es rentable su uso en el tipo de suelo que se tenga.

Condición	Potencial de Expansión (cm)
Inicial	3,36
Cal 5%	5,1
Cal 10%	3,45
Cal 15%	1,65
Cemento 5%	2,67
Cemento 10%	4,14
Cemento 15%	1,76

Tabla 24. Comparación del Potencial de Expansión

Fuente: Autor

8.3 VARIACION DE PARÁMETROS MECÁNICOS DEL MATERIAL

Para conocer la resistencia del material al momento de agregar los aditivos al 15%, el cual fue el porcentaje que demostró un mejor comportamiento en la expansión y consolidación, se realiza un ensayo de Corte Directo para cada una de las muestras con Cal y Cemento, de esta forma saber si se incrementan los parámetros mecánicos del material. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Aditivo (%)	Cohesión no drenada (Cu) (Kg/cm ²)	Peso Unitario (t/m ³)	Angulo de Fricción (°)	Material
4	5	2,4	Cal 15%	0,17	1,76	20	Arcilla de Alta Plasticidad (CH)
4	6	2,8	Cemento 15%	0,23	1,76	21	Arcilla de Alta Plasticidad (CH)

Tabla 25. Resistencia al Corte Directo con Aditivos

Fuente: Autor

Comparando los resultados obtenidos inicialmente antes de aplicar los aditivos como se evidencia en la tabla (**Tabla 11.** Resistencia al Corte Directo Material Natural) que se incrementan los parámetros mecánicos, lo cual indica que el material gana resistencia en el momento de aplicar cal y cemento. Puntualmente la cal al 15% mejora la condición no drenada (Cu) de 0,12 (kg/cm²) y variación del ángulo de fricción de 13°, lo cual indica que el aumento de la resistencia es altamente considerable, generando con esto que se pueda llegar a contemplar la implementación de un sistema de cimentación diferente al que se requerirá con el material en condiciones iniciales.

10. ANÁLISIS DE EXPANSIÓN

En el análisis para el 5% de cada uno de los aditivos se obtuvo un resultado con bastante variabilidad, pues en el caso de la cal se determinó que la deformación por saturación es de 5,1 cm siendo muy alta, lo que podría generar afectaciones importantes en la estructura. En el caso del cemento se determinó que la deformación es de 2,67 cm, lo que indica que en relación con la cal tiene un mejor comportamiento, pero no deja de ser un porcentaje importante de deformación.



Figura 79. Variación de la Expansión con Agregados

Fuente: Autor

Para el 10% se tiene un comportamiento particular, pues mientras que la cal presentó una disminución en la deformación por saturación con un valor de 3,45 cm, el cemento presentó un aumento en la deformación por saturación con un valor de 4,14 cm lo cual indica que es muy alto. Además, lo que pudo ocurrir con este porcentaje de cemento, es que las reacciones químicas suelo-cemento pudieron ocasionar que el material se viera más afectado presentando un comportamiento adverso al esperado.

En el caso del 15% en ambos agregados se observó un comportamiento similar, obteniendo valores de deformación para la Cal de 1,65 cm y en el Cemento de 1,76 cm, con una diferencia de 0,11 mm, lo que indica que para la tipología de material que se encuentra en el sector planteándolo con cemento o con cal en un porcentaje del 15% serán muy similares. Por otro lado, la diferencia radica en que, si no se aplican los porcentajes de cualquiera de los aditivos con base al área, si se tendrá una afectación importante.

En el análisis se determinó que, al disminuir la cantidad de cemento como aditivo, si tuvo un cambio importante, pues se notó un incremento importante respecto a la cal en el mismo porcentaje; no obstante, si se trata de controlar una deformación en un área más

pequeña se puede determinar el uso de bajas cantidades de cemento pues con respecto a la cal, el cemento en menor porcentaje tiene mejor comportamiento que la cal.

Al utilizar esta alternativa de estabilización se debe conocer si la afectación se tiene en una edificación o en un terreno sin construcción alguna, además de saber si el daño se presenta en toda el área o en una zona específica, lo anteriormente mencionado sirve para saber si se hará un control de deformaciones o mejoramiento en la resistencia del suelo, luego de ello para tener en cuenta cuál de los dos aditivos y en qué porcentaje es más favorable respecto a su relación costo beneficio y el método de agregarlo al suelo.

9.1 ANÁLISIS DE RESISTENCIA

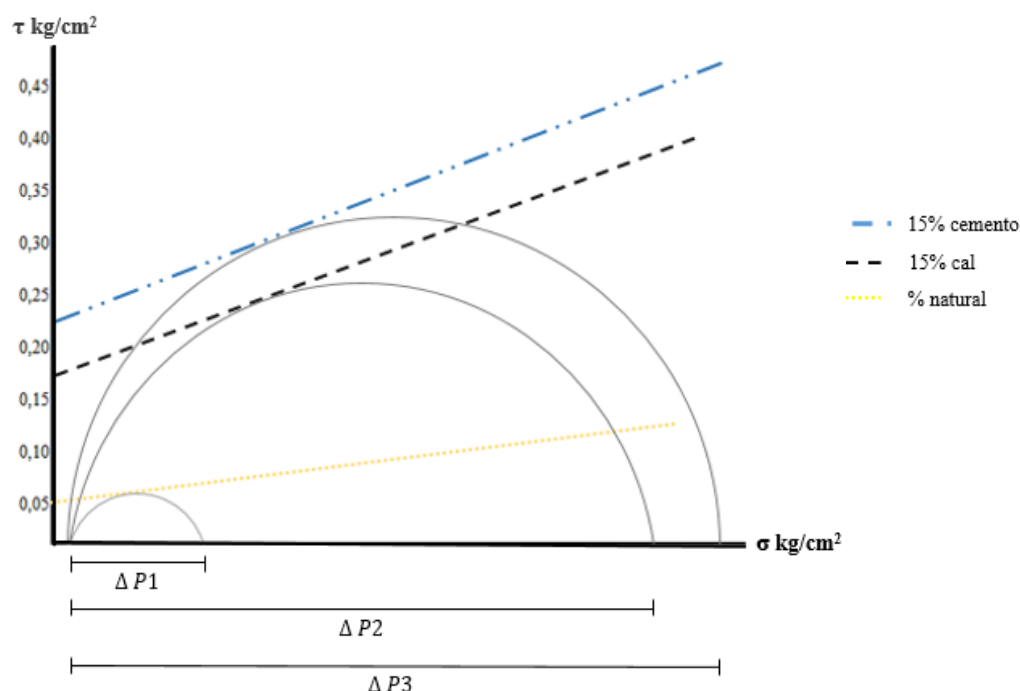


Figura 80. Análisis de Resistencia

Fuente: Autor

Al hacer un análisis de la gráfica de la envolvente de esfuerzos, sobre la condición inicial natural donde se tenía un área bajo la curva demasiado pequeña y buscando mejorarla, posteriormente se hizo el mismo ensayo pero esta vez con agregado de hidróxido de calcio con un porcentaje en volumen del 15%, se observó un cambio importante y un aumento considerable de la curva de esfuerzos; igualmente se hizo con el cemento a un porcentaje en volumen igual al del hidróxido de calcio, donde se registró un aumento mayor siendo comparado con la condición inicial y con la cal, se demostró que su área bajo la curva aumenta significativamente siendo este un comportamiento favorable.

Lo anterior se traduce en campo, que si se aplica la carga de una edificación como la de una casa de uno o dos niveles con una cimentación normal a una profundidad aproximada de 1,0 m; en condiciones naturales se va a tener un esfuerzo mayor sobrepasando la curva, dando a entender que este material no sirve, pero que si este tipo de suelo se mejora con hidróxido de calcio se tendrá un mejor comportamiento y, por ende, su envolvente será mayor y de modo que va a resistir una mayor carga; igualmente para el cemento, y esta vez con un comportamiento mejor, ya que el área de la envolvente aumenta y por tanto, su resistencia al esfuerzo generado por una cimentación.

9.2 ANÁLISIS DE CONSOLIDACIÓN

	Cc	Cr	RSC
CONDICIÓN INICIAL NATURAL	0,419	0,082	1,76
ESTABILIDAD AL 5% DE CAL	0,377	0,159	1,77
ESTABILIDAD AL 5% DE CEMENTO	0,201	0,013	1,65
ESTABILIDAD AL 10% DE CAL	0,490	0,143	1,69
ESTABILIDAD AL 10% DE CEMENTO	0,166	0,080	1,58
ESTABILIDAD AL 15% DE CAL	0,545	0,225	1,65
ESTABILIDAD AL 15% DE CEMENTO	0,174	0,182	1,67

Tabla 26. Análisis de Consolidación

Fuente: Autor

En la tabla 25, se presenta una relación de los valores de compresión (Cc) y recompresión (Cr) en el suelo en condiciones naturales y con la adición de los agregados en diferentes porcentajes. Donde el cemento, demuestra que hay una reducción bastante significativa respecto a la inicial en todos los porcentajes utilizados, aminorando su índice de compresión. Por otro lado, el hidróxido de cal tiene un comportamiento diferente, pues solo en el uso del 5% se obtuvo una reducción en su índice de compresión, pero no logró ser significativa; por el contrario, en los demás porcentajes (10% y 15%) se obtuvo un aumento, lo cual no es favorable. Respecto al índice de recompresión es despreciable en este caso, pues este material se encuentra en condiciones naturales y no ha sido modificado por un agente externo.

En términos generales se logra demostrar que el cemento es un estabilizante que ayuda a tener un comportamiento óptimo tanto en el índice de compresión como en el de expansión, probando que es un estabilizador integral y que podría utilizarse en casos de suelos problemáticos.

11. ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

➤ INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN:

La técnica de inyección y micropilotaje, se emplea generalmente es mediante tubos, que consiste en la perforación y colocación en el terreno de una tubería perforada como se muestra en la figura 78. Una vez colocados se llena el espacio Tubo - terreno con una mezcla de concreto tremie. La inyección se realiza posteriormente a través de la parte inferior del tubo. Este proceso se realiza por fases introduciendo volúmenes de concretos puntuales en cada episodio.

El sistema por el cual se consigue la consolidación del terreno es por relleno de los huecos inyectables, la fracturación de este y la formación de “lajas” de inyección que comprimen el terreno. La actuación de un número de fases permite la consolidación del terreno hasta el grado deseado. La ventaja de este sistema es el control que ofrece sobre la inyección y el grado de mejora del terreno.

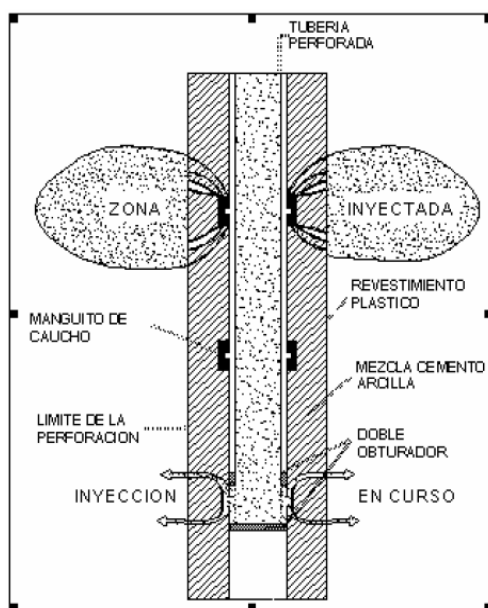


Figura 81. Método de Inyección

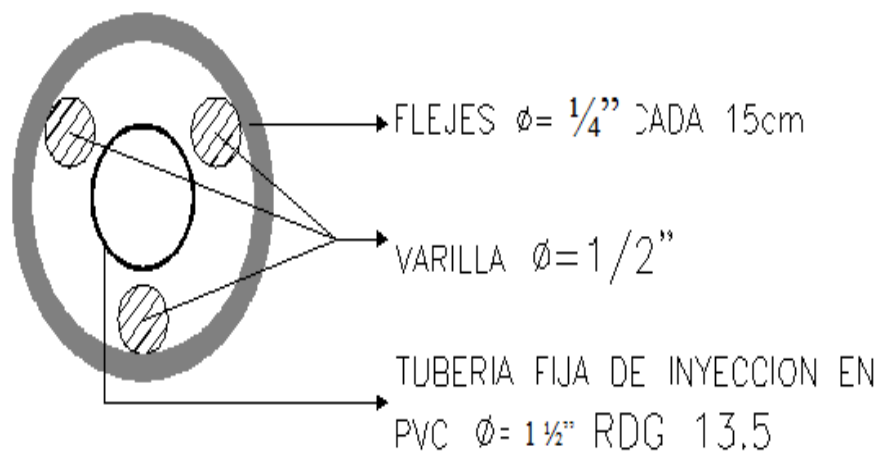


Figura 82. Distribución Refuerzo de Micropilotes

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

Para la realización de este proceso, es necesario seguir los siguientes pasos:

- ✓ Se realiza una perforación en el terreno de 13 a 30 cm de diámetro (según sea el caso) de forma manual a una profundidad de 6,0 metros.



Figura 83. Perforación

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

- ✓ Se debe hacer la adecuación de la canasta de esfuerzo.



Figura 84. Micropilotes

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

- ✓ Se adecua la tubería fija de inyección, la cual se compone de tubos de PVC de 1", posteriormente se realiza la instalación de la tubería con su respectivo refuerzo en la perforación realizada anteriormente para proceder a la inyección.



Figura 85. Instalación de Tubería Fija

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

- ✓ Se realiza la mezcla de concreto con las proporciones de la mezcla estipuladas según el diseño y los estudios previos realizados en laboratorio.



Figura 86. Mezcla

Fuente: Servicios de Ingenieria LTDA (SIL). 2018

- ✓ Se vierte el concreto para formar el recubrimiento de la tubería, de igual forma se hace el seguimiento de consumo que se registra en un formato cada 1,0 metro de inyección.



Figura 87. Recubrimiento de la Tubería

Fuente: Servicios de Ingenieria LTDA (SIL). 2018

- ✓ Con ayuda de la tubería de inyección que se encuentra en la canasta del micropilote y con ayuda de una barra de acero, se procede a hacer la compactación y acomodamiento del concreto tremie. De esta forma se garantiza

una perfecta distribución y llenado de los vacíos existentes y consolidación del suelo.



Figura 88. Compactación del Cemento

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

- ✓ Cada metro (1) se repite el proceso de inyección del cemento hasta que el suelo no resista más presión.



Figura 89. Inyección del Cemento

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

10.1 DOSIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Es necesario realizar un diseño de mezcla para garantizar la resistencia de las estructuras que soportaran y los esfuerzos a los que estará sometido.

Según el tipo de obra se hace el diseño de mezcla para resistencia a la compresión de $f'c = 3000$ PSI con aditivo PLASTOCRETE MD con el fin de disminuir la permeabilidad y aumentar la duración del concreto.

Se hace la dosificación para un bulto de cemento (en baldes de 8 litros)

Agua	3,07
Cemento	4,50
Sika -1	0,01
Arena	6,98
Grava	7,48

Tabla 27. Dosificación

Fuente: Servicios de Ingeniería LTDA (SIL). 2018

12. CONCLUSIONES

- En la exploración se encontraron materiales de composición fina que corresponden al grupo de arcillas y arenas, con particularidades como color claro, densidades bajas y que al entrar en contacto con el agua se vuelven deleznales
- Los materiales a nivel de exploración y caracterización geotécnica, mediante los ensayos de laboratorio, demostraron tener unos potenciales de expansión importantes debido a que los límites (líquido y plástico) superan valores a más de 100% en su límite líquido y 97% en su límite plástico, condición que genera niveles de deformación cuantiosos pues hace que su índice de plasticidad tenga un rango elevado, ayudando a que este suelo pueda absorber grandes cantidades de agua, causando que cambie su comportamiento de un estado plástico a un estado de flujo, situación que produce una expansión en los suelos y a su vez una dispersión de los mismos.
- El nivel freático a pesar de que no se encuentre en todo el sector, si se encontró especialmente en las zonas cercanas a las viviendas, situación que genera variación en los cambios volumétricos, debido a que esta condición se presenta en periodos de invierno, pues el nivel freático sube pero en periodos de sequía se tiene un efecto adverso, haciendo que el nivel freático baje, condición que origina que los suelos se contraigan y por ende se den estos cambios en su volumen, además de producirse un efecto de dispersión afectando las viviendas.
- A nivel de expansión del material en condiciones iniciales se tiene un valor de 3,66 cm y al implementar hidróxido de calcio en diferentes porcentajes; inicialmente con 5% se presentó un aumento en el cambio volumétrico llegando a un valor aproximado de 5,10 cm, siguiendo con un 10%, presentó una disminución que llegó aproximadamente a 3,45 cm, y luego se procedió a hacer el ensayo con 15% de agregado, mostrando una reducción significativa, que se acerca a un valor de 1,65 cm, este último demostró un cambio importante que da a entender que este proceso es útil y estabiliza un suelo con problemas en su cambio de volumen.
- Se tuvo en cuenta otro aditivo como lo fue el Cemento Portland Tipo I, en los mismos porcentajes del hidróxido de cal, y comparándose con el valor inicial, esta vez en un porcentaje del 5%, se obtuvo una disminución en el cambio volumétrico acercándose a un valor de 2,67 cm, mostrando un cambio poco significativo respecto al valor inicial pero que demuestra que en este porcentaje respecto a la cal tiene un mejor comportamiento, pero no el más óptimo. En el caso del 10% se tuvo un cambio poco esperado pero útil para el estudio, pues al entrar en contacto con el suelo se generó una reacción química que hizo que su cambio en volumen aumentara y llegara a un valor cercano a 4,14 cm; en el caso del 15% de aditivo de cemento, mostró una reducción importante en el potencial de su cambio volumétrico acercándose a un valor cercano a 1,76 cm, condición favorable que demuestra la efectividad del aditivo en la estabilización de suelos con problemas en su cambio volumétrico.
- Al comparar los valores obtenidos inicialmente antes de aplicar los aditivos, se demuestra un incremento en los parámetros mecánicos, lo cual indica que el material gana resistencia en el momento de aplicar cal y cemento. Puntualmente la cal al 15% mejora la condición no drenada (C_u) de 0,12 (kg/cm²) y variación del ángulo de fricción de 13°, indicando que el aumento de la resistencia es altamente considerable, lo que

genera que con esto se pueda llegar a contemplar la implementación de un sistema de cimentación diferente al que se requerirá con el material en condiciones iniciales.

- El material como agregado que se considera más óptimo para llevar a cabo la estabilización es el cemento ya que, en bajos contenidos logra demostrar su influencia en la en el mejoramiento de las características geomecánicas del suelo, no obstante, cabe resaltar que, en un 10% de aditivo no genera un cambio favorable en este tipo de suelo, si no, que, por el contrario, co-ayuda a la expansión de este, favoreciendo una posible afectación en las edificaciones
- Para la aplicación de este proceso de estabilización también se debe tener en cuenta si se va a realizar una obra de reforzamiento en la cimentación de la estructura o si por el contrario se requiere estabilizar un terreno antes de una construcción, además de evaluar el área de aplicación pues es importante recordar que, el porcentaje de aditivo se debe dosificar de acuerdo al volumen del suelo, luego allí se debe hacer un análisis de relación costo beneficio donde se dé a conocer la mejor alternativa ya sea con el hidróxido de calcio o el cemento portland tipo 1.

13. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en lo posible llevar a cabo un análisis un poco más minucioso a nivel químico en el que se pueda llegar a tener mayor información específicamente en algunos porcentajes como lo son en 5% de hidróxido de cal y particularmente en el 10% de cemento, pues fue donde se encontró una variación mayor y un comportamiento irregular.
- Durante el proceso de estabilización del suelo, se debe verificar en campo en función del área y realizar el análisis en función de la variación de esfuerzos para llegar efectivamente llegar a estabilizar con el porcentaje en volumen con el que se está realizando el análisis.
- Se recomienda que la mezcla debe ser altamente concentrada para asegurar su efectividad, y tener en cuenta que el método óptimo son las inyecciones de agregado donde se deberá tener en cuenta la presión de inyección, pues esta no debe superar el esfuerzo vertical, ya que si esto ocurre puede llegar a levantar el suelo y dañar todo el proceso, como también deben ser ubicadas estratégicamente y de forma simétrica en el área a tratar, para que funcione de la mejor forma.

14. GLOSARIO

SUELOS EXPANSIVOS:

Los suelos expansivos son suelos típicos de regiones tropicales que presentan importantes cambios de volumen al variar su contenido de humedad. Al producirse los cambios de volumen afectan a estructuras livianas que se encuentran apoyadas en cimentaciones superficiales.

SUELOS DISPERSIVOS:

Los suelos dispersivos son un tipo de suelo que, al contacto con el flujo del agua con bajo o nulo gradiente hidráulico, presentan fenómenos de erosión anómala debido a sus características físicas y químicas.

AGRIETAMIENTOS:

Es la formación de fisuras o aberturas en una superficie o elemento.

ARCILLA:

Son partículas finas de un espesor aproximado de 0,002 mm se compone de agregados de silicatos, que, al entrar en contacto con el agua, forma un tipo de lodo.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA:

Se trata de identificar la estructura y las características físicas, mecánicas, de humedad y químicas del suelo en el lugar donde se planifica llevar a cabo una construcción o se extraerá material para su uso en la construcción.

CARGAS ESTRUCTURALES:

Conjunto de cargas aplicadas a las estructuras de una edificación.

CIMENTACIÓN:

Son los elementos estructurales que contiene toda edificación con la finalidad de transmitir cargas de la estructura al suelo.

CONSISTENCIA:

Es la capacidad del suelo para mantener su forma, basada en su adhesión, cohesión y contenido de humedad.

DEFORMACIÓN:

Modificación en el tamaño del volumen del suelo debido a la aplicación de cargas o cambios en el nivel del agua subterránea.

ESTRATO:

La estratificación del suelo se refiere a la disposición de sedimentos en capas superpuestas a lo largo de un extenso período de tiempo que abarca millones de años.

A lo largo de este extenso proceso de formación del suelo, se han depositado numerosas capas de diferentes materiales.

EXPLORACIÓN DE CAMPO:

Está especificada por la norma NSR – 10 como la ejecución de procedimientos exploratorios con el fin de caracterizar el subsuelo donde se realizará el proyecto. Los procedimientos comprenden apliques, trincheras, sondeos o perforaciones.

FALLA ESTRUCTURAL:

Es una deformación excesiva generada en la estructura que causa alteraciones no resilientes, comprometiendo su desempeño, al no cumplir las especificaciones con las cuales fue diseñada.

HUMEDAD:

El nivel de humedad presente en el suelo está condicionado por su textura y organización interna.

LECHADA DE CEMENTO:

Es una mezcla de cemento gris o blanco sin arena con agua con el cual se busca conseguir un fluido semilíquido que puede ser utilizado en diferentes aplicaciones para la construcción.

LÍMITES DE ATTERBERG:

Los límites de Atterberg son un conjunto de tres límites utilizados en la mecánica de suelos que sirven para caracterizar las propiedades del suelo en relación con su contenido de humedad. Estos límites son: Límite líquido, límite plástico, límite de contracción.

LÍMITE LÍQUIDO:

El nivel de humedad del suelo en el punto de transición entre su estado semilíquido y plástico.

LÍMITE PLÁSTICO:

El nivel de humedad del suelo en el punto de transición entre su estado sólido y plástico.

LÍMITE DE CONTRACCIÓN:

Es el contenido de humedad en el suelo en el cual el suelo deja de encogerse durante el proceso de secado.

MEJORAMIENTO DE SUELOS:

Consiste en el cambio de las características del suelo con el fin de disminuir asentamientos como también aumentar resistencia, ya sea por el método de adición de un material o un proceso físico.

NIVEL FREÁTICO:

Distancia medida desde la superficie hasta el nivel donde la presión del agua es equivalente a la presión atmosférica.

NSR – 10:

Es el reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes donde se plasman los requisitos mínimos que se deben utilizar para el diseño y construcción de edificaciones nuevas, modificación de edificaciones construidas anteriormente a la vigente del presente reglamento, diseño y construcción de edificaciones indispensables.

PLASTICIDAD:

Propiedad que se presenta en algunos suelos y permite la modificación de la consistencia en función de la humedad.

RETRACCIÓN DEL SUELO:

Se presenta por la disminución en la humedad, causada por evaporación del agua en el suelo o drenaje lento y continuo de agua.

CÁRCAVA:

Una cárcava es una formación natural producido por un flujo de agua concentrado, a través del cual la escorrentía fluye durante o inmediatamente después de un evento intenso de lluvia.

EROSIÓN:

Se define como la pérdida físico-mecánica del suelo, con afectación en sus funciones y servicios eco sistémicos, que produce la reducción de la capacidad productiva de los mismos.

EDIFICACIÓN:

Es el término que se utiliza para definir toda construcción diseñada, planificada y ejecutada por el hombre, en un espacio determinado.

ESTABILIZACIÓN:

La estabilización del suelo es un término para cualquier método físico, químico, mecánico o combinado de cambio de un suelo natural para aumentar la capacidad de soporte de peso, la resistencia a la tracción y el rendimiento general de los subsuelos, arenas y materiales de desecho in situ.

MITIGAR:

Moderar, aplacar o disminuir algo.

ESCOMBRO:

Es un desecho, broza o cascote que queda de una obra de construcción o de un edificio u obra derrumbada.

IMPACTO AMBIENTAL:

Es el efecto que produce una acción humana sobre el medio ambiente en diversos aspectos. Técnicamente es una alteración de la línea base, debido a la acción antrópica o eventos naturales.

15. REFERENCIAS

Fuentes, A. y Osiris, M. (2001). *Manual Técnico De Estabilización Y Forestación De Cárcavas En Cuencas Hidrográficas*.

Villada, D., Cifuentes, R., Ayala, R., Doering, H. y Muller, K. (1997). *Uso de Brachiaria dictyoneura (CIAT No 6133) y de Desmodium ovalifolium (CIAT No 13089) en la Estabilización de Cárcavas y Terrenos Degradados*. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/CIAT_COLOMBIA_000013_Uso_de_brachiaria_dictyoneura_CIAT_No.6133_y_de_Desmodium_ovalifolium.pdf

Gonzales, Y y Armas, R (2008). *Identificación y Estabilización de Suelos Dispersivos*. [https://www.researchgate.net/profile/Yoermes-Glez-](https://www.researchgate.net/profile/Yoermes-Glez-Haramboure/publication/260737241_Identificacion_y_Estabilizacion_de_Suelos_Dispersivos_Estado_del_Arte/links/0f3175321943047c7e000000/Identificacion-y-Estabilizacion-de-Suelos-Dispersivos-Estado-del-Arte.pdf)

[Haramboure/publication/260737241_Identificacion_y_Estabilizacion_de_Suelos_Dispersivos_Estado_del_Arte/links/0f3175321943047c7e000000/Identificacion-y-Estabilizacion-de-Suelos-Dispersivos-Estado-del-Arte.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yoermes-Glez-Haramboure/publication/260737241_Identificacion_y_Estabilizacion_de_Suelos_Dispersivos_Estado_del_Arte/links/0f3175321943047c7e000000/Identificacion-y-Estabilizacion-de-Suelos-Dispersivos-Estado-del-Arte.pdf)

Caicedo, B., & Patarroyo, A. (2006). *Caracterización del Comportamiento de Suelos Expansivos ante la Migración de Agua Mediante Modelación en Centrifuga*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/13954/u754320.pdf?sequence=1#:~:text=Los%20suelos%20expansivos%20son%20suelos,encuentran%20apoyadas%20en%20cimentaciones%20superficiales>.

Sierra, A., & Escudero, K. (2016). *Determinación Del Grado De Dispersividad En Suelos Caoliniticos Modificados Con Sales De Potasio Y Calcio*. Universidad Católica De Colombia.

Xiaoqing, Y., Wang, X., Chen, H., & Zhiyong, S. (2021). *A Study on the Durability of Dispersive Soils Improved by Alum in Western Jilin Province of China*. *HINDAWI, 2021*(GEOFLUIDOS).<https://www.hindawi.com/journals/geofluids/2021/3795958/>

(Puppala, A., Pedarla, A., & Bheemasetti, T. (2015). *Soil Modification by Admixtures: Concepts and Field Applications*. Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176863000049\[7](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128176863000049[7)

Koukouzas, N., Tirologou, P., Koutsovitis, P., Karapaños, D., & Karkalis, C. (2022). *Estabilización de suelos* (1st ed.). Handbook of Fly Ash. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128176863/handbook-of-fly-ash>

Camacho, JF, Reyes Ortiz, OJ, Mayorga Antolínez, C., & Méndez G., DF (2006). *Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas*. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 16 (2), 45–53. <https://doi.org/10.18359/rcin.1232>

Moreira, Z. y Afranio, C. (1986). *Control De Suelos Expansivos En El Área Tosagua* . ESPOL. FICT.

Hernández Villares, H., Teresa, D., & Lara, L. (2009). *Estudio Del Método De Sustitución Aplicado En Arcilas Expansivas De Querétaro*. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/5975/1/RI003097.pdf>

Merchán, SD (2009). *Comportamiento De Suelos Expansivos En Cimentaciones superficiales*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11460/u470796.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gutiérrez, VD (2012). *Erosión En Cárcavas: Una Revisión De Los Efectos De Los Diques Forestales*. https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Mongil-Manso/publication/276292818_Erosion_en_carcavas_una_revision_de_los_efectos_de_los_diques_forestales/links/55561d9808ae6fd2d8235ea5/Erosion-en-carcavas-una-revision-de-los-efectos-de-los-diques-forestales.pdf

Rosales Hurtado, D. (2014). *Mejoramiento de Suelos Expansivos mediante Inclusiones de Fibras*. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/819/1/RI003926.pdf>

Velásquez Pereyra, C. (2018). *Influencia del Cemento Portland Tipo I en la Estabilización del Suelo Arcilloso de la Subrasante de la avenida Dinamarca, sector La Molina* Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/2534>

Condori, Y. y Carmen, M. (2021). *Efectos del uso de cemento en la dureza de suelos dispersivos de la carretera Desvío Desaguadero-Kelluyo, Puno 2021* [Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12901>

Camargo, S. e Isabella, V. (2021). *Determinación De La Presencia De Suelos Dispersivos En La Comuna 16 (Belén) De La Ciudad De Medellín*. <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/64435ffa-fdee-4dcf-b39e-27b22cd848b9>

Parra, MG (2018). *Estabilización De Un Suelo Con Cal Y Ceniza Volante*. Edu.co. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/e5575558-aa31-4b1f-b5c7-016a71787c97/content>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas . (2008). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA - NTC 1486*.

Servicios de Ingeniería LTDA. (2014). *Estudio De Suelos Para El Analisis Del Suelo De Fundación Para Una Casa En El Barrio Santa Helena Municipio De Tunja- Departamento De Boyacá*. Tunja

SCSA (Soil Conservation Society of America). 1982. Resource conservation glossary. Ankeny, IA, USA.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) 2004.

Ferrovial, 2012. <https://www.ferrovial.com/es/recursos>

16. ANEXOS

Anexo 1

Anexo 2

Anexo 3

Anexo 4