



**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL
OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

**LAURA LIZETH ROJAS PERILLA
SEBASTIÁN ALBERTO RIVERA PARDO**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO (A)
CIVIL**

**ASESOR
INGENIERO JORGE ARTURO PINEDA JAIMES**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL**

BOGOTÁ

2014



NOTA DE ACEPTACIÓN

Director de Trabajo de Investigación

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá D.C, 4 de Agosto de 2014



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proceso, a nuestro Director Jorge Arturo Pineda, a los Auxiliares de Investigación, Diego Alejandro García, Dilan Arias y Mauricio Cabana, a nuestros pares evaluadores y en especial a nuestras familias que son el apoyo más importante en nuestras vidas.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ



Por todo lo que me enseñó en vida y lo que comprendí cuando se fue...

Laura Rojas Perilla



Contenido

INTRODUCCIÓN	18
1. Problemática.....	22
2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MODERNA DE SUELOS.....	24
2.1 Generalidades.....	24
2.2 Caracterización Geotécnica Básica.....	24
2.2.1 Límites de Atterberg o de consistencia.....	24
2.2.1 Actividad de los minerales arcillosos.....	27
2.2.2 Identificación mineralógica a partir de ensayos de azul de metileno .	28
2.3 <i>Caracterización Composicional</i>	29
2.3.1 Difractometría de rayos X.....	29
2.3.2 Fluorescencia de Rayos X.....	30
2.4 ESTUDIOS DE FÁBRICA	30
2.4.1 SEM (Microscopio Electrónico de Barrido)	30
2.4.2 TEM (Microscopia Electrónica de Transmisión).....	32
2.4.3 Porosimetría de intrusión de mercurio.....	33
2.5. PARÁMETROS DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ	34
2.5.1 Resistencia al corte.....	34
2.5.2 Rigidez.....	36
2.6 Síntesis del Capítulo	36
3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	38
3.1 Generalidades.....	38
3.1.1 Localización.....	38



3.2	Geología y Geomorfología del occidente de la Sabana de Bogotá	39
3.2.1	Geología Regional	39
3.2.2	Estratigrafía	41
3.2.3	Geomorfología	43
3.3	Vías, Industrias, Centros poblados y otras obras de infraestructura en el occidente de la Sabana de Bogotá	45
3.3.1	Vías	45
3.3.2	Industrias y otras obras de infraestructura.....	45
3.4	Climatología e Hidrología, Balances hídricos	48
3.4.1	Clima	48
3.4.2	Precipitación	50
3.4.3	Escorrentía	51
3.4.4	Evaporación.....	52
3.4.5	Evapotranspiración Potencial	54
3.4.6	Balances Hídricos Climáticos	54
3.4.7	Características Hidrográficas	55
3.5	Vegetación, Especies Vegetales y Uso del Suelo	55
3.5.1	Vegetación y especies vegetales.....	55
3.6	Extracción de aguas subterráneas.....	56
3.6.1	Subcuenca hidrográfica del Río Chicú.....	57
3.6.2	Demanda de agua subterránea para el municipio de Tenjo	57
3.6.3	Situación actual del agua subterránea al Occidente de la Sabana de Bogotá	58
3.7	Cultivos	58



3.8	. Análisis de Contexto.....	59
3.9	Síntesis del Capítulo	61
4	DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS Y DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS.....	62
4.1	Reconocimiento de la zona de estudio.....	62
4.2	Extracción de muestras.....	65
4.2.1	Ensayo SPT.....	68
4.2.2	Módulo Young del suelo (E)	74
4.2.3	Apique 1	75
	Apique 2.....	78
4.3	Síntesis del capítulo	79
5	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS	80
5.1.	Ensayos enfocados a la caracterización básica para propósitos de ingeniería de los materiales	80
5.2	Síntesis del capítulo	80
6	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	81
6.1	Generalidades.....	81
6.2	Humedades.....	81
6.3	Estados de Consistencia.....	83
6.4	Composición mineralógica del suelo.....	85
6.4.1	Actividad de la arcilla.....	85
6.4.	Carta de Casagrande.....	88
6.5	Gravedad Específica y Pesos Unitarios	90
6.6	Pesos Unitarios	91



6.6.1	Peso unitario húmedo o total	91
6.6.2	Peso unitario seco	92
6.7	Estados de Esfuerzos	94
6.7.1	Primer Sondeo.....	95
6.7.2	Segundo Sondeo	98
6.8	Relaciones volumétricas de los perfiles	102
6.9	Relación de Vacíos	103
6.10	Saturación	104
6.11	Relación de Vacíos vs Esfuerzo total.....	105
6.12	Relación de Vacíos vs Saturación.....	107
6.13	Perfiles Estratigráficos.....	107
7.	CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL	112
7.1	Generalidades.....	112
7.2	Fluorescencia de Rayos X	112
8.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	114
8.1	Consolidación Unidimensional	114
8.1.1	Calculo de esfuerzo de preconsolidación por el método del trabajo.....	114
8.1.2	Esfuerzo de preconsolidación.....	115
8.1.3	Índice de Compresión.....	116
8.1.4	Variación mineralógica, LL y gravedad específica respecto a la profundidad.....	118
8.2	Succión	120
8.2.1	Resultados.....	120
8.3	Compresión Inconfinada	121

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



8.3.1	Sondeo 1	121
8.3.2	Sondeo 2	122
8.3.3.	Comparación sondeos	123
8.3.4.	Relación de compresión con succión.....	124
8.4	Triaxiales.....	125
8.4.1	Sondeo 1	126
8.4.2	Sondeo 2	128
8.5	Refracción Sísmica	130
8.6	Síntesis del capítulo	132
9.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	134
10.	CONCLUSIONES.....	135
	BIBLIOGRAFÍA	138



FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de falla de suelos fisurados (Vesga L. F., Mesa L. E., 2000)	19
Figura 2. Patologías del pavimento flexible.	22
Figura 3: Patologías en la carpeta asfáltica.....	23
Figura 4. Límites de Atterberg (Rodríguez, M. y Matus, I.)	25
Figura 5. Diagrama de plasticidad según los límites de Atterberg (Atkinson, 1993)	27
Figura 6. Interacción entre electrones y muestra (Instituto De Ciencia De Materiales De Madrid)	31
Figura 7. Escala de tamaños visualizados dependiendo los microscopios. (Instituto De Ciencia De Materiales De Madrid, Reporte anual del 2008)	31
Figura 8. Sistema de lentes del microscopio electrónico de transmisión (Laboratorio De Microscopía Electrónica Uami)	33
Figura 9. Localización (Google earth).....	38
Figura 10: Mapa geológico de la Sabana de Bogotá, (LOBOGUERRERO A, 1992)	40
Figura 11: Mapa geomorfológico de la Sabana de Bogotá (IGAC)	44
Figura 12. Estructura Predial (Mora, L. 2012).....	47
Figura 13. Gráfico de infraestructuras industriales existentes (Mora, L., 2012)....	48
Figura 14. Clasificación del clima, (Tabora A. y Calderón Y., 2004).....	49
Figura 15. Temperatura media anual (°C) de la Sabana de Bogotá, (Tabora A. y Calderón Y. 2004)	49
Figura 16. Movimiento de la ZCIT, zona de convergencia intertropical, (FONDEAR de navegación, 2010).....	51



Figura 17. Rangos de precipitación Media Anual en la Sabana de Bogotá, (Tabora A. y Calderón Y., 2004)	51
Figura 18. Escorrentía Media Anual de la Sabana de Bogotá,(Tabora A. y Calderón Y., 2004)	52
Figura 19. Distribución de la evaporación (POT Tenjo, 2012)	53
Figura 20. Distribución anual de la evapotranspiración potencial (POT Tenjo, 2012)	54
Figura 21: Áreas cosechadas en las provincias de Sabana de Bogotá, Planes de Competitividad en cuatro provincias de Cundinamarca.	58
Figura 22: Comparación entre evaporación y la precipitación a lo largo del año .	60
Figura 23: ubicación de pozos en Tenjo Cundinamarca (Elementos de gestión para un desarrollo sostenible, 2008)	60
Figura 24: Patologías en la carpeta asfáltica, Piel de Cocodrilo, sondeo 1	62
Figura 25: Patología en la carpeta asfáltica, ondulaciones y piel de cocodrilo, sondeo 2	63
Figura 26: Ubicación general de la zona (Google earth)	63
Figura 27: Zona de Sondeos	65
Figura 28: Cn vs Profundidad por diferentes métodos. (Sondeo 1), programa Novo SPT	69
Figura 29: Cn vs Profundidad por diferentes métodos. (Sondeo 2), programa Novo SPT	69
Figura 30: Corrección del SPT (Sondeo 1), Programa Novo SPT.....	70
Figura 31: Corrección del SPT (Sondeo 2), Programa Novo SPT.....	71
Figura 32: Ángulo de fricción (Sondeo 1), Programa Novo SPT	73
Figura 33: Ángulo de fricción (Sondeo 2), Programa Novo SPT	74
Figura 34: Módulo de elasticidad, sondeo 1, programa Novo SPT	74



Figura 35: Módulo de Young, S2, Programa Novo SPT	75
Figura 36: Apique Número 1	76
Figura 37: Arcillas desecadas	76
Figura 38: Muestra de CBR.....	78
Figura 39: perfil del apique	78
Figura 40: humedades sondeo 1 y 2	83
Figura 41. Actividad de la arcilla Sondeo 1.....	86
Figura 42. Actividad de la arcilla Sondeo 2.....	87
Figura 43: Carta de Casa Grande	89
Figura 44: Pesos Húmedos Totales y Secos vs Profundidad.....	93
Figura 45: Esfuerzo efectivo en (kPa/cm ²) vs profundidad en (m), sondeo 1	96
Figura 46: Peso unitario vs profundidad, ecuación lineal, sondeo 1.....	96
Figura 47: Esfuerzo efectivo por método de integral vs profundidad, primer sondeo.	97
Figura 48: Esfuerzo efectivo en (kPa/m) vs profundidad en (m), sondeo 2.....	98
Figura 49: Peso unitario vs profundidad, ecuación lineal, sondeo 2.....	99
Figura 50: Esfuerzo efectivo por método de integral vs profundidad, segundo sondeo.	100
Figura 51: Comparación de métodos, esfuerzo vs profundidad (kPa/m vs cm), primer sondeo.	100
Figura 52: Comparación de métodos, esfuerzo vs profundidad (kPa/m vs cm), segundo sondeo.....	101
Figura 53: Relación de fases de un suelo	102
Figura 54: Relación de vacíos vs Profundidad	103
Figura 55: Saturación vs Profundidad	105



Figura 56: Relación de vacíos vs Esfuerzo total.....	106
Figura 57: Relación de vacíos vs Saturación.	107
Figura 58: Estratificación sondeo 1	109
Figura 59: Estratificación sondeo 2	110
Figura 60. Esfuerzo de preconsolidacion vs profundidad.	116
Figura 61. Indice de Compresion vs profundidad	117
Figura 62: Coeficiente de recuperacion vs profundidad	118
Figura 63: Profundidad vs Succion.....	120
Figura 64: Fotografia montaje de laboratorio.....	121
Figura 65: Resistencia a la compresión inconfiada en el sondeo 1.....	122
Figura 66: Resistencia a la compresión inconfiada Sondeo 2.....	123
Figura 67: Resistencia a la compresión inconfiada Sondeo 1 y 2	123
Figura 68: Succión vs Deformación Unitaria máxima Sondeo 1 y 2.....	124
Figura 69: Esfuerzo máximo vs Deformación Unitaria máxima Sondeo 1 y 2....	125
Figura 70: esquemas de falla sondeo 1	126
Figura 71: Curva esfuerzo vs Deformación, Sondeo 1, Muestra 9 (Ensayo Triaxial)	127
Figura 72: Curvas de presión de poros vs deformación (Ensayo Triaxial)	127
Figura 73: esquemas de falla sondeo 2	128
Figura 74: curvas de esfuerzo vs deformación (Ensayo Triaxial)	129
Figura 75: curvas de presión de poros vs deformación	130
Figura 76: líneas de refracción sísmica (JEOPROBE)	132



TABLA DE ECUACIONES

Ecuación N. 1 Límite de Contracción	26
Ecuación N.2 Índice de plasticidad.....	26
Ecuación N. 3 Valor de Azul de Metileno.....	28
Ecuación N. 4 Distribución de Poros.....	34
Ecuación N. 5 Correlación SPT por energía.....	68
Ecuación N. 6 Correlación SPT por Confinamiento	68
Ecuación N. 7 Actividad de la arcilla	85
Ecuación N. 8 Relación de vacíos.....	103



TABLAS

Tabla 1: Actividad de las Arcillas (Braja M, Das)	28
Tabla 2: Muestras obtenidas Sondeo 1	66
Tabla 3: Muestras obtenidas Sondeo 2	67
Tabla 4: Resistencias en campo por Veleta.....	77
Tabla 5: Humedades halladas en laboratorios.....	81
Tabla 6: límites de Atterberg, sondeo 1	84
Tabla 7: límites de Atterberg sondeo 2	84
Tabla 8: Composición del suelo por límites de consistencia Sondeo 1	86
Tabla 9: Composición del suelo por límites de consistencia Sondeo 2	87
Tabla 10. Análisis de tipos de suelos según Norma INVIAS 2007.....	90
Tabla 11: clasificación de las arcillas por gravedad específica sondeo 1	90
Tabla 12: Clasificación de las arcillas por gravedad específica sondeo 2	91
Tabla 13: Valores de pesos unitarios totales o húmedos en el sondeo 1, por cada muestra a diferentes profundidades	91
Tabla 14: valores de pesos húmedos en el sondeo 2, por cada muestra a diferentes profundidades.....	92
Tabla 15: valores de pesos secos en el sondeo 1, por cada muestra a diferentes profundidades.....	92
Tabla 16: valores de pesos secos en el sondeo 2, por cada muestra a diferentes profundidades.....	93
Tabla 17. Esfuerzos efectivos para diferentes profundidades, por el primer método, sondeo 1.....	95
Tabla 18. Esfuerzos totales encontrados con la integral, sondeo 1.	97



Tabla 19. Esfuerzos efectivos para diferentes profundidades, por el primer método, sondeo 2.....	98
Tabla 19. Esfuerzos totales encontrados con la integral, sondeo 2.	99
Tabla 20: Componentes de las muestras 5, 13 y 23.....	113
Tabla 21. Esfuerzos generados a las muestras.	114
Tabla 22. Profundidades y tipo de muestras.....	115
Tabla 23. Profundidades y tipo de muestras.....	115
Tabla 24. Tabla valores de humedades y succion sondeo 1.	120
Tabla 25. Tabla valores de humedades y succion sondeo 2.	120



ANEXOS

1. Ubicación del proyecto.
2. Bitácoras de extracción de muestras.
3. Registros de Perforación.
4. Registros fotográficos de los laboratorios.
5. Datos Ensayo Consolidación.
6. Datos ensayo Refracción sísmica (FWD).
7. Datos ensayo Refractrometría de rayos x (FRX).
8. Datos ensayo Triaxial.
9. Datos ensayo Compresión inconfiada.



INTRODUCCIÓN

La zona ubicada al occidente de la sabana de Bogotá, posee características que alteran en gran medida el comportamiento de los suelos superficiales que la conforman.

Dentro de estas características es necesario resaltar las siguientes:

- Vegetación foránea: árboles que no pertenecen a la zona y que tienen un alto consumo de agua, lo que hace que el nivel freático disminuya rápidamente, como se describe en el plan de manejo ambiental de agua subterránea del Occidente de la Sabana de Bogotá.¹
- Viveros: aunque puede caer en la característica anterior, se puede separar el efecto que tienen los viveros en la zona, ya que las flores demandan cantidades de agua muy altas y con ello se puede observar que las afectaciones más grandes se presentan en tramos donde hay este tipo de cultivos.²
- Microclimas: Son temperaturas que tiene el ambiente en diferentes horas del día y su efecto hace que la succión matricial aumente y se presente pérdida de humedad en el terreno y de esta manera disminución en el nivel freático.³

Tanto los viveros como los microclimas, se describen en la tesis de maestría, *Corredor Industrial de Occidente, Nuevo modelo de industrialización-urbanización- regionalización sobre la autopista Medellín*

¹ Guías de árboles Santafé de Bogotá, LUIS FERNANDO MOLINA P.

² Corredor Industrial de Occidente, Nuevo modelo de industrialización- urbanización- regionalización sobre la autopista Medellín, Mora Ardila, Liliana Andrea (2012)

³ Corredor Industrial de Occidente, Nuevo modelo de industrialización- urbanización- regionalización sobre la autopista Medellín, Mora Ardila, Liliana Andrea (2012)



- Pozos profundos: En la Sabana de Bogotá, se encuentran ubicadas varias reservas naturales de agua subterránea que son explotadas descontroladamente, para usarse en riegos de cultivos y actividades propias de la zona, al igual que con la vegetación foránea, en el plan de manejo ambiental del Occidente de la Sabana de Bogotá, se describe la forma en que se ve afectado el suelo de la zona de estudio. ⁴

En estudios hechos anteriormente, diferentes autores reiteraron la problemática de desecación y la forma en que se ven afectadas las vías en la zona de estudio, describiéndola de la siguiente forma:

Según lo tratado en Vesga, 2000, el cambio volumétrico que sufren las arcillas, a causa de la pérdida de humedad trae como consecuencia agrietamientos profundos, que pueden fallar incluso por peso propio. Como se muestra en la figura 1, se forman grietas que fallan transversalmente y afecta subrasante del suelo.

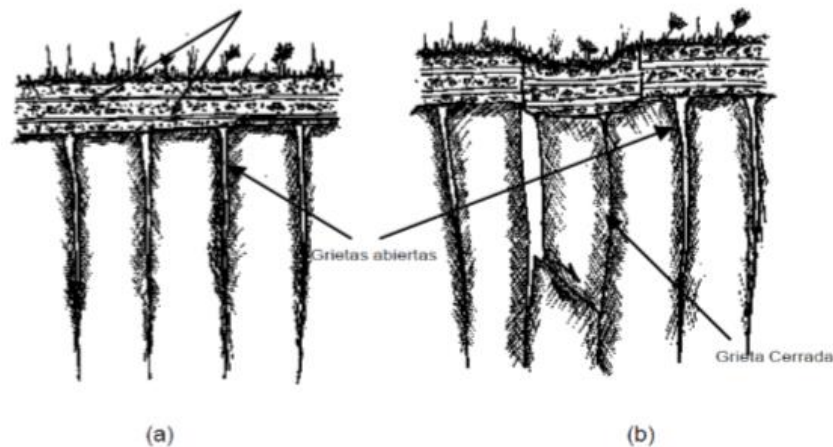


Figura 1. Mecanismos de falla de suelos fisurados (Vesga L. F., Mesa L. E., 2000)

⁴ Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y zona crítica, CAR, 2008.



Por otro lado Ávila, 2005, profundiza en el conocimiento de los mecanismos y variables que intervienen en la formación de agrietamientos de suelos arcillosos causados por retracción.

En donde se plantean las siguientes conclusiones:

“La pérdida de agua por desecación en un suelo hace que se presenten contracciones en el mismo, debido al aumento de la succión y si tales contracciones no se puede desarrollar libremente, se generan tensiones de tracción que pueden dar origen a los agrietamientos”

“El inicio del agrietamiento en un suelo no es una condición absoluta sino relativa que se debe definir con base en la escala de observación y el tamaño de la muestra, pues hay micro agrietamientos que no se pueden apreciar a simple vista o hay discontinuidades que no son significativas en muestras de gran tamaño”

Pineda y Colmenares en el 2006, tratan los cambios en la succión matricial como el principal origen de los cambios de volumen en los suelos arcillosos, algunas de las conclusiones más relevantes de sus estudios son:

“La desecación puede ser entendida como un proceso progresivo de pérdida de humedad, ocasionado principalmente por la evaporación inducida por el brillo solar, la presencia de plantas y árboles con gran avidez de agua (como el pino, la acacia y el eucalipto) y la profundización del nivel freático debida a la extracción continua de agua por bombeo de los acuíferos superficiales presentes en la formación Sabana.”

“La desecación induce, en los materiales arcillosos superficiales, contracciones volumétricas que afectan negativamente la estabilidad, durabilidad y funcionalidad de vías y estructuras livianas.”



En el estudio más reciente en la zona, realizado por Rueda y Pineda en el 2011, se analizan algunos componentes de los suelos arcillosos, dando sus resultados encaminados a encontrar las patologías que se presentan a partir de los problemas de desecación que sufre el terreno.

Algunas de sus conclusiones son:

“El proceso de desecación estudiado, está relacionado con las propiedades de los suelos de la zona, con la acción de las condiciones climáticas y la presencia de vegetación. Es recurrente y tiene que ver con los cambios volumétricos del suelo de soporte de la vía.”

“En los suelos arcillosos de la zona el límite plástico supera el valor de humedad natural en coherencia con la red de fisuras encontradas, lo cual hace evidente el proceso de desecación.”

“Los árboles adyacentes a la vía, dispuestos en hilera, están muy cerca unos de otros (0,60 – 1m) tienen un desarrollo limitado de sus raíces las cuales se van desplazando hacia la vía. Las raíces al extraer el agua generan altas presiones de succión originando contracción volumétrica, a la cual son susceptibles las arcillas presentes en la zona. Esta contracción causa agrietamiento y asentamientos en la estructura de pavimento.”

Teniendo en cuenta las anteriores conclusiones, se realizará por medio de ensayos de caracterización composicional, geológica, estudios de fábrica y mecánicos, un análisis básico de las características que presentan los suelos de la vía que comunica Bogotá con Tenjo, esto servirá para observar los comportamientos que tienen las arcillas y la forma en que afectan el comportamiento y la funcionalidad de las vías.



1. Problemática

El Occidente de la Sabana de Bogotá, corresponde a una zona, principalmente de actividades agrícolas, en donde las vías se vuelven fundamentales para el desarrollo económico de los Municipios de la región.

El estado actual de las vías que se encuentran en el lugar de estudio, presentan daños superficiales como hundimientos, piel de cocodrilo, ondulaciones y pérdidas de berma debido a las cercas vivas presentes paralelas a la vía.

En la figura 2 se muestra una de las patologías más presentes en la carpeta asfáltica, la piel de cocodrilo que hace que la vía pierda funcionalidad.



Figura 2. Patologías del pavimento flexible.

En la figura 3 se puede observar otra patología característica de la zona de estudio, las ondulaciones presentes a lo largo de la vía justo donde se tienen cercas vivas.



Figura 3: Patologías en la carpeta asfáltica

Las problemáticas mostradas anteriormente, son causadas principalmente por las características que posee el suelo de esta zona del Occidente de la Sabana de Bogotá, ya que al tratarse de arcillas altamente expansivas, y que el nivel de agua subterránea varía debido a la vegetación foránea, se presentan columnas de suelo que fallan transversalmente por peso propio y altera la funcionalidad de la vía Tenjo- Bogotá.



2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MODERNA DE SUELOS

2.1 Generalidades

En el desarrollo de este capítulo se presentarán los conceptos básicos que se deben tener en cuenta a la hora de hacer la caracterización geotécnica moderna de un suelo, que presenta condiciones específicamente arcillosas, al igual que se describirá brevemente la normatividad de los ensayos a realizar y los equipos necesarios para ello.

2.2 Caracterización Geotécnica Básica

2.2.1 Límites de Atterberg o de consistencia.

Los límites de consistencia, están basados en el concepto de los diferentes estados en los cuales los suelos finos pueden presentarse en la naturaleza, dependiendo del contenido de agua. Partiendo de lo anterior, se puede afirmar que los suelos finos pueden estar en cuatro diferentes estados: sólido, semisólido, plástico y líquido⁵.

El interés fundamental de la mecánica de suelos, en este caso, es conocer los intervalos de humedad en los cuales el suelo cambia de estado. El método a utilizar es el de límites de consistencia, el cual se describirá brevemente a continuación.

Este método fue creado por Albert Mauritz Atterberg, científico sueco quien arbitrariamente marco las fronteras entre los estados, mediante la fijación de unos límites como lo son, el límite líquido (L.L), límite plástico (L.P), y el límite de

⁵ (Norma IINVIAS 125,126 y 127), Norma Técnica Colombiana NTC 4630



contracción (L.C). Generando con estos una idea del tipo de suelo que se estudia⁶, relacionados en la figura 4.



Figura 4. Límites de Atterberg (Rodríguez, M. y Matus, I.)

Límite líquido

El límite líquido es el contenido de humedad que posee una muestra de suelo, respecto al peso seco, en donde se utiliza una cazuela que se deja caer 25 veces a la altura de 10mm.⁷

Límite plástico

El límite plástico es el contenido de humedad hallado de una muestra que se moldeada en tiras de 3mm de delgadez, respecto al peso seco de la misma muestra secada al horno.⁸

Límite de contracción

Se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, después de introducirlo en un recipiente y ver la disminución del volumen que sufre la muestra.⁹

⁶ Marvin Blanco Rodríguez e Iván Matus Lazo; UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION; GUIA DE MECANICA DE SUELOS I

⁷ Norma INVIAS 125-07, Norma Técnica Colombiana NTC 4630

⁸ Norma INVIAS 126-07, Norma Técnica Colombiana NTC 4630

⁹ Norma Técnica Colombiana NTC 4630



Ecuación N. 1 Límite de Contracción

$$L_c = \frac{w_m - w_s(v_1 - v_2)\gamma_w}{w_s} \times 100$$

Donde

Lc: Límite de Contracción

Wm: peso de la muestra húmeda

Ws: peso de la muestra seca

V1: volumen de la muestra húmeda

V2: Volumen de la muestra seca

Yw: peso específico del agua a temperatura de ensayo

Índice de Plasticidad

Este es uno de los parámetros más importantes en el estudio de suelos finos, se define con la fórmula:

Ecuación N.2 Índice de plasticidad

$$PI = LL - PL$$

Donde:

PI: índice de Plasticidad

LL: Límite Líquido

PL: Límite Plástico

Este define el alcance máximo de contenido de agua para un suelo y su relación con el cambio de volumen (compresibilidad del suelo). El Índice de plasticidad se



puede tratar como el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico.¹⁰

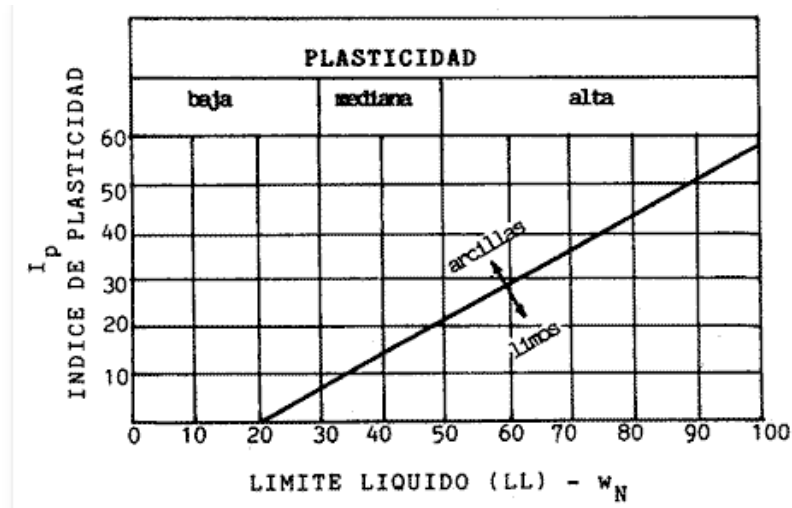


Figura 5. Diagrama de plasticidad según los límites de Atterberg (Atkinson, 1993)

2.2.1 Actividad de los minerales arcillosos.

Composición mineralógica

Las arcillas están compuestas por minerales muy finos, que juntos forman una matriz de alta plasticidad que reacciona con el agua aumentando su volumen. Está compuesta por aluminosilicatos cristalinos o amorfos, y minerales no arcillosos, como silicatos, óxidos, geles, entre otros.¹¹

¹⁰ JOHN ATKINSON, AN INTRODUCTION TO THE MECHANICS OF SOILS AND FOUNDATIONS

¹¹ AN INTRODUCTION TO GEOTECHNICAL ENGINEERING, Prentice-Hall (2010)



Actividad

La actividad de los suelos, es la relación entre el índice de plasticidad y el peso de los granos menores a 2 micrones de la muestra y describe la capacidad que tienen las partículas para retener humedad, como se muestra en la tabla 1

Tabla 1: Actividad de las Arcillas (Braja M, Das)

Clasificación	Actividad (A)	Mineral Predominante
Baja	$A \leq 1$	Caolinita
Mediana	$1 < A \leq 4$	Illita
Alta	$A > 4$	Montmorillonita

Fuente: Actividad de los suelos arcillosos (Fundamentos en Ingeniería Geotécnica, Braja M Das)

2.2.2 Identificación mineralógica a partir de ensayos de azul de metileno

El Valor de Azul de Metileno determinado, se usa para estimar la cantidad de arcillas con características expansivas y materia orgánica presente en una muestra. Un valor significativo indica una gran cantidad de arcilla o de materia orgánica presentes en la muestra.¹²

El valor de azul de metileno se calcula de acuerdo a la siguiente expresión.

Ecuación N. 3 Valor de Azul de Metileno

$$VA = \frac{C \times V}{W}$$

Donde:

VA: Valor de azul de metileno en mg de azul por gramo de material seco pasa tamiz 200.

¹² Norma INVIAS 235-07



C: Concentración de la solución de azul de metileno en mg de azul por ml de solución.

V: ml de solución de metileno requerida en la titulación.

W: gramos de material seco utilizado en la prueba.

2.3 Caracterización Composicional

2.3.1 Difractometría de rayos X

Descripción General

El ensayo de difractometría de rayos X, es un método utilizado para hallar minerales en masa al interior de una muestra, para poder determinar el comportamiento que va a tener el suelo según la composición de este.

Esta técnica se basa en hacer incidir un haz de rayos-x sobre un monocristal de algún compuesto químico y los datos obtenidos de esto van a una gran base con comportamientos de diferentes minerales que se relacionan para dar el resultado.¹³

Uso dentro de la investigación

Al interior de la presente investigación, se usó esta prueba como complemento a los análisis gráficos de composición mineralógica producto de los ensayos realizados, como el índice de plasticidad y la carta de Casagrande, cuyos datos también nos dan un panorama composicional de la arcilla.

¹³ LABORATORIO TÉCNICAS INSTRUMENTALES UVA; ANÁLISIS QUÍMICOS, DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X MONOCRISTAL.



2.3.2 Fluorescencia de Rayos X

Descripción General

Esta se dedica al estudio del primer proceso de emisión y ocurrencia de rayos x, mediante la producción de fluorescencia, identificando y caracterizando las líneas fluorescentes. Este básicamente es un análisis químico que se le realiza a las muestras en donde se identifican los elementos entre el flúor y el uranio, ya que estos adquieren coloraciones fluorescentes. Se excluyen del análisis los gases nobles.

Uso dentro de la investigación

El uso que tiene este ensayo al interior de la presente investigación, será complementar el análisis químico que se obtuvo con la realización del ensayo de azul de metileno y observar el contenido de materia orgánica que tiene la muestra debido a los elementos que la componen.

2.4 ESTUDIOS DE FÁBRICA

2.4.1 SEM (Microscopio Electrónico de Barrido)

Descripción General

Esta observación utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.¹⁴

¹⁴ INSTITUTO DE CIENCIA DE MATERIALES DE MADRID; CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS, LABORATORIO DE MICROSCOPIA FE-SEM

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

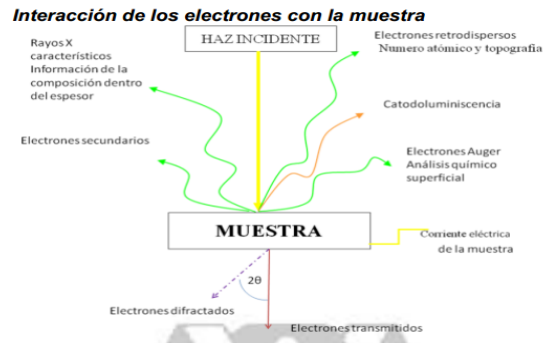


Figura 6. Interacción entre electrones y muestra (Instituto De Ciencia De Materiales De Madrid)

En la figura 6 se muestra la interacción que poseen los electrones al chocar con la muestra, en donde algunos de los electrones se refractan sobre la estructura del suelo y otros se reflejan, generando así una especificación de los elementos que componen la muestra.

Esta técnica se utiliza para la observación y análisis de superficies, suministrando información de relieve, textura, tamaño y forma de grano, además de la composición química de muestras minerales.

En la figura 7, se muestra la comparación de los tamaños que se pueden observar, dependiendo del tipo de microscopio que se use para la labor de visualización.

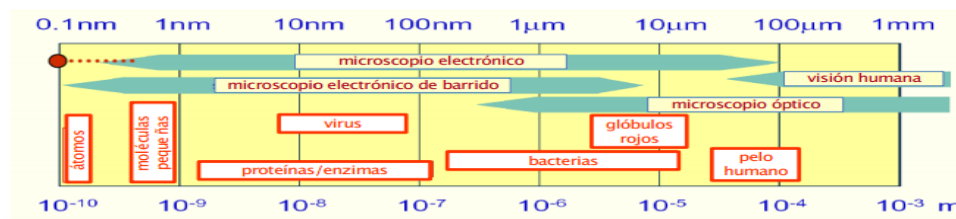


Figura 7. Escala de tamaños visualizados dependiendo los microscopios. (Instituto De Ciencia De Materiales De Madrid, Reporte anual del 2008)



Uso al interior de la Investigación

Al tener la composición química de las muestras usadas y complementándolo con las características de los minerales que conforman el suelo, se puede llegar a conocer la forma en que se afecta el comportamiento de la muestra, en presencia de agua.

2.4.2 TEM (Microscopia Electrónica de Transmisión)

Descripción General

La microscopía electrónica de transmisión es utilizada como una de las técnicas más versátiles en el estudio y análisis de las características microestructurales de objetos sólidos. Esta técnica nos permite observar muestras relacionadas con el campo de la ciencia de materiales y de materiales biológicos. En la microscopía electrónica de transmisión (TEM) las muestras son observadas en dos dimensiones, lo cual representa una pérdida en información relacionada con el espesor. Además de que para ésta última técnica la preparación de la muestra debe ser lo suficientemente delgada como para ser transparente al haz de electrones.

Las interacciones de electrones pueden dar información sobre la composición del espécimen, topografía, cristalografía, potencial eléctrico, campo magnético local, etc. En el TEM las interacciones pueden ser divididas en dos clases.

Fenómenos de dispersión elástica

Este fenómeno afecta la trayectoria del haz de electrones dentro del espécimen sin alterar la energía cinética de los electrones.

Eventos de dispersión inelástica

Este se presenta por la pérdida de energía o transferencia de energía a los átomos del espécimen que conducen a la generación de electrones secundarios,



electrones Auger, Rayos X característicos, (etc). Dando como origen diferentes tipos de señales.¹⁵

En la figura 8 se describen las partes del microscopio usado para la realización del ensayo de barrido.

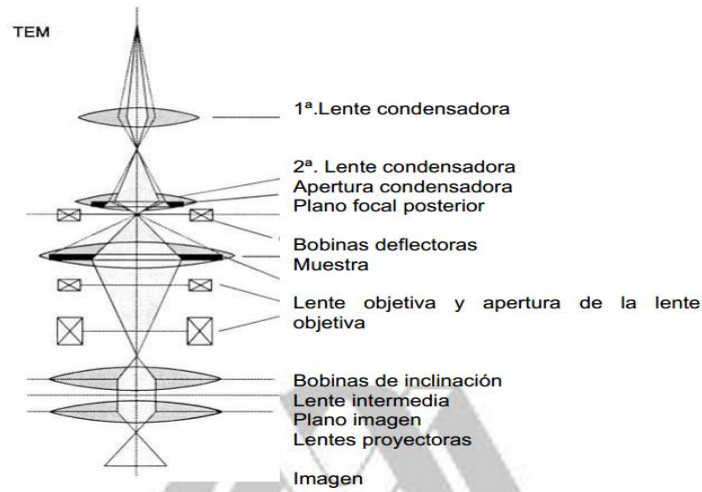


Figura 8. Sistema de lentes del microscopio electrónico de transmisión
(Laboratorio De Microscopia Electrónica Uami)

2.4.3 Porosimetría de intrusión de mercurio.

Descripción General

Este método consiste en aplicar una presión externa que permita la intrusión de mercurio en la estructura porosa de la muestra, haciendo que los poros son llenados con el mercurio.

Asumiendo que los poros tienen una forma cilíndrica, se aplica la ecuación de Washburn para obtener la distribución de poros:

¹⁵ LABORATORIO DE MICROSCOPIA ELECTRONICA UAMI; FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y GEOLOGIA UAMI



Ecuación N. 4 Distribución de Poros

$$P = \frac{2\gamma\cos\theta}{r}$$

Donde:

P: Presion aplicada

Y: Tension superficial del mercurio

Ø: Ángulo de contacto que forma el menisco del mercurio con el materia

r: Radio de poro del material.¹⁶

2.5. PARÁMETROS DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ

Los suelos poseen características de resistencia y rigidez que varían dependiendo del esfuerzo que tengan que soportar y las condiciones del medio ambiente que los rodea.

2.5.1 Resistencia al corte

Resistencia al corte es la capacidad que tiene el suelo para soportar un esfuerzo cortante teniendo en cuenta su clasificación, además es la resistencia que internamente el suelo posee frente a la generación de una falla y deslizamiento en cualquier plano. Esta es muy importante en el área de estabilidad de un suelo, tanto presiones laterales como estabilidad de taludes y su capacidad máxima de carga. Tratándose en este caso de arcillas se determina mediante ensayos de compresión simple y debido a la cohesión que hay entre las partículas el esfuerzo que necesita es un poco mayor que el que se necesita en una arena suelta¹⁷.

¹⁶ BLANCA GOMEZ TUBIO, MIGUEL ANGLE RESPALDIZA, Y M LUISA PARDO RODRIGUEZ; III CONGRESO NACIONAL DE ARQUEOMETRIA; UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

¹⁷ FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTECNICA; BRAJA M DAS; SACRAMENTO CALIFORNIA (2000).



2.5.1.1 Parámetros que intervienen en la resistencia al corte

La falla generada en una masa de suelo depende de dos factores, el esfuerzo cortante sobre el plano de falla (τ) y el esfuerzo normal sobre el plano de falla (σ), estos generan una envolvente de falla, de la cual podemos encontrar los parámetros que intervienen en la resistencia al corte como lo son el ángulo de fricción interno (ϕ) y la cohesión drenada y no drenada (c_u)¹⁸.

2.5.1.2 Determinación de parámetros de resistencia al corte

Los parámetros de resistencia al corte se determinan en laboratorio principalmente los siguientes ensayos.

2.5.1.2.1 Triaxial de corte

Este ensayo nos proporciona información sobre el comportamiento esfuerzo deformación unitaria del suelo, gracias al confinamiento se puede generar una carga axial variable o constante, observando la falla generada en la masa de suelo.

2.5.1.2.2 Consolidación Unidimensional

Una vez preparada la muestra en el aro, se aplica una carga axial cada cierto tiempo, esto hace que la muestra se comprima, luego de esto las cargas se van retirando parcialmente, hasta que la muestra recupere una parte del volumen perdido¹⁹.

2.5.1.2.3 Correlaciones con SPT

Siendo el ensayo SPT el más usado in situ, se han creado varias formas de correlacionar los datos obtenidos para poder hallar datos como el ángulo de fricción, la densidad relativa de los suelos, la resistencia al corte no drenada, la

¹⁸ FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTECNICA; BRAJA M DAS; SACRAMENTO CALIFORNIA (2000).

¹⁹ Norma ASTM D 2850



resistencia a la compresión simple para suelos cohesivos, entre otros. En la presente investigación se tomarán correlaciones para hallar y corroborar datos obtenidos en otros laboratorios.

2.5.2 Rigidez

La rigidez junto con el amortiguamiento, son propiedades dinámicas del suelo, en donde se mide la respuesta que tiene la zona de estudio y la capacidad que tiene para disipar la energía.

Módulo de elasticidad E y D

El módulo de elasticidad de un suelo hace referencia a la constante de proporcionalidad entre esfuerzo y tensiones en donde se ven involucradas diferentes variables como la deformación vertical ξ , esta aparece cuando se produce un incremento en el esfuerzo vertical, que puede deberse a diferentes razones:

- Compresión de la muestra
- Variación en el volumen de vacíos de la muestra por presiones externas a los que se vea sometida el espécimen.

Hay que tener en cuenta que cuando la muestra se encuentra saturada y no hay drenaje, la variación de volumen que se presente será mínimo, esto debido a que el espacio de desplazamiento del agua, es limitada.

2.6 Síntesis del Capítulo

En este capítulo se logra apreciar el procedimiento de ejecución de los laboratorios que se realizaron en el proceso de caracterización, así mismo la incidencia que se presenta en el análisis de los datos que se obtienen, para la conceptualización de la problemática.

El proceso de caracterización realizada, se dividió en tres partes fundamentales:

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



- 1) Caracterización geotécnica
- 2) Caracterización Composicional
- 3) Comportamiento Mecánico

Las cuales darán las pautas de comportamiento del material de las muestras obtenidas en campo y las posibles reacciones frente a diferentes condiciones, como cambios en las presiones, alteración en las saturaciones, pérdida de humedad, entre otros.



3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Generalidades

3.1.1 Localización

La Sabana de Bogotá se encuentra ubicada sobre la Cordillera Oriental, al sur del Altiplano Cundi-boyacence, es la altiplanicie más extensa de los Andes Colombianos y tiene una altura aproximada de 2.600 msnm.

La zona en la que se realizará el estudio de la presente investigación, corresponde a la Autopista Medellín, como se puede observar en la figura 9, en el tramo que comunica a la ciudad de Bogotá D.C y el municipio de Tenjo, debido a las múltiples problemáticas que se presentan en dicho lugar.

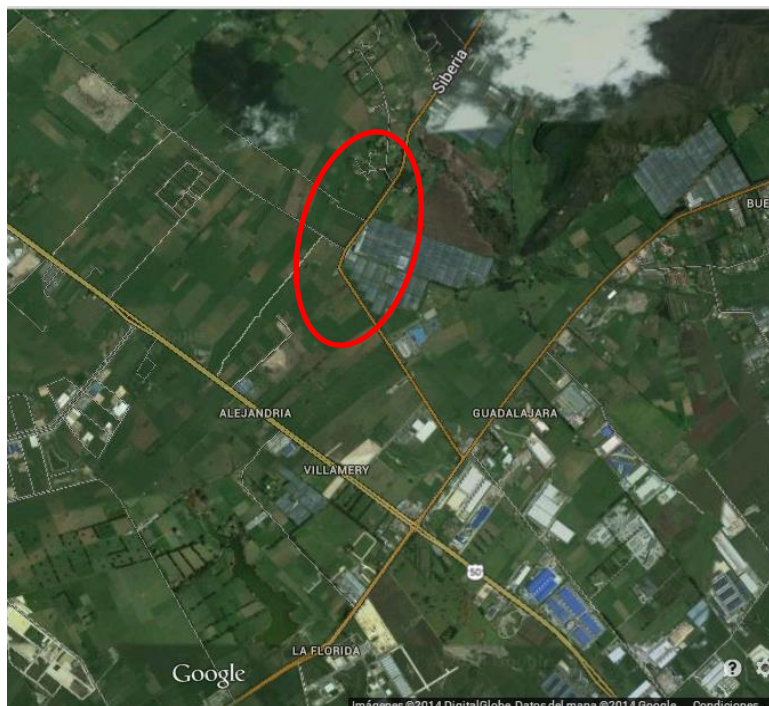


Figura 9. Localización (Google earth)



3.2 Geología y Geomorfología del occidente de la Sabana de Bogotá

3.2.1 Geología Regional

La zonas de estudio se encuentra localizado en la cordillera oriental, geomorfológicamente se diferencian dos sectores, uno plano, que consta de depósitos de origen fluvio glacial, fluvial y lacustre de la edad Plioceno, periodo cuaternario. La segunda es montañosa que se encuentra formada por rocas sedimentarias, areniscas, arcillolitas, limolitas, entre otras, de origen marino y continental, de edad Cretácico Superior Paleógeno.²⁰, esto se puede observar en la figura 10.

²⁰ POT Municipio de Tenjo, Aspecto Biofísico, 2012

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ



Figura 10: Mapa geológico de la Sabana de Bogotá, (LOBOGUERRERO A, 1992)



En cuanto a la estructura y el comportamiento tectónico, el área se afecta por fallas debidas al levantamiento de la cordillera respondiendo a esfuerzos compresivos.

Según lo planteado en el POT de Tenjo 2012, la conformación litológica es el resultado de acumulación de sedimentos submarinos de hace 140 o 170 millones de años, cuando el mar inundo la Cordillera Oriental y a la posterior regresión del mismo, permitiendo que se propiciara la acumulación tranquila de los sedimentos, dejando esta zona rica en nutrientes orgánicos. De 25 a 5 millones de años se genera un levantamiento de la cordillera que conformó un gran lago que hoy componen el relleno de la Sabana de Bogotá.

3.2.2 Estratigrafía

Para la zona se presenta un perfil estratigráfico que se describirá en este documento de la más antigua a la más reciente.

Formación Chipaque (Ksc)

En el POT del Municipio de Tenjo 2012, describe esta zona como una composición de niveles de lodolitas negras, laminadas y algunas veces silíceas, que meteorizan en escamas, con un espesor aproximado de 100m

Por la parte superior se encuentra transicionalmente con la formación Arenisca Dura, y por la parte inferior no aflora contacto, ya que se presenta una zona fallada con la formación Plaeners.

Aproximadamente tiene una edad de formación del Turoniano al conaciano.

Grupo Guadalupe

Este está dividido en tres que de base a tope corresponden a Arenisca Dura, Plaeners y Tierna, que están formadas principalmente de arenisca intercalda de liditas, limolitas y arcillolitas:



Formación Arenisca Dura

Está ubicada en la parte inferior del Grupo Guadalupe, tiene contacto transicional y suprayaciendo a la formación Plaeners.

Está compuesta de cuarzo arenitas de color gris y gris amarillo, de grano muy fino, subredondeados, en capas que varían de 5cm a 8m, presentan laminación plana paralela, muy compactada y con cemento silíceo. Se presentan intercambios de capas delgadas de limolitas silíceas y liditas con estratificación lenticular y plana paralela (P.O.T Tenjo 2011). En la parte inferior se encuentran niveles arcillosos con restos de fósiles de peces. Pertenece al Conaciano – Santoniano.

Formación Plaeners

Es el nivel medio del Grupo Guadalupe, tiene un espesor aproximado de 120m.

En la parte inferior, se encuentra una interestratificación de liditas, limolitas silíceas y arcillolitas de color gris a gris amarillo, esto corresponde a 50m aproximadamente.

En la parte media se encuentra una composición de lidita y limolita silícea de color gris claro, gris oscuro con bancos de cuarzo, de alrededor de 8m, arenitas grises de grano fino y una matriz arcillosa.

En la parte superior hay una sucesión de liditas, limolitas silíceas y lodolitas de color gris claro. (P.O.T. Tenjo 2011)

Formación Guaduas (Tkgu)

Formación compuesta por arcillas rojas con mantos de carbón en la zona media. Los niveles de arcillolitas grises con gran cantidad de hierro y algunos niveles de areniscas arcillosas silíceas.



Depósitos Cuaternarios

- Depósito de Terraza Alta: Relleno sedimentario de la Sabana de Bogotá, compuesta de limo, arcilla y arena.
- Depósitos Aluviales: Sedimentos dejados por el río Chicú y sus contribuyentes, estos forman llanuras de inundación y están compuestos por arenas finas y arcillas.
- Depósitos Coluviales: Corresponden a las zonas de piedemonte, se constituyen de grabas de arenisca y lodolitas en un medio arcillo arenoso.

3.2.3 Geomorfología

El Occidente de la Sabana de Bogotá está compuesto en su gran mayoría por depósitos pertenecientes al período cuaternario, que morfológicamente se denominan Valles Aluviales, y otros de origen fluvial, llamados Abanicos Aluviales.

La zona de la montaña presenta tres tipos de formas de origen:

- Pendientes denudadas: Son laderas sin forma particular, que presentan un relieve alto de pendientes inclinadas y de longitud muy larga.
- Colinas Irregulares: Relieves de colinas, con pendientes muy inclinadas.
- Valles denudacionales: Geoformas del desgaste de las montañas.
- A continuación se presenta un mapa geomorfológico con la localización de las formaciones que se encuentran en la zona de estudio.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

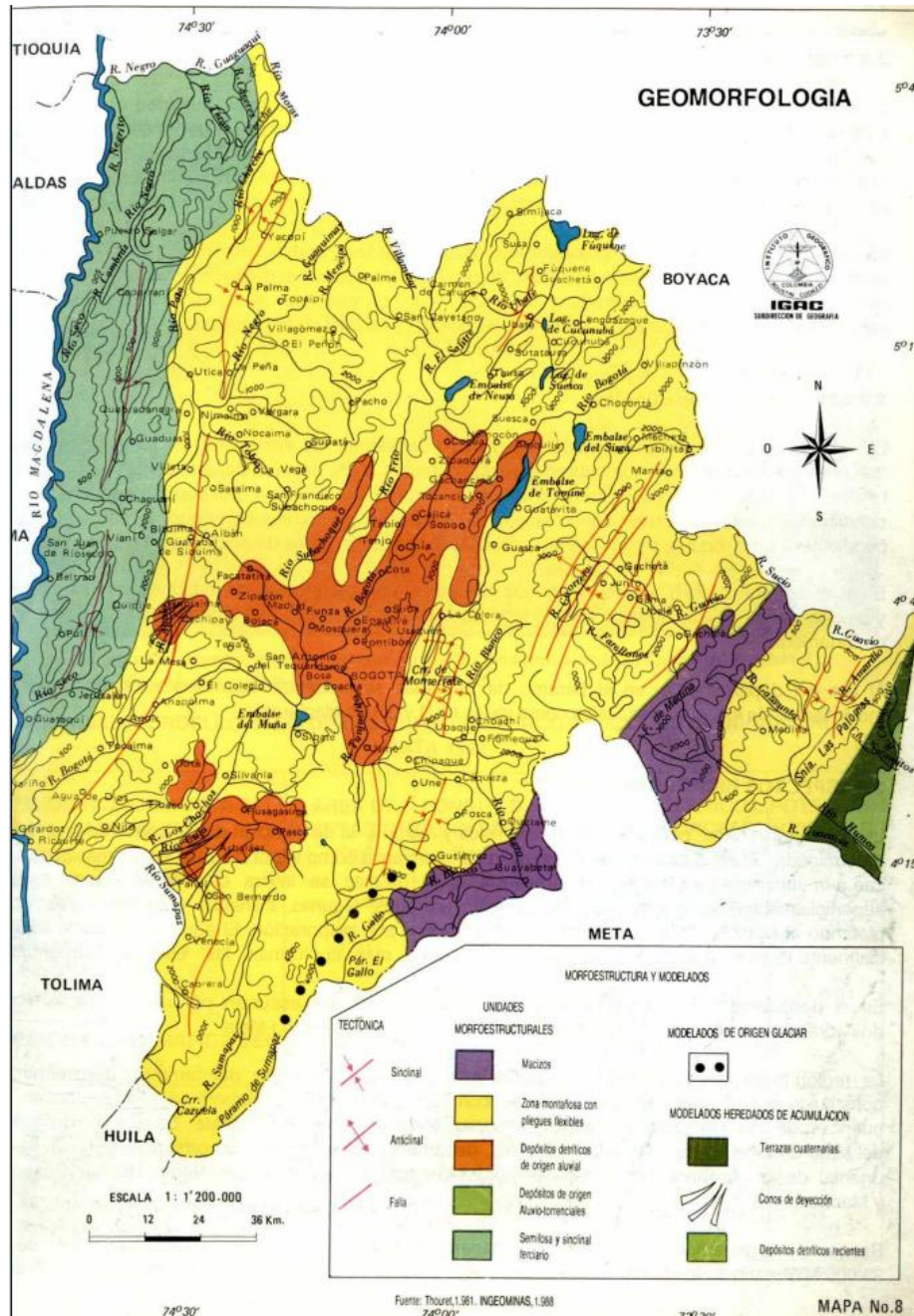


Figura 11: Mapa geomorfológico de la Sabana de Bogotá (IGAC)

En la figura 11, se puede observar que la zona de estudio descrita geomorfológicamente, es una zona montañosa con pliegues flexibles y depósitos detríticos de origen aluvial.

3.3 Vías, Industrias, Centros poblados y otras obras de infraestructura en el occidente de la Sabana de Bogotá

3.3.1 Vías

La vía más importante que posee esta zona es la Autopista Medellín, cuyo objetivo principal es comunicar a la ciudad de Bogotá con otras regiones del país, y está diseñada para el tránsito rápido de mercancías y pasajeros, nunca estuvo planeado para el desarrollo que ha tenido el sector, a comparación de otras zonas como la correspondiente a la calle 13.

Es importante señalar los componentes de la red vial del corredor Industrial de Occidente, que igualmente son de gran impacto en la zona, el primero es la Glorieta de Siberia, cuyo fin principal es interceptar la Autopista Medellín con la vía Regional Transversal de la Sabana, que comunica a Chía con Girardot. El segundo es la ubicación estratégica del Peaje que permite que la zona Industrial esté más cerca a Bogotá y los movimientos comerciales se faciliten.

3.3.2 Industrias y otras obras de infraestructura

Las condiciones que presenta la zona del Occidente de Bogotá son totalmente óptimas para la ubicación estratégica de diferentes industrias, ya que al realizar sus infraestructuras de producción se toman en cuenta los siguientes parámetros:

Factores Físicos:

- Fuentes de energía cercanas
- Extracción de materias primas
- Distribución sencilla
- Descongestión vial
- Medio ambiente propicio
- Industrias aglomeradas que permiten un beneficio económico.



Factores humanos:

- Mano de obra barata
- Ventajas políticas

Factores determinados:

- Ofertas de finca raíz
- Las restricciones ambientales en territorios municipales son menores que en grandes urbes
- Igual sucede con las condiciones ambientales
- Los municipios son muy benéficos en cuanto a los impuestos tributarios para las empresas

Según lo establecido en el P.O.T del Municipio de Tenjo, en el Acuerdo 0,14 de 2000, se destina un porcentaje del suelo Rural para establecer una Zona Industrial y un corredor vial de servicios rurales, ubicado en el sector de la vereda La Punta, cuyo uso del suelo permite realizar actividades de manufactura, transformación de materia prima y todas aquellas que no demanden más de un nivel medio de impacto.

El corredor Vial y las zonas industriales destinadas tienen una ubicación estratégica, según los parámetros anteriormente nombrados, sobre la autopista Medellín, que facilita la comercialización de los productos, el Acuerdo establece, en el Artículo 145, una franja de 500 metros a lado y lado de la Autopista Medellín, desde el eje vial, como se puede observar en la figura 12.

3.3.2.1 Corredor Industrial de Occidente

Es el área ocupada por la agrupación de industrias que aprovechando los beneficios que otorga el Municipio de Tenjo, instalan sus infraestructuras en este sector, de la siguiente forma (Figura 12).

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

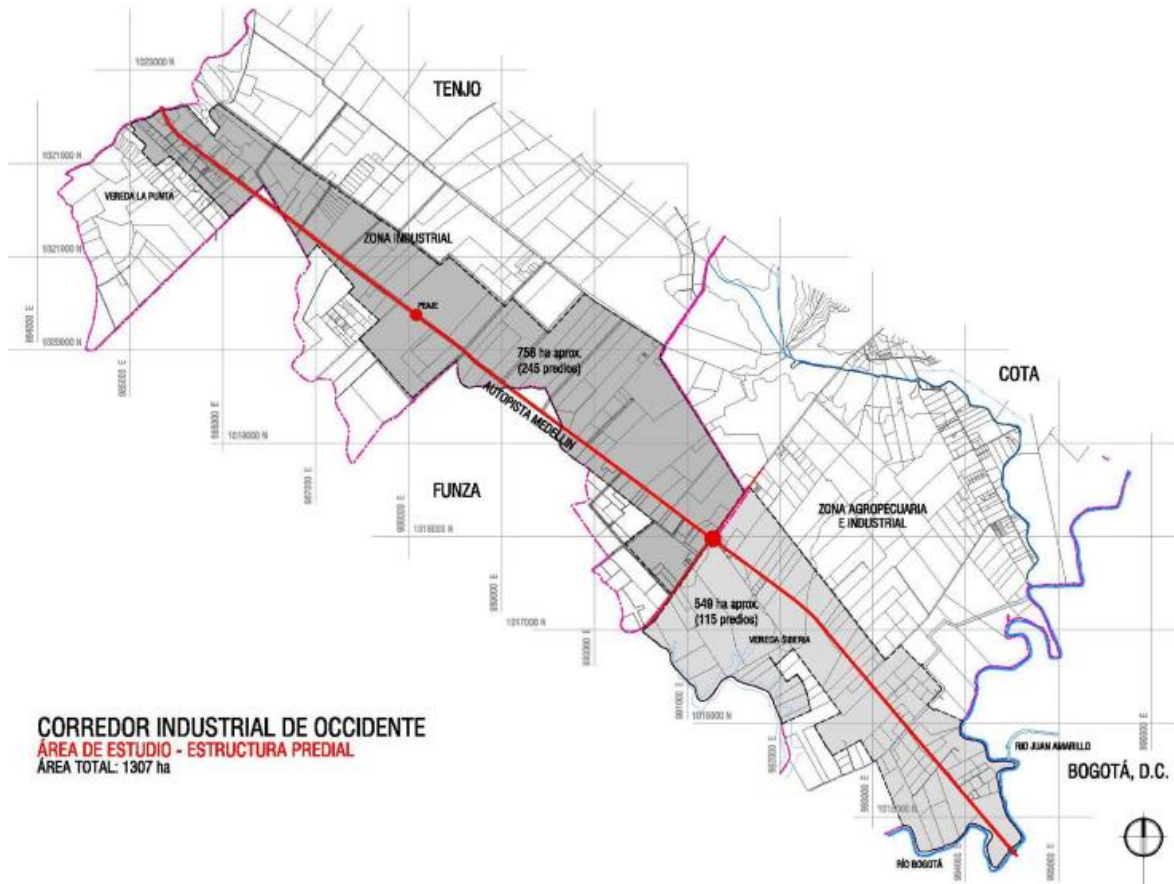


Figura 12. Estructura Predial (Mora, L. 2012)

Las infraestructuras ubicadas en el corredor industrial, han tenido un crecimiento progresivo, en el cual se identifican claramente los usos que tienen cada una de las empresas del sector, en la figura 14 se pueden observar algunas de las empresas instaladas en este sector, con su respectiva división de la producción, y posteriormente se encontrara en la figura 13 el listado general de otras industrias de la zona.

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



INDUSTRIAS EN EL CORREDOR INDUSTRIAL DE OCCIDENTE	
DIVISION	INDUSTRIA
14	Explotación de minerales no metálicos Triturados del Tolima Ltda. Minera La Minga
15	Elaboración de productos alimenticios y de bebidas Empresa de Licores de Cundinamarca Delipavo Ltda. Bimbo de Colombia S.A. Concentrados Cresta Roja S.A. Pronaca
24	Fabricación de sustancias y productos químicos Pintubler de Colombia S.A. Quimica Cosmos S.A.
25	Fabricación de productos de caucho y de plástico Productos Morgan Ltda. A y P de Colombia S.A.S
26	Fabricación de otros productos minerales no metálicos Monserrate pisos y mármoles Ltda. Planta de prefabricados Concretos Tremix Il fiorino piedras naturales S.A. Fábrica de vidrios templados Vidrial Temp Ltda. Pronalvit Ltda.
28	Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo Estructuras Tecmo Ltda.
29	Fabricación de maquinaria y equipo ncp I & M Ingeniería Ltda
31	Fabricación de maquinaria y aparatos eléctricos Siemens Manufacturing S.A.
34	Fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques Comercializadora Franig Ltda Espumas Santafe de Bogotá S.A.
36	Fabricación de muebles; industrias manufactureras ncp Industrias Spring S.A. Ronda S.A. Multiproyectos S.A. Lamyflex S.A.

Figura 13. Gráfico de infraestructuras industriales existentes (Mora, L., 2012)

Hay que tener en cuenta, que todos los asentamientos industriales presentes en la zona, aproximadamente 64 empresas, se encuentran sobre terreno lacustre que se ve afectado por los procesos de desecación, esto hace que las vías se deterioren y se vea alterado el desarrollo de las actividades que se desarrollen por las industrias.

3.4 Climatología e Hidrología, Balances hídricos.

3.4.1 Clima

La zona Occidental de la Sabana de Bogotá posee diversidad de climas, ya que abarca desde la parte alta del río Bogotá, que tiene una superficie total de 4.650 km² de los cuales 1.200 son planos y poseen una temperatura de promedio de 13.5°C, teniendo en cuenta que en un solo día se presentan variaciones registradas de la siguiente forma, antes de salir el sol puede llegar a ser muy bajas entre los -3 y 6°C, y hacia el medio día y las dos de la tarde puede llegar a 23° o 25°C.



Los vientos son moderados por estar localizada en la zona del Ecuador y la precipitación media anual es de 900mm.

En la zona también se presentan microclimas (figura 14), lo que hace que los suelos en ciertas épocas contengan mucha menos agua de la necesaria para que la vegetación mantenga su consumo normal.

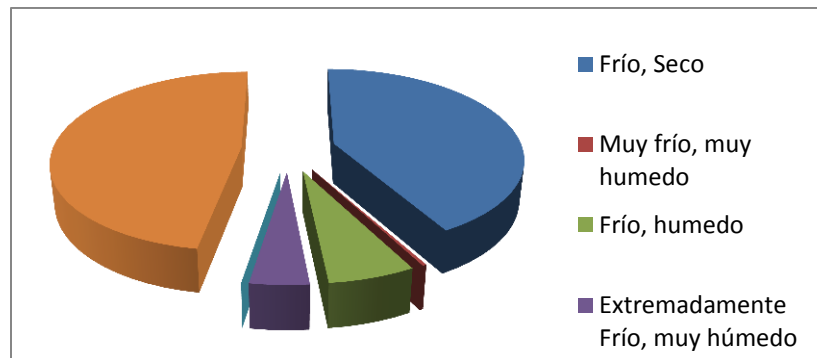


Figura 14. Clasificación del clima, (Tabora A. y Calderón Y., 2004)

Teniendo en cuenta la presencia de diferentes climas en una misma zona, se realiza una relación entre estos y la altura a la que se encuentran ubicados, llegando a la distribución mostrada en la figura 15.

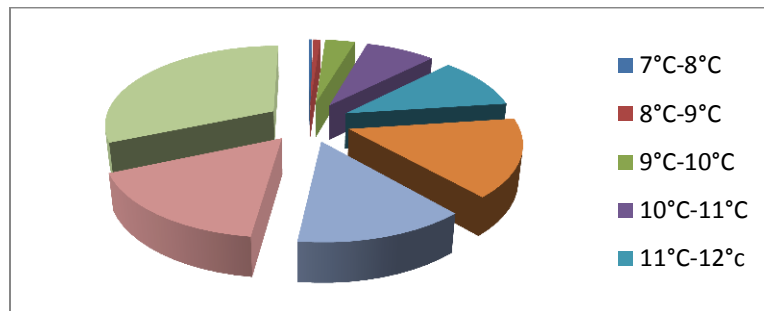


Figura 15. Temperatura media anual (°C) de la Sabana de Bogotá, (Tabora A. y Calderón Y. 2004)

Para obtener los climas correspondientes a la región de análisis se toman en cuenta los registros de las estaciones ubicadas cerca al sector.



3.4.2 Precipitación

El Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Tenjo muestra que este está ubicado en la Zona de Convergencia Inter Tropical, la cual se encuentra situada entre los cinturones de alta presión subtropical de los dos hemisferios, lo que hace que debido a sus gradientes de presión se generen los vientos Alisios de noreste y de sureste, este fenómeno se caracteriza por moverse con el sol y cuando se produce un retraso en este desplazamiento se generan los malos tiempos climáticos, que traen consigo temporadas de altas precipitaciones.²¹

El desplazamiento de la ZCIT se puede presentar así:

- Posición meridional de la ZCIT: Enero y febrero
Se presenta un periodo seco que se extiende de diciembre a marzo y las precipitaciones que se presenten son causadas por fenómenos de convección.
- Posición central de la ZCIT: Abril y octubre
Se presentan las dos temporadas más lluviosas, una en abril y junio, y la otra entre septiembre y octubre.
- Posición septentrional máxima de la ZCIT: junio y agosto
Se presenta un periodo seco del año.

²¹ POT del Municipio de Tenjo, Aspecto Biofísico, 2012



Figura 16. Movimiento de la ZCIT, zona de convergencia intertropical, (FONDEAR de navegación, 2010)

En general durante todo el año se presentan cambios en la precipitación que van entre los 17mm en el mes de enero y los 117mm en el mes de abril, y para los dos periodos húmedos se encuentra en el rango de 56mm a 117mm. Esto se puede observar en la figura 17, que da un panorama más detallado de las condiciones de precipitación media anual en Bogotá.

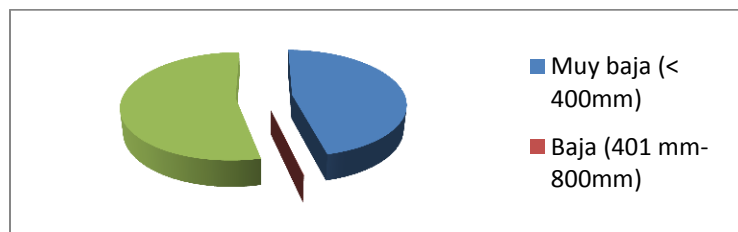


Figura 17. Rangos de precipitación Media Anual en la Sabana de Bogotá, (Tabora A. y Calderón Y., 2004)

3.4.3 Escorrentía

El nivel de escorrentía que se presenta en la zona de estudio es superior a 200 mm, teniendo en cuenta la distribución que se realiza en la figura 18, en donde se muestra la escorrentía perteneciente a toda la Sabana de Bogotá.

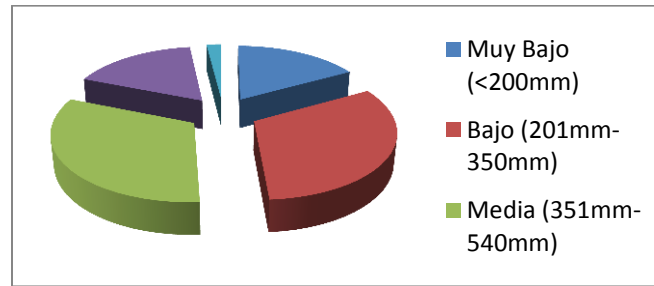


Figura 18. Escorrentía Media Anual de la Sabana de Bogotá, (Tabora A. y Calderón Y., 2004)

Teniendo en cuenta que este análisis se realiza para toda el área de la Sabana de Bogotá, se debe hacer una puntualización en la zona de la toma de los sondeos, en cuanto a los rangos de precipitación, generalmente los rangos están entre 17mm en el mes de enero y 117mm en el mes de abril, en estos datos se puede observar la variación tan marcada que se presenta en este sector.

3.4.4 Evaporación.

La evaporación está relacionada directamente con otros parámetros como lo son la altitud, la temperatura, la iluminación que recibe diariamente del sol, entre otros, por lo que hace que la Sabana de Bogotá tenga casi fijo el valor de este y corresponde a registros entre 1000mm y 1100mm anuales.

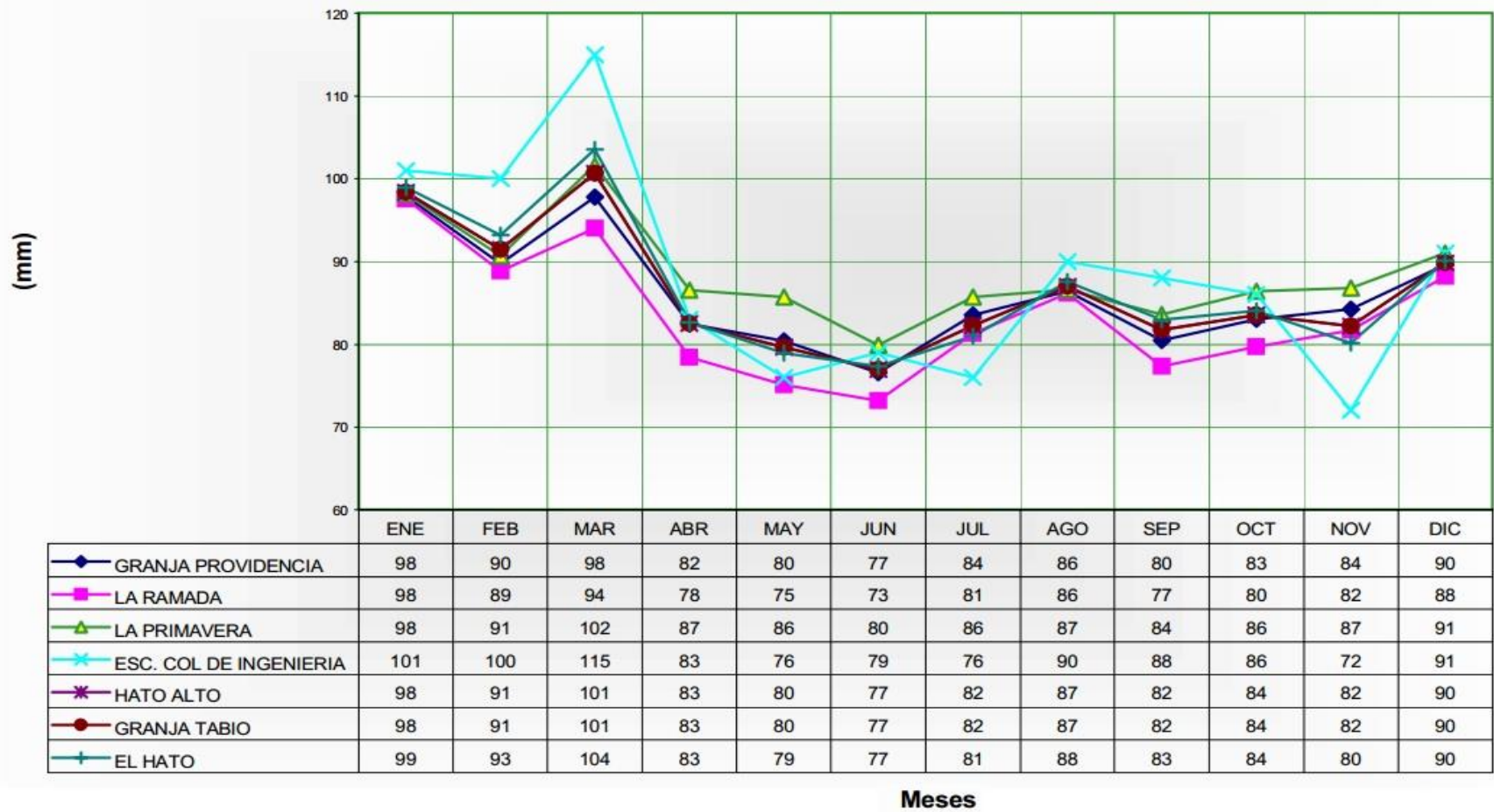


Figura 19. Distribución de la evaporación (POT Tenjo, 2012)



3.4.5 Evapotranspiración Potencial

En lo que corresponde a la zona de análisis, Occidente de la Sabana de Bogotá, las variaciones que se presentan en cuanto a la evapotranspiración, no varía de gran forma y se relacionan valores de entre 33 y 39mm mensuales, como se puede observar en la figura 20, realizado por la metodología Penman y Turc, y de los cuales se obtienen los Balances hídricos.

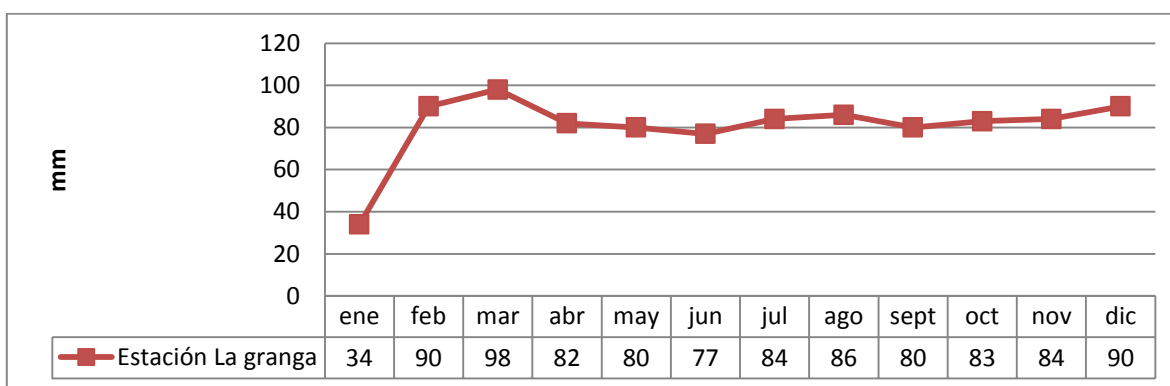


Figura 20. Distribución anual de la evapotranspiración potencial (POT Tenjo, 2012)

3.4.6. Balances Hídricos Climáticos

En general todo lo que corresponde a la zona que encierra el Occidente de la Sabana de Bogotá está bajo una condición de recarga y déficit de humedad que varía durante todo el año, como se observa en la figura 22.

Las condiciones de recarga se presentan sectorizadas, debido a esto se ve la distribución de los cultivos, ya que algunos demandan más agua que otros.²²

²² POT del Municipio de Tenjo, Aspecto Biofísico, 2012



3.4.7 Características Hidrográficas

El río que alimenta esta zona en su gran mayoría es el río Chicú, cuyo nacimiento es en el municipio de Tabio, este recibe al río Frío, que a su vez lo conforman las quebradas de Honda, Santa Librada y Cuzá, que después de atravesar el municipio de Tenjo y de alimentar a la ciénaga de Cúbita, finaliza en el río Bogotá.

El Chicú afronta muchos problemas de cauce y de contaminación, debido a los cultivos que se encuentra ubicados en su ladera, los cuales realizan captaciones que afectan el caudal de gran forma, al igual que el uso de fertilizantes que se infiltran y llegan a sus aguas. Las labores de ganadería de la zona también alteran la composición química del río.²³

3.5 Vegetación, Especies Vegetales y Uso del Suelo

3.5.1 Vegetación y especies vegetales

En el sector predomina el bosque secundario, en donde se ubican especies arbóreas, que tienen un alto consumo de agua y hace que el proceso de desecación se presente más notoriamente.

En esta zona no se encuentran bosques primarios, que corresponden a los bosques nativos, por el contrario quedan algunos rastros de bosques secundarios muy intervenidos, en donde se han mantenido gracias a las reforestación parcial que se ha venido presentando para la protección de los suelos y los recursos hídricos.

Se han usado los bosques implantados, que están conformados de especies exóticas, cercas vivas ubicadas en las zonas planas generalmente de *Eucalyptus globulus*, y en la parte alta se ubican plantaciones de *Pinus patula* y *Pinus radiata* de edades inferiores a 15 años (P.O.T Tenjo 2011)

²³ POT Municipio de Tenjo, Aspecto Biofísico, 2012



3.6 Extracción de aguas subterráneas

En la zona del Occidente de la Sabana de Bogotá, se encuentra una gran reserva de agua subterránea, que se ha intentado preservar para el mismo mantenimiento y funcionamiento del sector productivo de la región. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), ha venido realizando estudios para analizar las riquezas hidrológicas de la zona y obtener la mayor cantidad de información que permita la conservación de estas.²⁴

El Occidente de Bogotá posee nueve subcuencas hidrogeológicas enumeradas de la siguiente forma:

1. Subcuenca del Sisga
2. Subcuenca del Tominé
3. Subcuenca del Teusacá
4. Subcuenca del Neusa
5. Subcuenca de Fontibón
6. Subcuenca del Chicú
7. Subcuenca del Subachoque
8. Subcuenca del Balsillas
9. Subcuenca del Tunjuelito

De esta forma está bien definido el sector que afecta cada una de estas subcuencas.

Como se había mencionado anteriormente, el Río Chicú es el encargado, principalmente del abastecimiento de aguas de la zona de estudio, así que se dará una descripción a grandes rasgos de esta región.

²⁴ Plan de Manejo Ambiental de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica, (2008).



3.6.1 Subcuenca hidrográfica del Río Chicú

Dentro de la clasificación realizada por la CAR, la subcuenca hidrogeológica perteneciente al río Chicú, presenta una prioridad de nivel 1, la más alta, y posee una superficie de 147.93 Km^2 , en esta zona están ubicados 47 pozos, de los cuales 26 tienen medición de caudal lo que representa un 55.3% del caudal promedio que es 23.18 lt/seg.

Según el análisis de isopiécico realizado por la CAR, a cada una de las subcuencas anteriormente enumeradas, en lo que corresponde al Río Chicú arrojó los siguientes resultados:

- Los niveles piezométricos se encuentran entre 2.560 y 2.530msnm.
- El agua subterránea tiene un movimiento NE-SO, según guíe la topografía, dejando así evidencia del gran aprovechamiento de agua y el uso excesivo de del recurso.
- Con respecto a estudios realizados anteriormente por la misma entidad (CAR), se muestra una disminución bastante importante en el nivel freático, ya que en los primeros resultados que arrojó en el 2001 y 2000 este se encontraba aproximadamente 20 metros más superficial que el que el nivel que se encuentra actualmente (PAM Sabana de Bogotá y Zona crítica 2009).

3.6.2 Demanda de agua subterránea para el municipio de Tenjo

El municipio de Tenjo actualmente posee la concesión de explotación de 7 pozos, 3 destinados al abastecimiento de veredas y otros 4 correspondientes al Acueducto Municipal, esto representa aproximadamente un volumen de agua de $1'262.387 \text{ m}^3$.



3.6.3 Situación actual del agua subterránea al Occidente de la Sabana de Bogotá

Lo que corresponde a la zona de estudio de este proyecto, ha tenido diversos factores de alteración, en los que principalmente se reconocen el asentamiento vial de las industrias, la construcción de pozos profundos SIN autorización debida por la CAR, abastecimiento de estructuras aisladas como tanques elevados de viviendas y la irrigación de cultivos altamente demandantes de agua, han permitido el descenso del nivel de agua subterránea que posteriormente se ve reflejado en la disminución notoria de los caudales de las quebradas y los remansos de agua que se encuentran en este sector.

3.7 Cultivos

El desarrollo económico de la zona correspondiente al Occidente de la Sabana de Bogotá, está altamente ligado a la producción agropecuaria, que a su vez está totalmente relacionada con el exceso de consumo de recursos hídricos, así que es un factor determinante en el desarrollo de este proyecto.

En primer lugar hay que tener en cuenta los cultivos permanentes y los transitorios que se encuentran en el sector, como se puede apreciar en la figura 21.

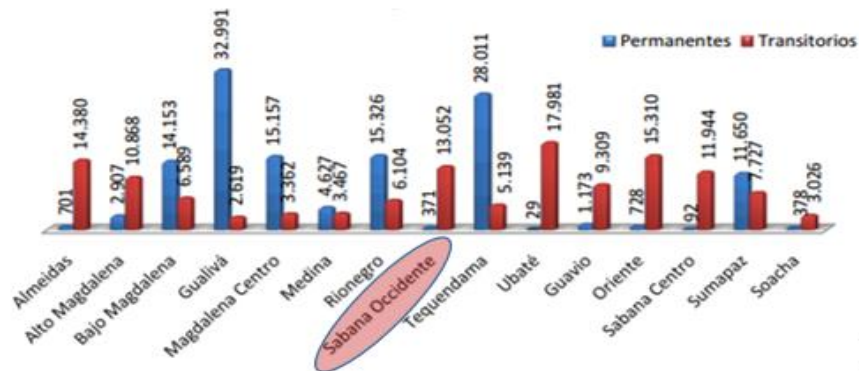


Figura 21: Áreas cosechadas en las provincias de Sabana de Bogotá, Planes de Competitividad en cuatro provincias de Cundinamarca.



Teniendo en cuenta la situación de balance hídrico que posee esta zona del Occidente de la Sabana de Bogotá, en donde los déficit de humedad que se presentan a lo largo del año, afectan la situación de saturación del suelo, se hace necesaria la descripción de los cultivos permanentes y transitorios, al igual que los meses en que se da esta situación, para ver que tanto aportan estos a la desecación de los suelos del área de estudio.

3.8. Análisis de Contexto

Teniendo en cuenta que en la zona occidental de la Sabana de Bogotá se encuentra ubicado uno de los principales corredores comerciales e industriales y que a su vez, los municipios cercanos a la zona poseen grandes movimientos agrónomos, la problemática de la desecación de los suelos afecta de sobremanera el desarrollo de estas actividades económicas, ya que se presentan patologías en las estructuras de pavimento flexible y disminuye la calidad del servicio que se presenta en la vía, tanto en funcionalidad, como en seguridad y comodidad. Para exponer mejor esto, a continuación, se hará una descripción de los aspectos más relevantes de la zona.

- El tipo de material encontrado en la zona, corresponde a arcillas lacustres de gran espesor que se ven afectadas por procesos de desecación en sus partes más superficiales, la composición de las arcillas en su mayoría son montmorillonita, illita y caolinita, que son minerales arcillosos que pueden reaccionar con la humedad y debido a los niveles variables de humedad se presentan momentos de saturación y otros de desecación.
- Al ser esta una zona apta para la industria, se ha notado un incremento considerable de empresas que se han desplazado al sector, lo que hace que los suelos tengan un esfuerzo mucho mayor y esto se vea reflejado en la pérdida de funcionalidad de las vías y patologías en las diferentes estructuras de la zona. Además, la ampliación de las zonas de cultivo hacen que los desequilibrios hídricos se incrementen y los procesos de



deseccación se vuelvan más marcados, debido al consumo de agua es mayor.

- Al comparar la precipitación con la evaporación se obtiene la siguiente figura 27:

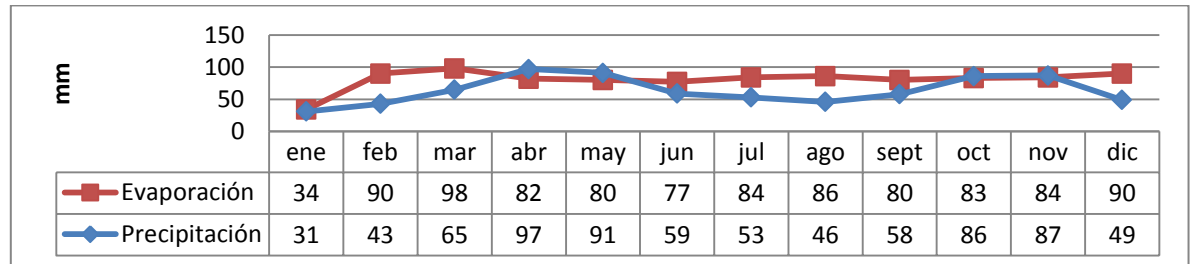


Figura 22: Comparación entre evaporación y la precipitación a lo largo del año

En la figura 22, se puede observar que la evaporación es mayor a la precipitación, lo que hace que el suelo tenga un pérdida continua de humedad y la recarga sea difícil de lograr, esto produce la desecación.

- En la zona se encuentran ubicados diferentes pozos de agua subterránea, que vienen siendo explotados, haciendo que la recarga de los suelos sea más difícil. En la figura 23, se muestra la distribución de algunos pozos de agua subterránea

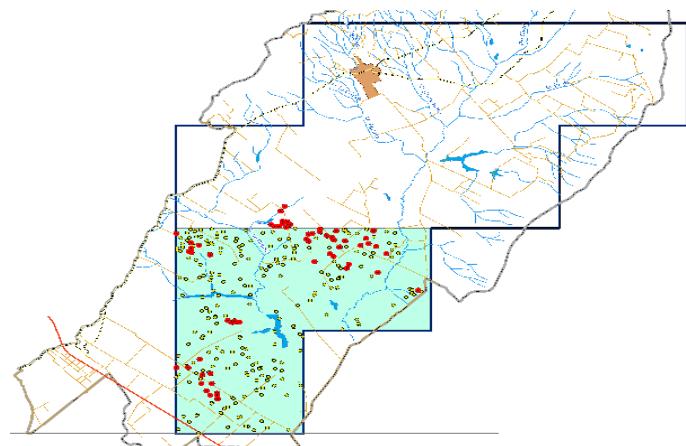


Figura 23: ubicación de pozos en Tenjo Cundinamarca (Elementos de gestión para un desarrollo sostenible, 2008)



Todos estos factores hacen que los suelos de la zona sufran alteraciones de humedad que afectan su funcionalidad y hacen que se presenten diferentes patologías y fallas en estos.

3.9 Síntesis del Capítulo

En este capítulo se recopiló de manera general, las condiciones físicas, morfológicas, hidrográficas, agropecuarias, entre otras, que hacen parte determinante de la zona de estudio, correspondiente a la Zona Occidental de la Sabana de Bogotá.

En cuanto a las condiciones ambientales, se abordó la climatología que es fundamental en la determinación de los niveles freáticos que juegan un papel muy importante en este estudio.

Los asentamientos industriales han trazado el desarrollo económico de la zona, ya que gracias a estos se deben implementar vías de comunicación mucho más seguras y con condiciones más adecuadas a las exigencias de estos, en este punto se toma en cuenta que estas mejoras están pendientes de hacer, ya que la zona no estaba proyectada a un desarrollo de tal nivel, como sucedió por ejemplo con el corredor industrial de la calle 13.

El uso excesivo e indiscriminado de los recursos hídricos, han creado diferentes condiciones de disminución de las corrientes hidráulicas que han venido reduciendo los caudales a medida que continúan estas prácticas irregulares.



4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS Y DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS

4.1 Reconocimiento de la zona de estudio

El criterio utilizado para la selección de las zonas en donde se realizaron los sondeos corresponde a lo siguiente:

- Sondeo 1: Lugar que presente daños en la carpeta asfáltica y poca vegetación cerca, representados en la figura 24, en donde se observa una piel de cocodrilo sobre la carpeta asfáltica, así como múltiples fisuras y ondulamientos que hacen que la vía pierda funcionalidad.



Figura 24: Patologías en la carpeta asfáltica, Piel de Cocodrilo, sondeo 1

- Sondeo 2: Lugar que presente daños en la carpeta asfáltica y tenga cercas vivas cercanas, en la figura 25 se observa la barrera viva y el ondulamiento que se presenta paralela a esta.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ



Figura 25: Patología en la carpeta asfáltica, ondulaciones y piel de cocodrilo, sondeo 2

En la figura 31 se tiene una ubicación general de la vía en donde se realizaron los sondeos, mientras que en la figura 26 se muestra la localización de los sondeos:

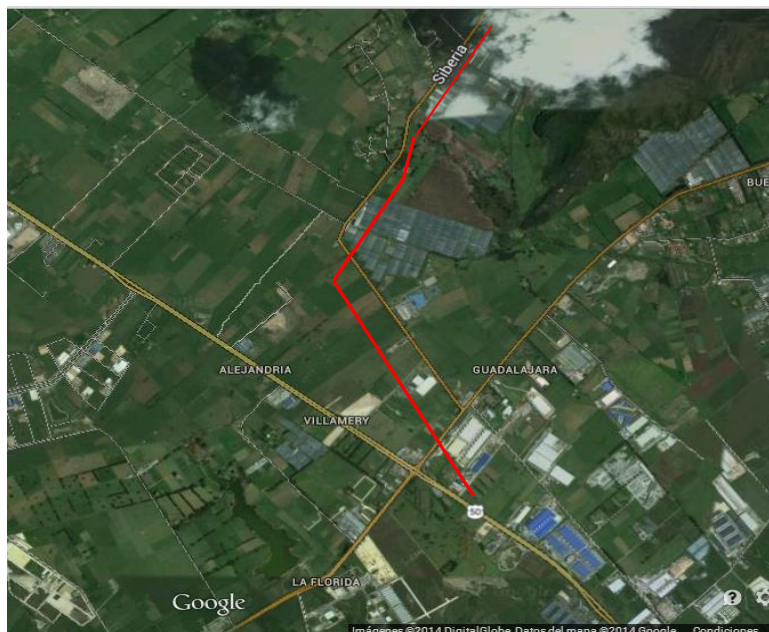


Figura 26: Ubicación general de la zona (Google earth)



Figura 27: Ubicación específica de los sondeos (Google earth)

En el recorrido inicial realizado el 3 de agosto de 2013, se tomaron 6 posibles puntos, a lo largo de la vía Bogotá- Tenjo, en donde se podría realizar la extracción de las muestras, en donde el más apropiado fue el 6 ubicado en el km 11.3, teniendo como punto cero la bomba de gasolina ubicada en la entrada de Tenjo, a una latitud aproximada de $4^{\circ} 46' 47''$, y una longitud de $-74^{\circ}9'33''$.

En este punto se tomaron los dos sondeos, uno a cada lado de la vía, teniendo en cuenta que el lugar cumplía con los criterios de selección marcados, como se puede observar en la figura 27.



Figura 27: Zona de Sondeos

4.2 Extracción de muestras

La ejecución del muestreo, se llevó a cabo desde el 7 hasta el 16 de Noviembre de 2013. En la zona de estudio se presentó bastante precipitación, lo que en un principio dificultó las labores de sondeo, problemas que se solucionaron en el segundo sondeo.

Del sondeo 1 se obtuvieron 31 muestras, de las cuales 15 son inalteradas y 16 alteradas, como se observa en la tabla 2.

Las convenciones a usar son las siguientes, según el método de extracción de la muestra.

- SS: Spin- Spun
- SH: SPT

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



Tabla 2: Muestras obtenidas Sondeo 1

SONDEO 1			
PROF.	MUES	DESCRIPCIÓN	TIP
0- 0.50	1	Material limoso, con algo de material granular y materia orgánica	SS
0.50- 1.00	2	Limo y arcilla poco consolidada	SS
1.00-1.50	3	Limo con arena, presenta oxidaciones	SH
1.50-2.00	4	Arcilla gris con oxidaciones, humedad alta, consistencia baja y plasticidad alta	SS
2.50-3.00	6	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
3.00 - 3.50	7	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
3.50 - 4.00	8	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
4.00 - 4.50	9	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
4.50 - 5.00	10	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
5.00 - 5.50	11	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
5.50 - 6.00	12	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
6.00 - 6.50	13	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
6.50 - 7.00	14	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
7.50 - 8.00	15	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
8.00 - 8.50	16	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
9.00 - 9.50	17	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
9.50 - 10	18	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
10.50 -11	19	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
11 - 11.50	20	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
12 - 12.50	21	Limo con arcilla gris oscura con pocos lentes de granos finos de arena	SH
12.50 - 13	22	Limo con arcilla gris oscura con pocos lentes de granos finos de arena	SS
13.50 - 14	23	Arcilla con algo de limo, humedad alta consistencia, baja y plasticidad alta	SH
14. - 14.50	24	Arcilla con algo de limo, humedad alta consistencia, baja y plasticidad alta	SS
15 -15.50	25	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
15.50 -16	26	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
17 - 17.50	27	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
17.50 - 18	28	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
18 -18.50	29	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH
18.50 - 19	30	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SS
19.50-20	31	Arcilla gris limosa humedad alta consistencia blanda y plasticidad alta	SH

Del sondeo 2 se obtuvieron 24 muestras, de las cuales 9 son inalteradas y 15 alteradas, se muestran en la tabla 4.

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



Tabla 3: Muestras obtenidas Sondeo 2

SONDEO 2			
PROF.	MUE	DESCRIPCIÓN	TIP
0- 0.50	1	Limo arcilloso muy negro, de humedad media, blanda consistencia y baja plasticidad.	Bolsa
0.50- 1.00	2	Limo arcilloso muy negro, de humedad media, blanda consistencia y baja plasticidad.	Bolsa
1.00-1.50	3	Limo arcilloso muy negro, de humedad media, blanda consistencia y baja plasticidad.	Bolsa
1.50-2.00	4	Arcilloso gris con oxidaciones claro, presencia de raíces, alta humedad y alta plasticidad	Helic.
2.00-2.50	5	Suelo arcillo limoso con presencia de oxidación y de raíces. Material de baja humedad, baja plasticidad y de consistencia media	SH
2.50-3.00	6	Limo arcilloso gris con alta presencia de oxidación y de raíces. Humedad baja, plasticidad baja y consistencia media	SS
3.00 - 3.50	7	Limo arcilloso gris con alta presencia de oxidación y de raíces. Humedad baja, plasticidad baja y consistencia media	SS
3.50 - 4.00	8	Limo arcilloso gris con alta presencia de oxidación y de raíces. Humedad media, plasticidad baja y consistencia media-baja	SS
4.00 - 4.50	9	Arcilla gris clara con poca oxidación y sin presencia de raíces. Humedad media, plasticidad media y consistencia media.	SH
4.50 - 5.00	10	Arcilloso gris claro con poca y sin presencia de raíces. Humedad media, plasticidad baja y consistencia media-blanda	SS
6.00 - 6.50	11	Arcilla gris clara sin oxidación y sin presencia de raíces. Humedad media, plasticidad media y consistencia media	SH
6.50 - 7.00	12	Arcillas grises claras sin oxidación y sin raíces. Humedad media, plasticidad baja y consistencia media-blanda	SS
8.00 - 8.50	13	Arcilla gris algo limosa, humedad alta, consistencia blanda, plasticidad alta	SH
8.50 – 9	14	Arcilla gris algo limosa, humedad alta, consistencia blanda, plasticidad alta	SS
10- 10.50	15	Arcilla gris algo limosa, humedad alta, consistencia blanda, plasticidad alta	SH
10.50 – 11	16	Arcilla gris algo limosa, humedad alta, consistencia blanda, plasticidad alta	SS
12 - 12.50	17	Arcilla gris algo limosa, humedad alta, consistencia blanda, plasticidad alta (No recobró)	SH
12.50 – 13	18	Arcilla gris con humedad alta, plasticidad alta y consistencia blanda	SS
14 – 14.50	19	Arcilla gris clara. Humedad media, plasticidad media y consistencia media.	SH
14.50 – 15	20	Arcilloso gris. Humedad media, plasticidad media y consistencia media	SS
16 - 16.50	21	No recobró	SH
16.50- 17	22	Arcilloso gris. Humedad media, plasticidad media y consistencia media	SS
18 - 18.50	23	Arcilla gris clara. Humedad media, plasticidad media y consistencia media	SH
18.50 – 19	24	Arcilloso gris. Humedad media, plasticidad media y consistencia media	SS



Las muestras inalteradas fueron usadas en los ensayos de caracterización mecánica y de resistencia y rigidez.

Las alteradas fueron usadas para realizar los ensayos de caracterización composicional como límites, azul de metileno, pesos específicos, gravedades específicas, contenidos de materia orgánica e hidrometrías.

4.2.1 Ensayo SPT

El ensayo de Penetración Estándar (SPT), es el método in situ más usado para conocer las propiedades de resistencia del suelo en donde se realice. Una vez tomado el número de golpes que se obtiene en cada ensayo, se deben hacer diferentes correcciones como lo son:

- Corrección por energía (h1)

Ecuación N. 5 Correlación SPT por energía

$$N_{e1} = N_{e2} \times (e2/e1)$$

- Corrección por Confinamiento (Cn)

Ecuación N. 6 Correlación SPT por Confinamiento

$$N_{corr} = N1 = Cn \times N$$

En la figura 28, se muestra la corrección por confinamiento usando diferentes métodos, sin embargo el principal a tratar es el de Skempton, ya que todos los Coeficientes de confinamiento (Cn) son menores a 2 y este es el que mejor se ajusta.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

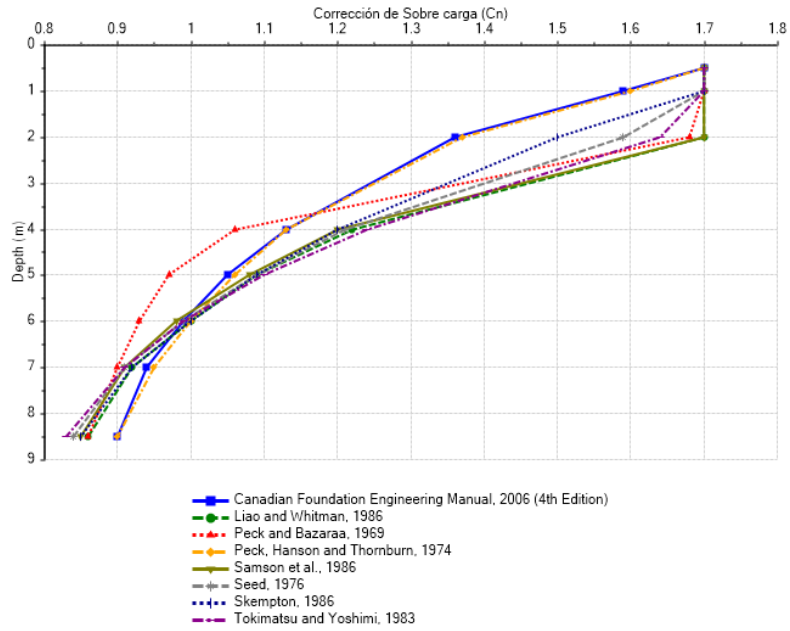


Figura 28: Cn vs Profundidad por diferentes métodos. (Sondeo 1), programa Novo SPT

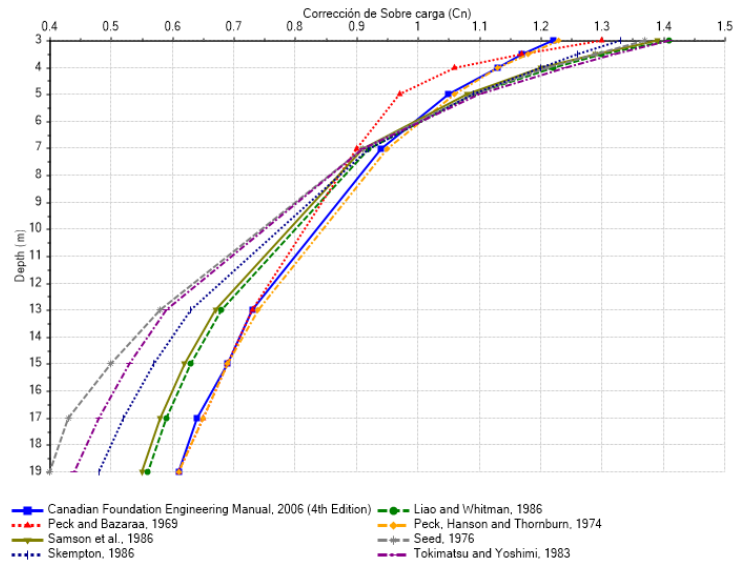


Figura 29: Cn vs Profundidad por diferentes métodos. (Sondeo 2), programa Novo SPT



En la siguiente figura se muestra el número de golpes versus la profundidad (izquierda), junto con el valor corregido por confinamiento versus profundidad (derecha).

A la derecha se pueden observar las tres líneas, la verde muestra los datos obtenidos in situ, la roja muestra un SPT afectado por N60, que corresponde a $N \cdot C \cdot C_s \cdot C_r \cdot C_b$ y finalmente en la línea amarilla el $N_1 = N60 \cdot C_n$, en donde la corrección por confinamiento también se ve reflejada.

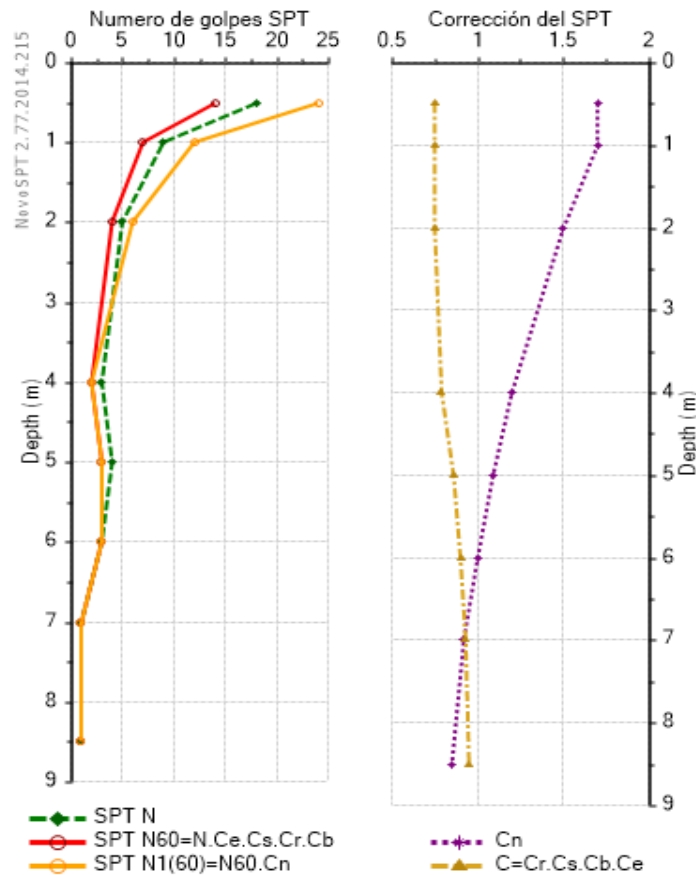


Figura 30: Corrección del SPT (Sondeo 1), Programa Novo SPT



En la figura 30, se muestra el resultado del ensayo SPT para el sondeo 1 y se obtiene que hacia lo más superficial el suelo es más duro ya que presenta problemas de pérdida continua de humedad, esta característica va descendiendo hasta que a los 8,5 metros de profundidad ya no se registra número de golpes y el suelo es totalmente blando, es de recordar que este sondeo se realizó alejado de la zona de barreras vegetales, lo que hace que la humedad de esta zona sea un poco más elevada que la que se obtiene en sondeo 2, como se muestra a continuación.

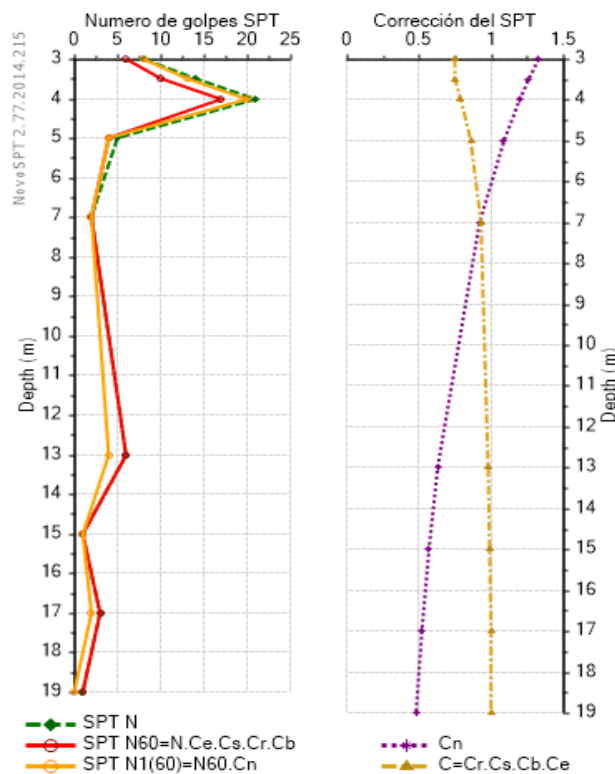


Figura 31: Corrección del SPT (Sondeo 2), Programa Novo SPT

En la figura 31, se observa que en los primeros 3 metros, no se obtuvieron resultados ya que el suelo poseía una humedad alta, entre los 3 y 4 metros, el número de golpes aumento de 5 golpes a 20 aproximadamente y empezó un



descenso considerable hasta los 19 metros manteniéndose en un rango de 1 a 7 golpes hasta que el suelo se vuelve lo suficiente mente blando.

Este sondeo se realizó en un lugar cercano a una zona vegetal, lo que puede explicar los cambios en la humedad de este terreno, ya que los árboles absorben el agua y una cada vez van abriendo paso para seguir consumiéndola.

En el Anexo 3 se tienen los registros de perforación tanto dados por la empresa que realizó los sondeos, como los que se sacaron en campo con los respectivos registros fotográficos.

Otras correlaciones

Por medio de los ensayos in situ SPT que se realizaron y utilizando herramientas sistemáticas, como el Novo SPT en este caso, se pueden realizar diferentes correlaciones que se comprobaron con los estudios que se realizaron más adelante.

Ángulo de fricción s

Para el sondeo 1 y utilizando el método de Meyerhof, la figura 37 muestra que a medida que la profundidad va aumentando el ángulo de fricción va disminuyendo, excepto entre 4 y 6 metros, que se observa que pasa de un ángulo de 31,4 a los 4 metros a un ángulo de 31,9 a los 5 metros y retomando los 31,5 a los 6 metros, para continuar disminuyendo. Esto indica que en el sondeo 1 hay un estrato entre 4 y 5 metros en donde la fricción de las partículas que conforman el suelo aumenta haciendo que sea un poco más duro que el suelo que se tiene superior inferiormente, en esta condición tiene mucho que ver la poca presencia vegetal, teniendo en cuenta que el sondeo fue realizado alejado de las cercas vivas de la vía.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

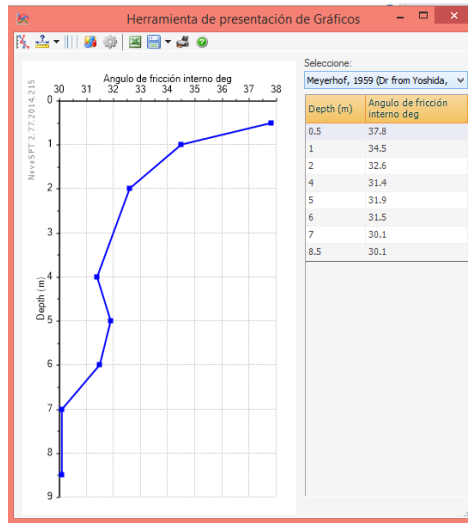


Figura 32: Ángulo de fricción (Sondeo 1), Programa Novo SPT

Este caso no se presenta en el sondeo 2, como muestra la figura 32 y teniendo en cuenta la cercanía que tiene este sondeo con las cercas vivas, el ángulo de fricción a medida que la profundidad aumenta varía radicalmente, esto indica que en esta zona los procesos de desecación se presentan en diferentes estratos de suelos. Por ejemplo, se puede observar que en la parte más superficial el ángulo de fricción empieza a aumentar hasta los 4 metros y después empieza a disminuir hasta los 7 metros en donde vuelve a aumentar hasta los 13 metros. Esta variación es bastante significativa para la dureza del suelo.

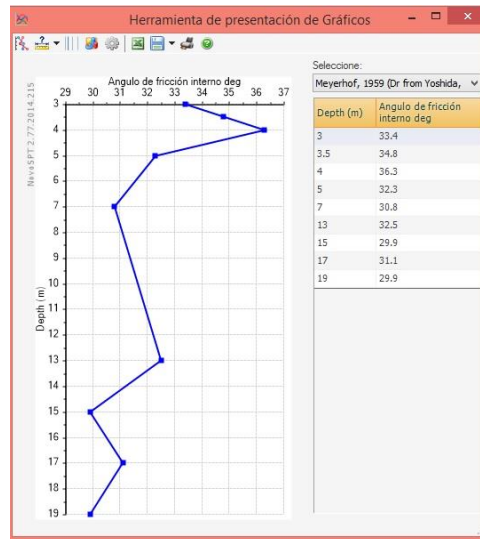


Figura 33: Ángulo de fricción (Sondeo 2), Programa Novo SPT

4.2.2 Módulo Young del suelo (E)

El módulo young muestra la capacidad del suelo para recuperarse después de soportar presiones axiales, en la figura 34, se observa que en el sondeo 1 en la parte superficial se muestra un módulo más elevado y empieza a disminuir a medida que la profundidad también crece.

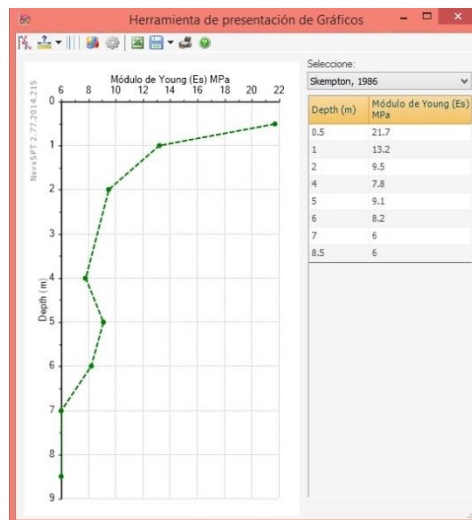


Figura 34: Módulo de elasticidad, sondeo 1, programa Novo SPT



Por otro lado, en el sondeo 2, figura 35, las variaciones que se venían viendo tanto en el coeficiente de confinamiento como en el ángulo de fricción, se mantienen en el módulo de elasticidad, en donde en los primeros 4 metros se presenta un aumento hasta los 5 metros y después empieza una disminución hasta los 7 que vuelve a subir a los 13 metros. Esto muestra una inestabilidad en los estratos del suelo en cuanto a las presiones que pueda soportar el suelo, esto se puede deber al déficit de humedad que se presentan en cada estrato de suelo.

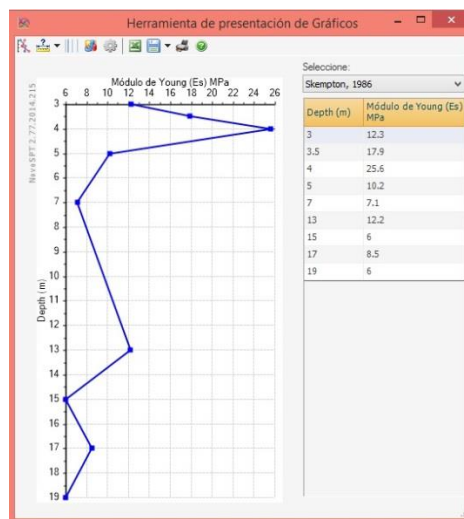


Figura 35: Módulo de Young, S2, Programa Novo SPT

4.2.3 Apique 1

El primer apique realizado tiene lugar muy cerca a los árboles, debido a esto se observan diferentes características de desecación y fisuración a causa de las raíces, esto se observa en la figura 36.



Figura 36: Apique Número 1

Se encuentra a 1.90m la arcilla oxidada, alta dureza, con raíces que perforan el suelo haciendo puntos que a la vez oxidan el suelo a una profundidad de 2,30 m, se encuentra una arcilla totalmente desecada y fisurada, debido a su cercanía o proximidad a los pinos (arboles), esto se puede observar en la figura 37, a la derecha se tiene la arcilla con oxidaciones, y a la izquierda una arcilla limosa con contenido orgánico.



Figura 37: Arcillas desecadas

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en campo, con la medición de resistencia con veleta.

Tabla 4: Resistencias en campo por Veleta

SONDEO 1		SONDEO 2	
cota inicial	Descripción (KPa)	cota inicial	descripción
2.00-2.50	veleta 65-10	5.00 - 5.50	veleta 25 - 10
	veleta 20 – 25		Veleta 35 -10
	veleta 20 – 25		Veleta 35 -10
7.00 - 7.50	veleta - sin dato	5.50 - 6.00	Veleta 40 -15
	veleta 25 – 10	7.00 - 7.50	veleta 20 - 10
8.50 - 9.00	veleta 25 – 10	9.00 - 9.25	veleta 20 - 10
10.00 - 10.50	veleta 25 – 10	9.25 - 9.50	veleta 25 - 10
	veleta 35 – 10	9.50 - 9.75	veleta 35 - 10
11.50 - 12.00	veleta 40 – 10	9.75 - 10.00	veleta 30 - 10
	veleta 50 – 10	11.00 - 11.25	veleta 30 - 15
13.00 - 13.50	Veleta 45 -15	11.25 - 11.50	veleta 35 – 15
	veleta 45 -12	11.50 - 11.75	veleta 40 - 10
14.50 - 15.00	veleta 45-10	11.75 - 12.00	veleta 40 - 15
	Veleta 45 -10	13.00 -13.50	veleta 50 -20
16.00 - 16.50	Veleta 55 – 16		veleta 55 -25
16.50- 17.00	Veleta 55 – 16	13.50 - 14.00	veleta 60 -25
19.00 -19.50	veleta 25 -20		veleta 55 -25
		15.00 -15.50	Veleta 30 -15
		15.00 -15.50	veleta 35 -15
		15.50 -16.00	Veleta 40 -15
		16.00 - 16.50	No recobró
		17.00 - 17.50	Veleta 30 -15
			Veleta 35 -15
		17.50 - 18.00	Veleta 40 -20
			Veleta 40 -20
		19.00 -19.50	Veleta 40 -15
			Veleta 35 -15
		19.50 -20	Veleta 50 -15
			Veleta 45 -15



Se decide tomar muestras CBR de 2,00 a 2,30 m (30 cms)



Figura 38: Muestra de CBR

Apique 2

Se procede a realizar el segundo apique al lado del poste a 1m de la vía, la arcilla de encuentra a una profundidad de 1,15m, presenta condiciones de humedad más altas, por lo que se observa que la ubicación de los Pinos a una distancia mucho más amplia y hay menos absorción de agua por parte de las raíces, se toma un perfil estratigráfico del apique realizado como se observa en la figura 39.


Estrato	Material
	Relleno (10 cm)
	Limo grisáceo (40 cm)
	Arcilla Orgánica y con oxidaciones (50cm)
	Limo grisáceo (50cm)

Figura 39: perfil del apique



4.3 Síntesis del capítulo

En este capítulo se realizó una descripción del material encontrado en los 2 sondeos y en los dos apiques, teniendo en cuenta que cada sondeo tiene una profundidad de 20 metros, en los que se encontraron arcillas grises con oxidaciones en las capas más superficiales, con contenidos altos de humedad y plasticidad por encima de lo normal en una arcilla. También se hace la correlación con el programa Novo SPT, del ensayo de penetración realizado con los parámetros de ángulo de fricción y el módulo de Young, los cuales se comprobarán en el siguiente capítulo con los ensayos de comportamiento mecánico (compresiones, consolidaciones, entre otros.)

En cuanto a los 2 apiques, se encontraron estratos de arcillas oxidadas y en las primeras capas se encuentra una desecación total en presencia de raíces de árboles que no son originarios de la zona.



5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS

En este capítulo se hará una breve descripción de los ensayos ejecutados, junto con la norma que los soporta y la forma en que se desarrollaron a lo largo de la etapa de laboratorios.

5.1. Ensayos enfocados a la caracterización básica para propósitos de ingeniería de los materiales

Para determinar la composición del suelo de la zona, se realizaron los siguientes ensayos:

ENSAYO	NORMA	No DE ENSAYOS	
		SONDEO 1	SONDEO 2
HUMEDAD NATURAL	INVIAS E-132-07	16	15
LIMITE LIQUIDO	INVIAS E-125-07	14	12
LIMITE PLASTICO	INVIAS E-126-07	14	12
LIMITE DE CONTRACCION	INVIAS E-127-07	14	12
HIDROMETRIA	INVIAS E-124-07	14	12
AZUL DE METILENO	INVIAS E-235-07	16	15
GRAVEDAD ESPECIFICA	INVIAS E-128-07	16	15
CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA	INVIAS E-212-07	16	15
COPRESIONES INCONFINADAS	INVIAS E-152-07	4	4
CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL	INVIAS E-151-07	5	3

5.2 Síntesis del capítulo

A lo largo de este capítulo se describieron los objetos y la norma de la cual se obtienen los procesos desarrollados durante el análisis de las muestras. Basando todos los trabajos en la norma INVIAS para hacer más unificados los resultados y los métodos de análisis.



6 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

6.1 Generalidades

En este capítulo se describirán algunas de las propiedades obtenidas tanto en las pruebas de laboratorio como en su posterior análisis, para lo cual se aplicaron diferentes fórmulas y tablas en las que se describen ciertas propiedades para suelos arcillosos y parcialmente saturados.

6.2 Humedades

La zona en la que se realizó la extracción de las muestras para el análisis, pertenecen a un tipo de suelo arcilloso con problemas de desecación, por lo tanto la humedad que poseen dichas muestras presentan diferencias significativas que se encuentran registradas en la tabla 5.

HUMEDAD SONDEO 1					HUMEDAD SONDEO 2				
Mues	prof (m)	Wn (%)	Wn (%)	Wn (%) prom	Mues	prof (m)	Wn (%)	Wn (%)	Wn (%) prom
s1-1	0,50	10,52		10,52	s2-1	0,50	50,39	48,38	49,39
s1-2	1,00	48,16		48,16	s2-2	1,00	47,56	43,35	45,45
s1-4	2,00	73,45	77,38	75,41	s2-3	1,50	75,94	73,86	74,90
s1-6	3,00	90,01	92,96	91,49	s2-4	2,00	44,42	47,11	45,76
s1-8	4,00	105,96	102,48	104,22	s2-6	3,00	54,25	58,71	56,48
s1-10	5,00	108,13	90,63	99,38	s2-7	3,50	49,42	62,03	55,72
s1-12	6,00	139,32	105,55	122,43	s2-8	4,00	115,66	57,09	86,37
s1-14	7,00	141,70	117,23	129,47	s2-10	5,00	92,29	60,66	76,48
s1-16	8,50	110,14	126,02	118,08	s2-12	7,00	96,60	125,38	110,99
s1-18	10,00	104,25	111,46	107,85	s2-14	9,00	115,99	135,93	125,96
s1-20	11,50	115,56	127,71	121,64	s2-16	11,00	109,46	115,49	112,47
s1-22	13,00	201,15	212,04	206,59	s2-18	13,00	119,50	135,81	127,66
s1-24	14,50	127,70	113,23	120,46	s2-20	15,00	102,23	131,72	116,97
s1-26	16,00	206,08	93,68	149,88	s2-22	17,00	115,92	116,47	116,19
s1-28	17,50	115,64	117,69	116,67	s2-24	19,00	132,33	136,36	134,35
s1-30	19,00	133,58	123,52	128,55					



De la tabla 5 se obtienen dos columnas resaltadas, la verde corresponde a la humedad promedio obtenida del sondeo 1, teniendo en cuenta que la ubicación de este sondeo no contaba con vegetación foránea cercana lo que produce que las humedades sean más equitativas que las del sondeo 2, que en el cuadro se resalta en rojo, ya que la población arbórea de este sondeo se encuentra más cercana y hace que las humedades varíen en sus proporciones notablemente.

La humedad que se encuentra en un suelo arcilloso es muy elevada, debido a la gran capacidad que tienen de absorber el agua del medio y la tendencia a retenerla en su interior. En la figura 46 se representan los datos porcentuales de humedad de los dos sondeos, la línea verde corresponde al sondeo 1 y la rosada al sondeo 2.

Como se había dicho anteriormente, las condiciones que se presentan en los dos suelos son muy opuestas, ya que en el primero se tiene poca presencia vegetal, por eso los contenidos de agua pueden ser muy variables, cosa que no ocurre en el segundo, que el contenido de humedad se ve más lineal debido al consumo de agua que tienen permanentemente los árboles foráneos de la zona.

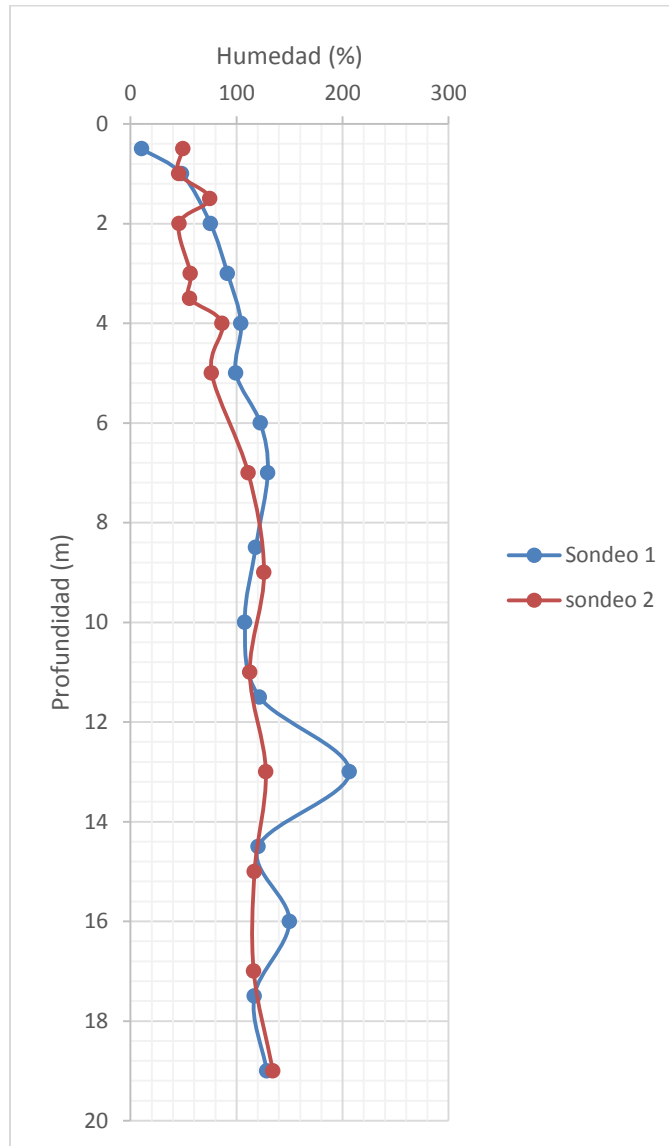


Figura 40: humedades sondeo 1 y 2

6.3 Estados de Consistencia

Como se trató en el capítulo 1 de este documento, los límites de consistencia corresponden a las mediciones de límites líquidos, límites plásticos, límites de contracción, y por último se determinan los valores de los índices de plasticidad y de liquidez, estos se muestran en las tablas 6 y 7.



Tabla 6: límites de Atterberg, sondeo 1

Sondeo 1 – Límites de Atterberg							
No Muestra	Prof. (m)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IL (%)
5	2	73,00	116,95	56,00	39,00	61,00	22,00
9	4	106,00	171,44	57,00	33,00	115,00	-15,00
11	5	108,00	149,64	50,00	25,00	99,00	18,00
13	6	139,00	180,08	77,00	35,00	103,00	47,00
14	7	142,00	176,53	95,00	28,00	82,00	63,00
16	8	110,00	160,17	55,00	32,00	105,00	9,00
19	10	104,00	131,46	47,00	28,00	84,00	42,00
20	11	116,00	172,11	82,00	28,00	90,00	31,00
22	13	201,00		116,00			
24	14	128,00	143,55	76,00	33,00	67,00	79,00
26	16	206,00	95,39	56,00		40,00	
27	17	116,00	134,49	111,00	28,00	24,00	83,00
30	19	134,00	155,71	54,00	17,00	102,00	59,00

Tabla 7: límites de Atterberg sondeo 2

Sondeo 2 – Límites de Atterberg							
No Muestra	Profundidad (m)	Wn	LL	LP	LC	LP	IL
5	2	44,00	80,00	58,00	29,00	22,00	39,00
7	3	54,00	101,00	52,00	31,00	48,00	11,00
7	3	49,00	115,00	57,00	22,00	58,00	-15,00
9	4	116,00	129,00	54,00	26,00	75,00	76,00
10	5	92,00	255,00	47,00	32,00	208,00	-246,00
12	7	97,00	158,00	67,00	27,00	92,00	7,00
14	9	116,00	161,00	68,00	16,00	92,00	34,00
16	11	109,00	141,00	53,00	24,00	88,00	40,00
18	13	120,00	136,00	77,00	23,00	58,00	79,00
20	15	102,00	135,00	50,00	28,00	85,00	35,00
22	17	116,00	152,00	52,00	34,00	100,00	31,00
24	19	132,00	160,00	62,00	38,00	98,00	55,00

Por otro lado, en el sondeo 2 el índice de liquidez casi que se mantiene más cercana a cero que a 100, lo que quiere decir que el suelo tiene un comportamiento plástico por el alto consumo de agua que tiene la ubicación de este sondeo.



6.4 Composición mineralógica del suelo

Una vez obtenidos los límites de Atterberg, se pueden analizar los posibles minerales que componen las muestras de suelo, para lo cual es necesario tener un diámetro aproximado de las partículas, cuyo resultado viene de las hidrometrías, al igual que el índice de plasticidad, que fue hallado anteriormente en los límites.

6.4.1 Actividad de la arcilla

Para observar gráficamente la composición de las muestras de arcilla se debe tener en cuenta el porcentaje de material que pasa por el tamiz 200 y el índice de plasticidad de la muestra relacionándolos de la siguiente manera:

Ecuación N. 7 Actividad de la arcilla

$$A = \frac{IP}{\%} \text{ de arcilla}$$

Una vez hallada la actividad del material se puede clasificar:

- $A > 0,38$: caolinita baja
- $A = 0,90$: illitas media
- $A = 7,20$: montmorillonita alta



Tabla 8: Composición del suelo por límites de consistencia Sondeo 1

Muestra	IP	%Suelo (<2u)	A	Composición
4	61,53	27,94	2,20	Montmorillonita
6	87,50	25,23	3,47	Montmorillonita
8	114,11	19,82	5,76	Montmorillonita
10	99,64	23,53	4,23	Montmorillonita
14	80,10	23,73	3,37	Montmorillonita
16	105,63	19,41	5,44	Montmorillonita
18	84,69	23,25	3,64	Montmorillonita
20	89,13	23,34	3,82	Montmorillonita
24	67,79	17,43	3,89	Montmorillonita
26	39,84	21,27	1,87	Montmorillonita
28	24,32	23,39	1,04	Illita
30	102,02	17,69	5,77	Montmorillonita

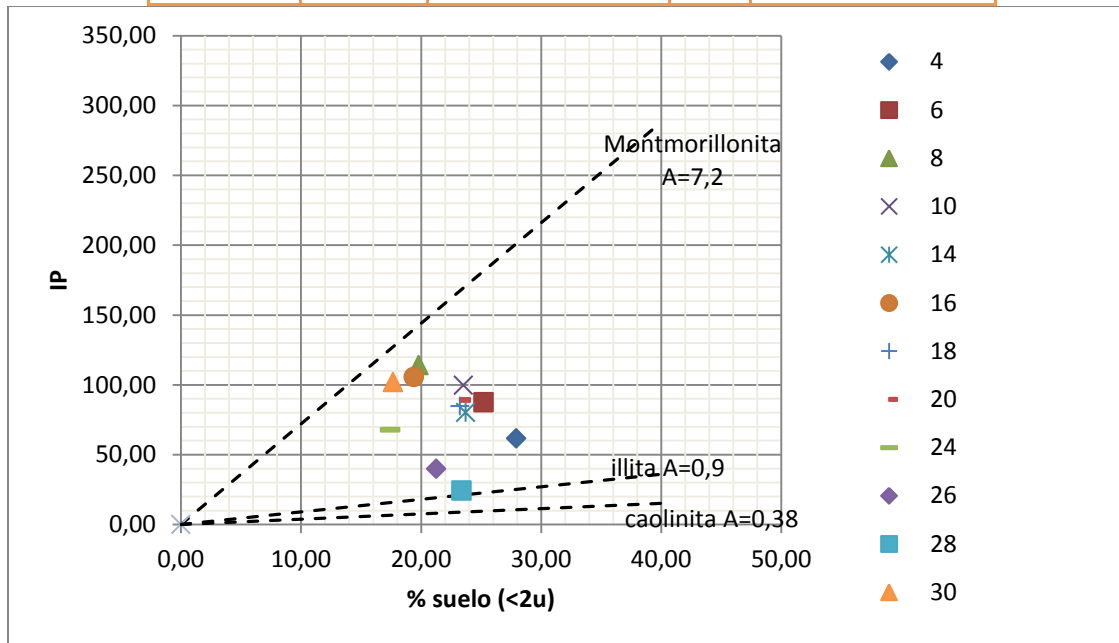


Figura 41. Actividad de la arcilla Sondeo 1



Al graficar el índice de plasticidad versus el porcentaje de suelo de la muestra que pasa por el tamiz 200 (figura 41), en el sondeo 1 se obtiene que en su mayoría los minerales que posee esta arcilla es montmorillonita, lo que hace que este material sea muy expansivo y retenga cantidades de agua muy grandes.

Tabla 9: Composición del suelo por límites de consistencia Sondeo 2

Muestra	IP	%Suelo (<2micras)	A	Composición
4	21,97	37,58	0,58	Caolinita
7	57,91	21,90	2,64	Montmorillonita
10	208,66	19,33	10,79	Montmorillonita
12	91,08	17,54	5,19	Montmorillonita
14	92,27	17,30	5,33	Montmorillonita
16	87,63	19,49	4,50	Montmorillonita
18	58,81	19,53	3,01	Montmorillonita
20	84,84	19,41	4,37	Montmorillonita
22	100,33	21,48	4,67	Montmorillonita
24	97,78	19,26	5,08	Montmorillonita

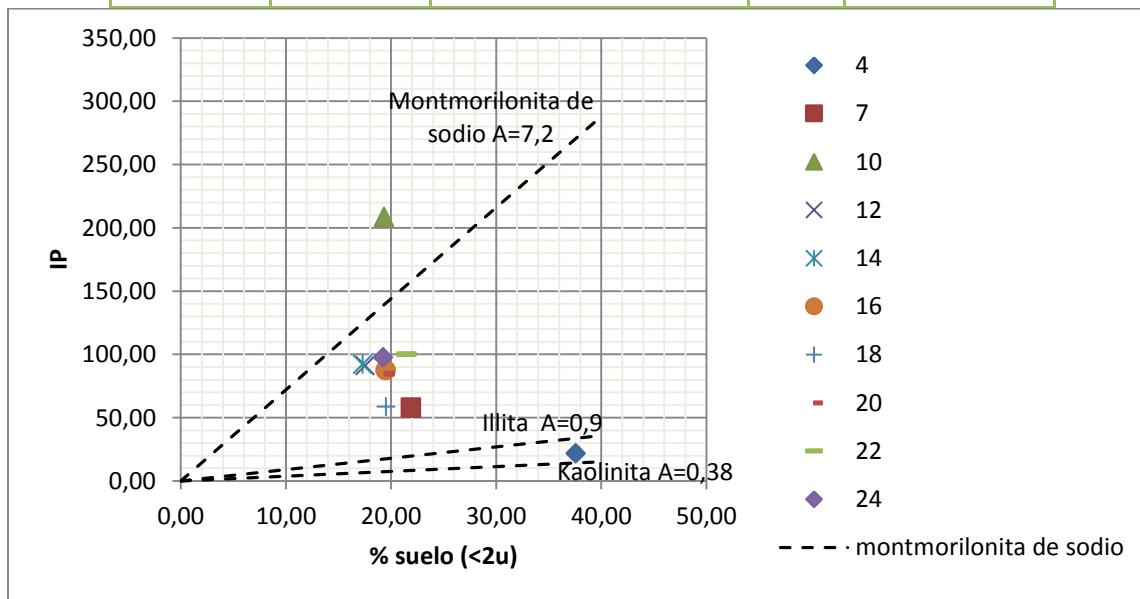


Figura 42. Actividad de la arcilla Sondeo 2



En el segundo sondeo, la figura 42, muestra que la composición de estas arcillas también es en su mayoría montmorillonita, es decir, tanto el sondeo 1 como el sondeo 2 presentan elementos altamente expansivos en su composición, que con los microclimas presentes en la zona generan todas aquellas patologías que trataban Rueda y Pineda en el 2011.

6.4. Carta de Casagrande

Otra de las formas en que se representa la composición de las arcillas de la zona, corresponde a la gráfica de plasticidad de la USCS, elaborada por Arthur Casagrande, en donde el límite líquido y el índice de plasticidad dan una idea del material correspondiente, dependiendo de la zona en la gráfica en la que se encuentre el punto.

En este caso los puntos rojos corresponden al sondeo 1 y los triángulos al sondeo 2, al igual que las zonas se dividen en colores, la azul abarca la montmorillonita, la rosa la illita y la verde la caolinita, en la siguiente gráfica, se observa que la mayoría de los puntos se encuentran dispuestos entre illita y caolinita.

Confirmando lo que se había obtenido con los índices de plasticidad, se observa que los minerales prevalecientes en las muestras obtenidas, tanto en el sondeo 1 que se representa con puntos rojos (●), como en el sondeo 2 que se representa con triángulos (Δ), son altamente expansivas y generan cambios volumétricos excesivos al interior de la estructura de suelo analizada, que generan patologías propias de la zona como los hundimientos, las grietas, la piel de cocodrilo, entre otros a lo largo de la carpeta asfáltica.

Al hacer una relación entre la carta de Casagrande y lo obtenido en los límites de consistencia se observa que la composición da similar, por lo tanto las arcillas encontradas tanto en el sondeo 1 como en el sondeo 2, poseen comportamientos altamente expansivos que reaccionan con el agua, haciendo inestables las condiciones de las estructuras de pavimento flexible que soporta.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ

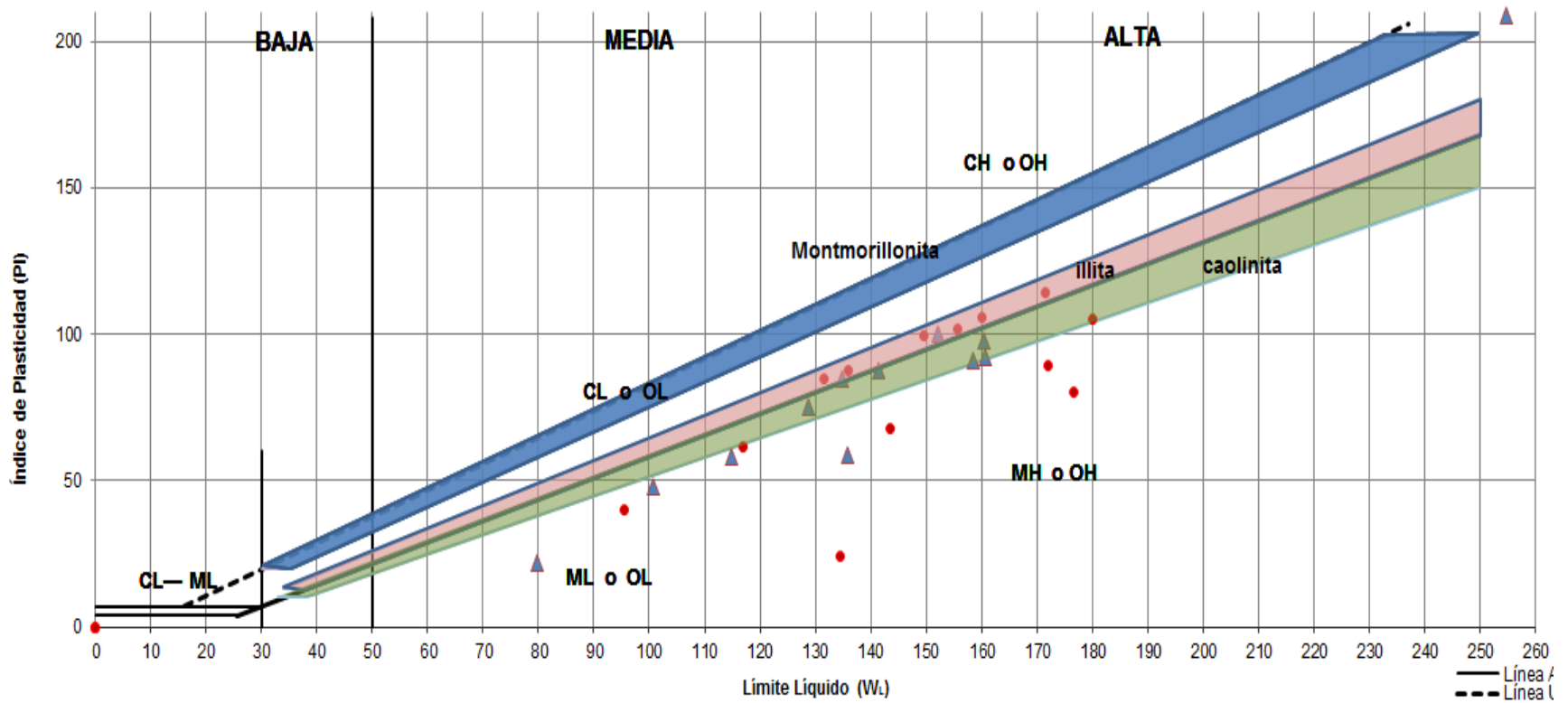


Figura 43: Carta de Casa Grande

6.5 Gravedad Específica y Pesos Unitarios

6.5.1. Gravedad Específica

Para la realización de este ensayo se usó el método de picnómetro con vaciado de aire por medio manual, en donde por cada muestra se tomaron 3 puntos para tener una mayor precisión a la hora de analizar los resultados, también se utilizaron 6 diferentes picnómetros debidamente calibrados, este procedimiento arrojó los resultados de la siguiente tabla, tanto para sondeo 1 como para sondeo 2.

Con base en la tabla 10, se realizó una clasificación de tipos de suelo, como se presenta en las tablas 11 y 12

Tabla 10. Análisis de tipos de suelos según Norma INVIAS 2007.

Cenizas Volcánicas	2.20 a 2.50
Suelos Orgánicos	2.50 a 2.65
Arenas y Gravas	2.65 a 2.67
Limos Inorgánicos	2.67 a 2.72
Arcillas poco Plásticas	2.72 a 2.78
Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas	2.78 a 2.84
Arcillas Expansivas	2.84 a 2.88
Suelos con Abundante Hierro	3.00

Tabla 11: clasificación de las arcillas por gravedad especifica sondeo 1

sondeo 1			
Profundidad (m)	muestra	gravedad especifica	clasificacion según Norma INVIAS
1,00	1	2,484	Cenizas Volcánicas
1,50	2	2,362	Cenizas Volcánicas
2,00	4	2,661	Suelos Organicos
3,50	6	2,793	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
4,00	8	2,688	limos organicos
5,00	10	2,739	arcillas poco plasticas
7,00	14	2,699	limos organicos
8,50	16	2,789	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
10,00	18	2,797	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
11,50	20	2,780	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
13,00	22	2,811	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
14,50	24	2,799	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
16,00	26	2,813	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
17,50	28	2,768	arcillas poco plasticas
19,00	30	2,729	arcillas poco plasticas



Tabla 12: Clasificación de las arcillas por gravedad específica sondeo 2

sondeo 2			
Profundidad (m)	muestra	gravedad específica	clasificación
0,50	1	2,38	Cenizas Volcánicas
1,00	2	2,24	Cenizas Volcánicas
1,50	3	2,60	Suelos Organicos
2,00	4	2,70	limos organicos
3,00	6	2,71	limos organicos
3,50	7	2,67	limos organicos
4,00	8	2,78	arcillas poco plasticas
5,00	10	2,81	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
7,00	12	2,77	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
9,00	14	2,84	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
11,00	16	2,77	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
13,00	18	2,76	arcillas poco plasticas
15,00	20	2,79	Arcillas medianamente y muy alta plasticas
17,00	22	2,76	arcillas poco plasticas
19,00	24	2,83	Arcillas medianamente y muy alta plasticas

En la tabla 11 y 12, se observa que aproximadamente los dos primeros metros se componen de arcillas volcánicas y luego viene una capa de suelo orgánico, para luego encontrar arcillas con propiedades limosas.

6.6 Pesos Unitarios

6.6.1 Peso unitario húmedo o total

Tabla 13: Valores de pesos unitarios totales o húmedos en el sondeo 1, por cada muestra a diferentes profundidades

muestra	profundidades (m)	peso unitario humedo	UND
4	2,00	14,97	KN/m3
6	3,00	12,58	KN/m3
8	4,00	11,11	KN/m3
10	5,00	14,29	KN/m3
12	6,00	11,91	KN/m3
16	8,00	12,97	KN/m3
20	10,00	11,25	KN/m3
24	12,00	8,80	KN/m3



Tabla 14: valores de pesos humedos en el sondeo 2, por cada muestra a diferentes profundidades

muestra	profundidad (m)	peso unitario humedo	UND
4	2,00	14,08	KN/m ³
6	3,00	12,75	KN/m ³
7	3,50	13,80	KN/m ³
8	4,00	15,14	KN/m ³
10	5,00	13,81	KN/m ³
12	6,00	12,55	KN/m ³
14	7,00	10,71	KN/m ³
16	8,00	18,22	KN/m ³
18	9,00	12,09	KN/m ³
22	11,00	11,08	KN/m ³
24	12,00	11,54	KN/m ³

Las tablas 13 y 14 presentan los valores de pesos totales presentes en el sondeo 1 y sondeo 2.

6.6.2 Peso unitario seco

Tabla 15: valores de pesos secos en el sondeo 1, por cada muestra a diferentes profundidades

muestra	humedad	UND	peso seco	UND
4	0,73	%	14,86	KN/m ³
6	0,90	%	12,46	KN/m ³
8	1,05	%	11,00	KN/m ³
10	1,08	%	14,14	KN/m ³
12	1,39	%	11,75	KN/m ³
16	1,10	%	12,83	KN/m ³
20	1,15	%	11,12	KN/m ³
24	1,27	%	8,69	KN/m ³



Tabla 16: valores de pesos secos en el sondeo 2, por cada muestra a diferentes profundidades

muestra	Humedad	UND	peso seco	UND
4	0,47	%	14,01	KN/m3
6	0,58	%	12,68	KN/m3
7	0,62	%	13,72	KN/m3
8	0,57	%	15,06	KN/m3
10	0,60	%	13,72	KN/m3
12	1,25	%	12,40	KN/m3
14	1,35	%	10,57	KN/m3
16	1,15	%	18,01	KN/m3
18	1,35	%	11,93	KN/m3
22	1,16	%	10,95	KN/m3
24	1,36	%	11,39	KN/m3

En la figura 44 se muestra la relación entre pesos húmedos y secos de los dos sondeos respecto a la profundidad

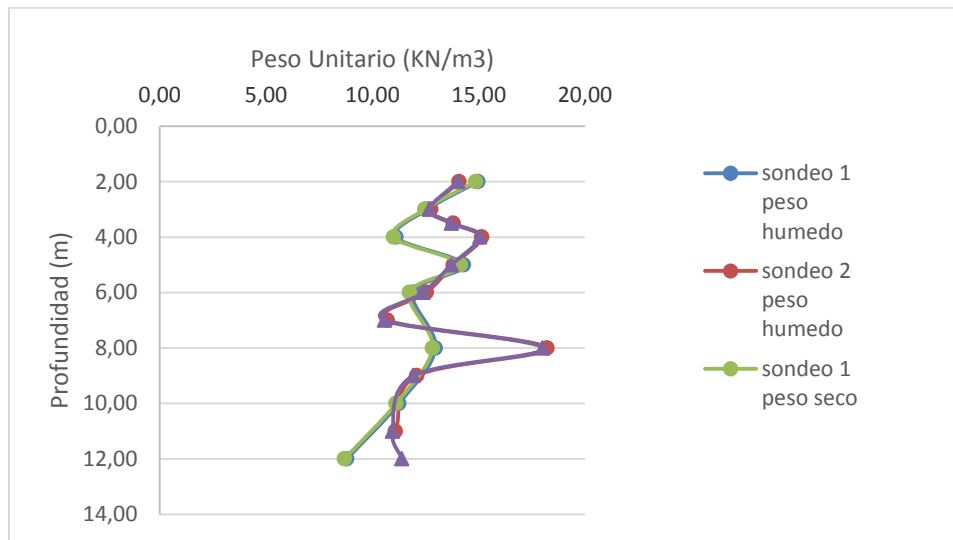


Figura 44: Pesos Húmedos Totales y Secos vs Profundidad



Se observa que los pesos unitarios totales o húmedos dan valores coherentes para suelos arcillosos y limosos, un poco bajos pero coinciden, pero al encontrar el peso unitario seco con las humedades presentes en el suelo se observa que son demasiado pequeños al compararlos con la tabla de pesos unitarios secos de Lambe, esto gracias a los constantes cambios en las humedades y sus valores tan altos.

En la (Figura 45) se observa la tendencia de a mayor profundidad menor el peso unitario, en los primeros seis metros se observan pesos unitarios húmedos entre un rango de 10 a 15 KN/m^3 , y el peso seco valores q oscilan entre 5 y 10 KN/m^3 . Mientras que en los metros finales en peso húmedo valores entre 8 y 12 KN/m^3 , y en peso seco valores entre los 3 y 7 KN/m^3 . Estos valores nos muestran que el suelo a primeros metros, presenta un material de mayor consistencia y rigidez mientras en los metros finales tenemos presencia de material blando y de calidad media baja, se observa además que el peso húmedo en el sondeo 1 es mayor en los primeros tres metros que el del sondeo 2, luego disminuye siendo superado por el sondeo 2, lo cual se puede deber a que el suelo presente en el sondeo 2 tiene una pérdida de agua mayor a la del sondeo 1, generándole así una mayor desecación. En los metros de la parte media y la parte final se mantiene una varianza entre los dos sondeos. La desecación se observa a mejor detalle en la (Figura 50) en los pesos secos, se muestra que el sondeo 2 es absolutamente mayor que el sondeo 1, lo cual contrasta con el peso húmedo, mostrando así que el suelo del sondeo 2 al tener menos contenido de agua su esqueleto sólido es mayor al del sondeo 1 que tiene mayor presencia de agua.

6.7 Estados de Esfuerzos

El estado de estado de esfuerzos nos permite observar la variación de fuerzas generadas en un área cualquiera de la columna de suelo, con esto podemos



analizar la variación de esfuerzos presentes en la columna de suelo, los cuales normalmente aumentan directamente proporcional a mayor profundidad.

Los suelos están compuestos por un esqueleto sólido, partículas de agua y de aire, por ello para el análisis de la estabilidad de un suelo se debe estudiar la variación y distribución de los esfuerzos generados a una masa de suelo.

Los esfuerzos totales se encontraron de dos formas, la primera es la básica de mecánica de suelos, que consiste en la multiplicación de profundidad de la que fue extraído la muestra y el peso unitario total o húmedo encontrado en laboratorio. El segundo método consiste en la solución de la integral de la función encontrada a partir de la gráfica de profundidad vs peso unitario total. Con esta solución, para cada muestra encontramos el esfuerzo total.

6.7.1 Primer Sondeo

Primer método

Tabla 17. Esfuerzos efectivos para diferentes profundidades, por el primer método, sondeo 1.

muestra	profundidades	UND	esfuerzos efectivos	UND
4	2,00	m	299,33	Kpa
6	3,00	m	377,30	Kpa
8	4,00	m	444,48	Kpa
10	5,00	m	714,43	Kpa
12	6,00	m	714,53	Kpa
16	8,00	m	1037,86	Kpa
20	10,00	m	1124,76	Kpa
24	12,00	m	1056,11	Kpa

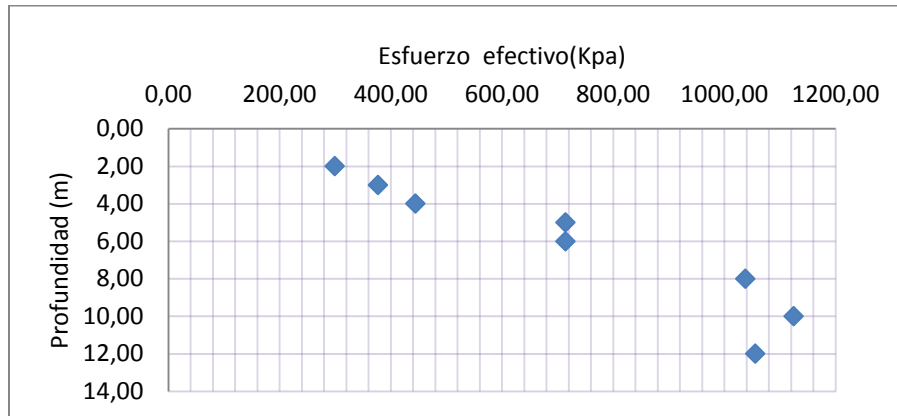


Figura 45: Esfuerzo efectivo en (kPa/cm²) vs profundidad en (m), sondeo 1

Segundo Método

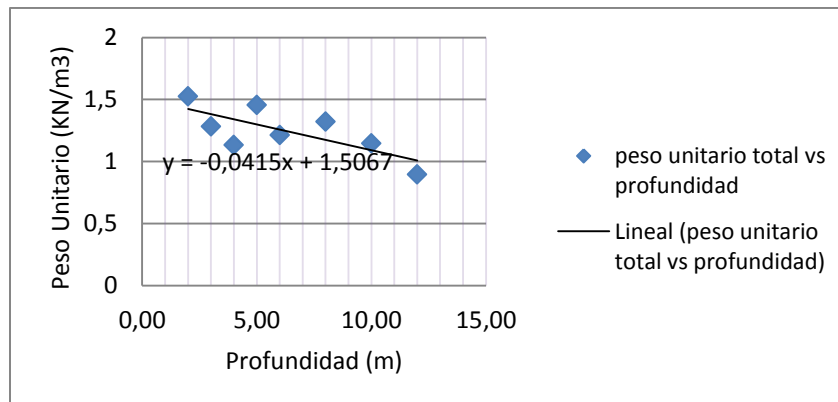


Figura 46: Peso unitario vs profundidad, ecuación lineal, sondeo 1

Con esta ecuación se encuentran los esfuerzos totales al integrarla y solucionarla para cada profundidad. Entregándonos estos resultados.



Tabla 18. Esfuerzos totales encontrados con la integral, sondeo 1.

muestra	profundidades	UND	esfuerzos efectivos	UND
4	2,00	m	295,54	Kpa
6	3,00	m	443,25	Kpa
8	4,00	m	590,92	Kpa
10	5,00	m	738,55	Kpa
12	6,00	m	886,14	Kpa
16	8,00	m	1181,20	Kpa
20	10,00	m	1476,11	Kpa
24	12,00	m	1770,86	Kpa

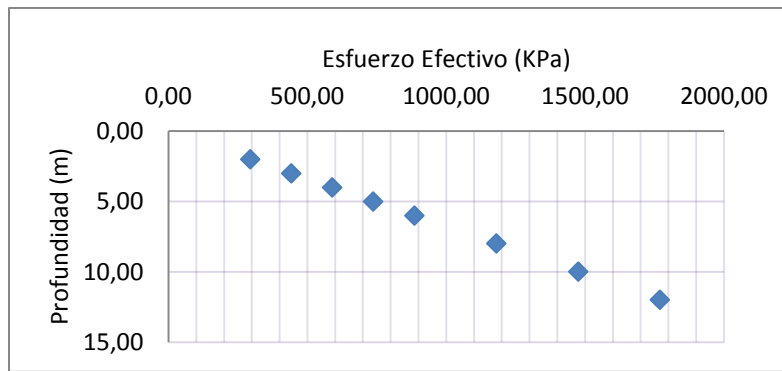


Figura 47: Esfuerzo efectivo por método de integral vs profundidad, primer sondeo.



6.7.2 Segundo Sondeo

Primer Método

Tabla 19. Esfuerzos efectivos para diferentes profundidades, por el primer método, sondeo 2.

muestra	profundidad	UND	esfuerzo efectivo	UND
4	2,00	m	281,58	Kpa
6	3,00	m	382,64	Kpa
7	3,50	m	483,15	Kpa
8	4,00	m	605,69	Kpa
10	5,00	m	690,36	Kpa
12	6,00	m	753,14	Kpa
14	7,00	m	749,98	Kpa
16	8,00	m	1457,62	Kpa
18	9,00	m	1088,18	Kpa
22	11,00	m	1218,98	Kpa
24	12,00	m	1385,12	Kpa

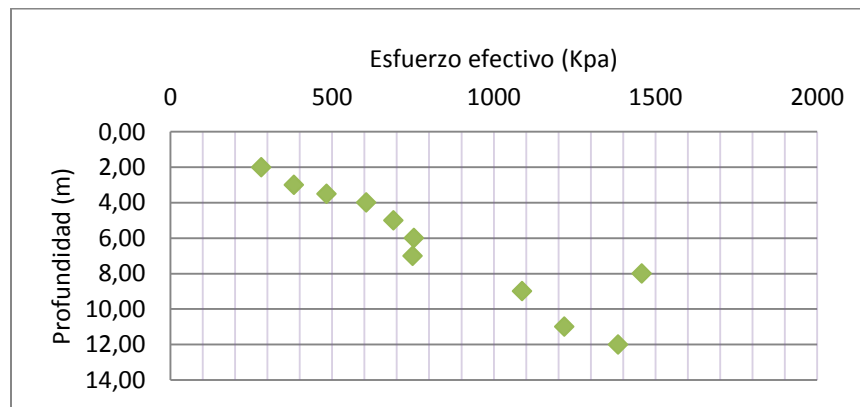


Figura 48: Esfuerzo efectivo en (kPa/m) vs profundidad en (m), sondeo 2.



Segundo método.

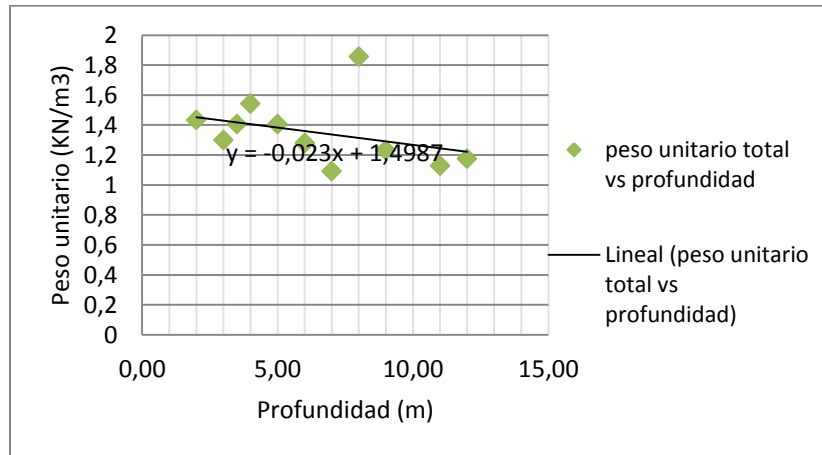


Figura 49: Peso unitario vs profundidad, ecuación lineal, sondeo 2.

Con esta ecuación se encuentran los esfuerzos totales al integrarla y solucionarla para cada profundidad. Entregándonos estos resultados.

Tabla 19. Esfuerzos totales encontrados con la integral, sondeo 2.

muestra	profundidad	UND	esfuerzo efectivo	UND
4	2,00	cm	294,04	Kpa
6	3,00	cm	441,07	Kpa
7	3,50	cm	514,58	Kpa
8	4,00	cm	588,09	Kpa
10	5,00	cm	735,11	Kpa
12	6,00	cm	882,13	Kpa
14	7,00	cm	1029,15	Kpa
16	8,00	cm	1176,17	Kpa
18	9,00	cm	1323,19	Kpa
22	11,00	cm	1617,24	Kpa
24	12,00	cm	1764,26	Kpa

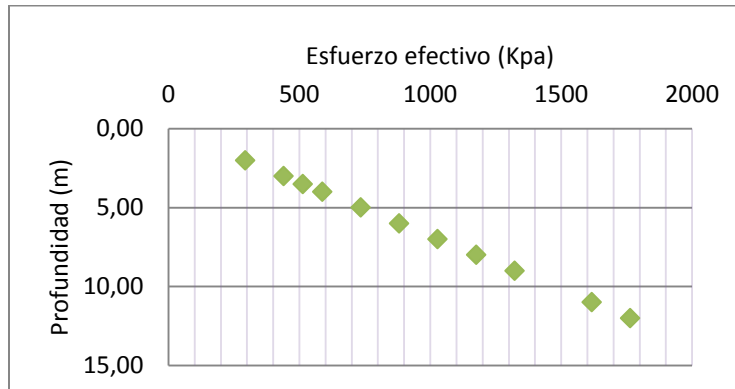


Figura 50: Esfuerzo efectivo por método de integral vs profundidad, segundo sondeo.

Al observar los esfuerzos presentes por los dos diferentes métodos, se logró encontrar una tendencia de aumento en estos, lo cual es coherente con la teoría de prisma de presiones de mecánica de suelos, esta teoría indica que a mayor profundidad el esfuerzo ejercido al interior de la masa de suelo es mayor de una manera lineal.

Primer sondeo

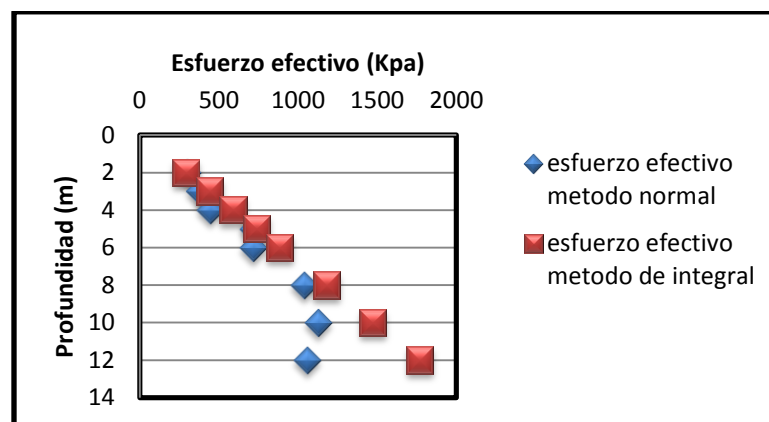


Figura 51: Comparación de métodos, esfuerzo vs profundidad (kPa/m vs cm), primer sondeo.



La figura 50, presenta una variación de esfuerzos, en la cual los primeros cuatro metros de profundidad generan un pequeño cambio de esfuerzo respecto a la profundidad partiendo de la pendiente, entre los cuatro y ocho metros se presenta una pendiente menor a los primeros metros lo cual muestra que el aumento de esfuerzos en estas profundidades es alto con relación a los primeros cuatro y últimos metros, que también tienen una pendiente alta, por esto su aumento de esfuerzos es baja.

La figura 51, muestra una variación de esfuerzos típica en arcillas con una gran pendiente al inicio, luego suavizándose y terminando con una constante.

Segundo sondeo.

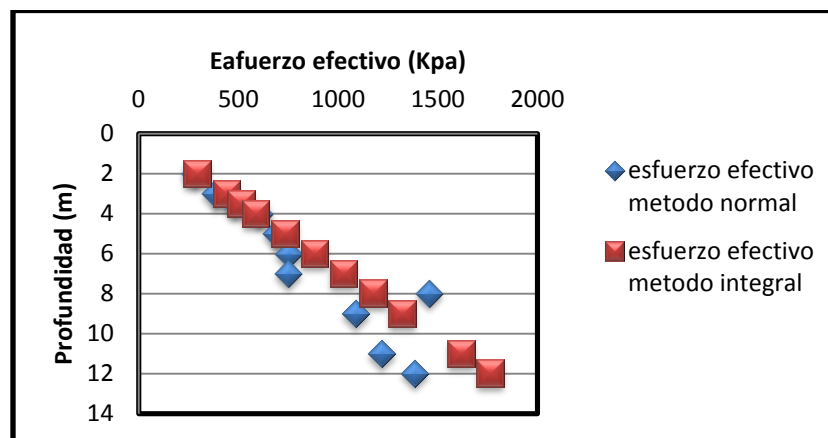


Figura 52: Comparación de métodos, esfuerzo vs profundidad (kPa/m vs cm), segundo sondeo.

El sondeo 2 como se muestra en la figura 52. A diferencia del sondeo 1, muestra una pendiente medianamente alta en los primeros seis metros de profundidad, pero en la parte media es decir de seis a diez metros se observa una pendiente muy alta haciendo así muy bajo el aumento de esfuerzos, pero en la parte final entre diez a catorce metros la pendiente vuelve a suavizarse lo cual genera un aumento en la variación de esfuerzos. Este comportamiento puede deberse que



en el sondeo dos es mas notoria la desecacion que en el sondeo uno, por ello los metros medios se genera poca variacion en los esfuerzos debido a los vacios de suelo presentes.

6.8 Relaciones volumétricas de los perfiles

Los parámetros de saturación, la relación de vacíos y la porosidad, son fundamentales para el reconocimiento físico de la muestra de los suelos que se están analizando. Estos varían con el tiempo y con las variaciones de carga a las que se ve sometido el suelo.

Para hallar estos resultados se recurre a la relación de fases que se relaciona a continuación:

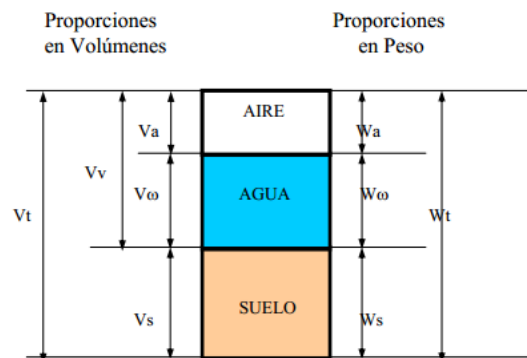


Figura 53: Relación de fases de un suelo

Teniendo en cuenta que en las muestras, el valor correspondiente al aire se iguala a cero, se empieza a realizar una serie de cálculos en el que se reemplazan los valores de la fase de agua para finalmente obtener las saturaciones de cada una de las muestras, una vez halladas las saturaciones se encuentran la relación de vacíos y la porosidad.



6.9 Relación de Vacíos

La relación de vacíos se encuentra a partir de la ecuación de mecánica de suelos, que especifica la división de la gravedad específica sobre el peso unitario seco menos uno.

Siguiendo la figura 53 se puede vincular de la siguiente manera:

Ecuación N. 8 Relación de vacíos

$$e = \frac{Vv}{V_s} = \frac{Vv}{V_t - Vv}$$

En las tablas 54 se puede observar la relación de vacíos de los sondeos 1 y 2.

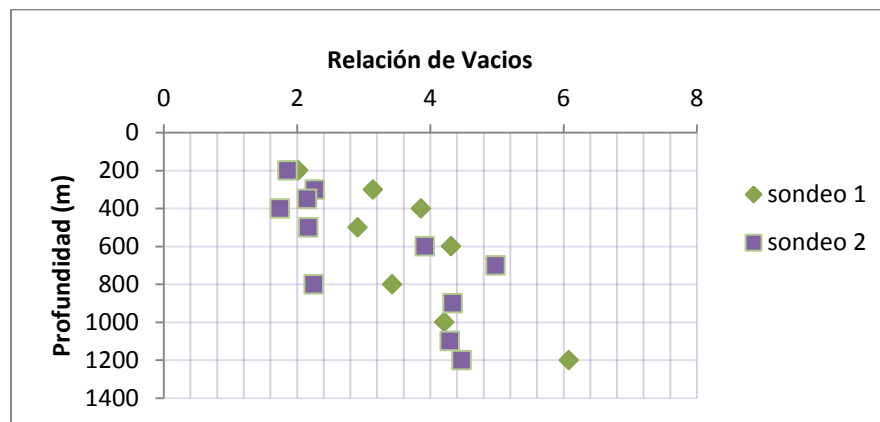


Figura 54: Relación de vacíos vs Profundidad

Los suelos cohesivos poseen una relación de vacíos de entre 0,55 y 5, que corresponden completamente a lo obtenido al realizar los cálculos. Esto sucede por la alta actividad electroquímica que se asocia a los minerales que componen las arcillas.

En la figura 54, se observa en ambos sondeos la tendencia al aumento de la relación de vacíos con relación a la profundidad, lo cual se puede atribuir a la



deseccación presente en estas arcillas, gracias a las fracturas de la masa solida del suelo aumentan la cantidad de vacíos rellenos de agua o aire.

El aumento de relación de vacíos con la profundidad, no es típico de arcillas normales, lo cual no muestra la afección de la desecación en este material, al principio la relación de vacíos es pequeña por que el suelo no muestra fisuras ni agrietamiento, a medida que aumenta la profundidad se comienzan a observar las fisuras y grietas en la masa de suelo, lo cual al aumento de esfuerzo vertical hace aumentar estos espaciamientos internos entre partículas de suelo.

La diferencia de la variación de relaciones de vacíos entre el sondeo 1 y 2 es alta. El material del sondeo 2 como se ha venido hablando en todo el documento presenta una mayor pérdida de agua puesto que se encuentra cerca a los árboles, lo cual le genera mayor agrietamiento y más fisuras que el suelo del sondeo 1.

La variación de relación de vacíos entre los sondeos 1 y 2 es clara, mientras más cercana este al árbol la masa de suelo su relación de vacíos aumentara en mayor medida.

6.10 Saturación

Las muestras de suelo analizadas, se evidencia una alta saturación que varían entre el 60% y el 98%, todo esto debido a los altos niveles de agua subterránea, a los microclimas de la zona, a los niveles elevados de precipitación y las propiedades de absorción del suelo. La figura 61 muestra la saturación presentada en las muestras para los dos sondeos.

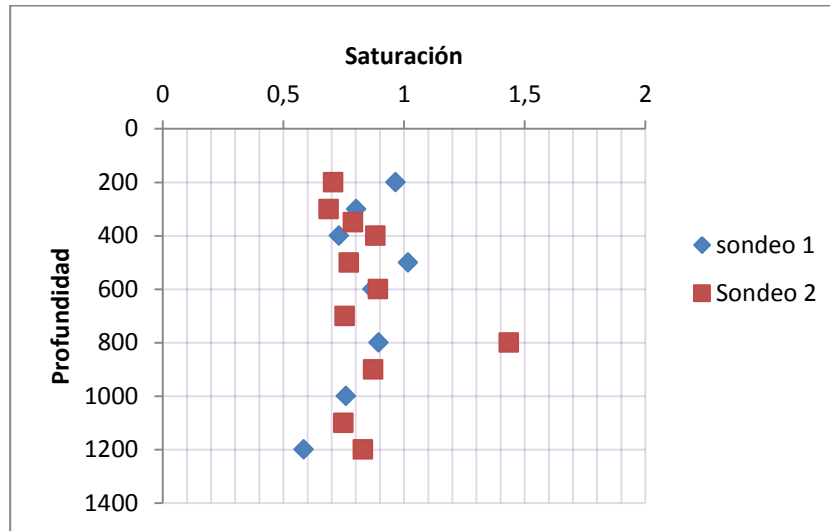


Figura 55: Saturación vs Profundidad

En el sondeo 1, figura 55, se observa una saturación que superficialmente es elevada y posteriormente, en los siguientes 2 metros va disminuyendo, hasta que llega a 55% y hacia los 6 y 7 metros de profundidad en donde de nuevo adquiere una saturación de aproximadamente el 100%, a partir de este punto empieza una pérdida continua de agua y es donde se genera el proceso de la desecación que produce las grandes grietas a profundidades considerables.

En el sondeo 2, figura 55 se obtiene una tendencia más lineal de saturación con respecto a la profundidad, esto puede ser evidencia de la gran influencia que tienen las especies arbóreas de la zona, recordando que el sector en donde se realizó este sondeo tenía bastantes árboles que consumen cantidades elevadas de agua que posee el suelo.

6.11 Relación de Vacíos vs Esfuerzo total.

Una masa de suelo se empieza a deformar debido a las cargas que soporte, ya que el esfuerzo vertical que se aplique va desplazando el aire del la zona en



donde se ejecute, hasta que este va teniendo una disminución volumétrica, es decir, los esfuerzos efectivos verticales son proporcionales a la relación de vacíos de una muestra.

Esto se representa en la figura 56:

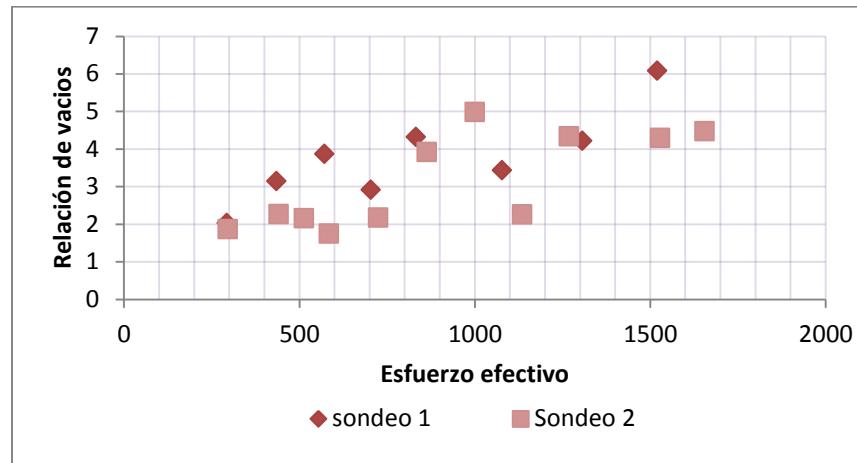


Figura 56: Relación de vacíos vs Esfuerzo total

Se observa que a mayor esfuerzo vertical la relación de vacíos aumenta, esto es atípico en un suelo arcilloso normal, pero este material estudiado afectado por la desecación genera que a mayor carga vertical las fisuras y el agrietamiento es mayor, por lo cual genera un aumento considerable de vacíos respecto a los primeros seis metros. Al comparar las gráficas de ambos sondeos, se puede observar claramente como la del sondeo dos, el cual fue realizado cerca de los árboles, genera un cambio de relación de vacíos mucho mayor respecto al primer sondeo, esto gracias a que la pérdida de agua en la masa de suelo es mayor en el sondeo dos que en el primero.



6.12 Relación de Vacíos vs Saturación.

Siguiendo con lo planteado en el numeral anterior, en donde se decía que a medida que se iba presentando una consolidación, el agua se va desplazando hacia el exterior, en la figura 57, se muestra como se presenta este movimiento, en donde a menudo que la relación de vacíos de cada muestra va aumentando con la profundidad, la saturación va disminuyendo, evidenciando la desecación del suelo en los niveles más profundos del terreno, esto aplica para los dos sondeos.

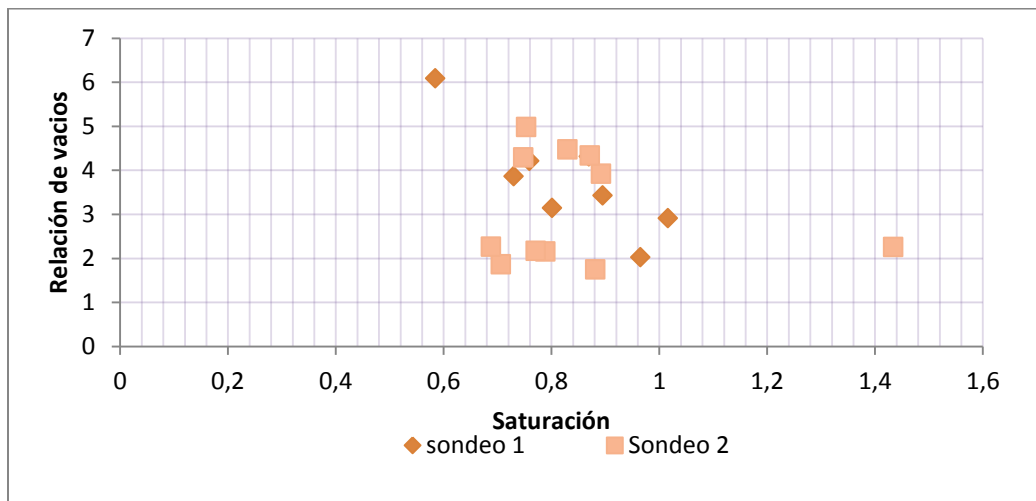


Figura 57: Relación de vacíos vs Saturación.

6.13 Perfiles Estratigráficos

La estratificación se hizo con base en la humedad Natural, LL, LP, LC, IP, IL, Gs, Peso Unitario y la profundidad. La clasificación se hizo con relación al sistema USCS.



Tabla 23. Sistema de Clasificación USCS (Lambe)

SISTEMA CLASIFICACION USCS			
FINOS (? 50 % pasa 0.08 mm)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. wl	Indice de Plasticidad * IP
	ML	< 50	< 0.73 (wl – 20) ó < 4
	MH	> 50	< 0.73 (wl – 20)
	CL	< 50	> 0.73 (wl – 20) y > 7
	CH	> 50	> 0.73 (wl – 20)
	OL	< 50	** wl seco al horno ? 75 % del wl seco al aire
	OH	> 50	
	P ₁	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si $IP \cong 0.73 (wl - 20)$ ó si IP entre 4 y 7 E $IP > 0.73 (wl - 20)$, usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente wl seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML.			
Si $wl = 50$; CL-CH ó ML-MH			

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**

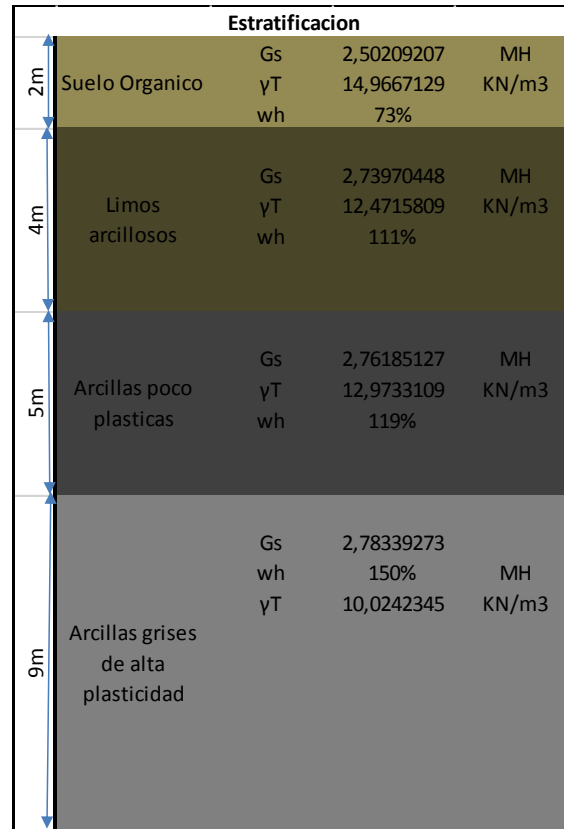


Figura 58: Estratificación sondeo 1

Al realizar esta estratificación, en la figura 58, se puede observar que la muestra de suelo se conforma por dos metros de suelo orgánico, este suelo en los primeros metros se compone de material de relleno antrópico y de materia orgánica la cual es clave para el funcionamiento de la vegetación y la vida del suelo.

De la cota dos metros a la cota seis metros, es decir, un espesor de cuatro metros, el suelo presente se compone de limos arcillosos con alto grado de oxidación, con caolinita como mineral predominante perteneciente al grupo MH de la clasificación USCS, con un LL de 116% y un IP del 60%. Esto representa un comportamiento común en los suelos de la sabana de Bogotá, en las partes no tan

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



profundas del suelo, la oxidación presente es un gran indicador de la presencia de metales pesados en el agua encontrada en esta zona, además de las fisuras encontradas muestran la incidencia del fenómeno de desecación en la columna de material limoso.

De la cota seis metros a la cota veinte metros, es decir, catorce metros de profundidad, se encontraron un grupo de arcillas grises con predominio de caolinita MH, con LL de 155% e IP de 90%, se presenta en la figura 59, lo cual concuerda con el análisis visual en campo y es coherente con el material presente en el resto de la sabana de Bogotá.

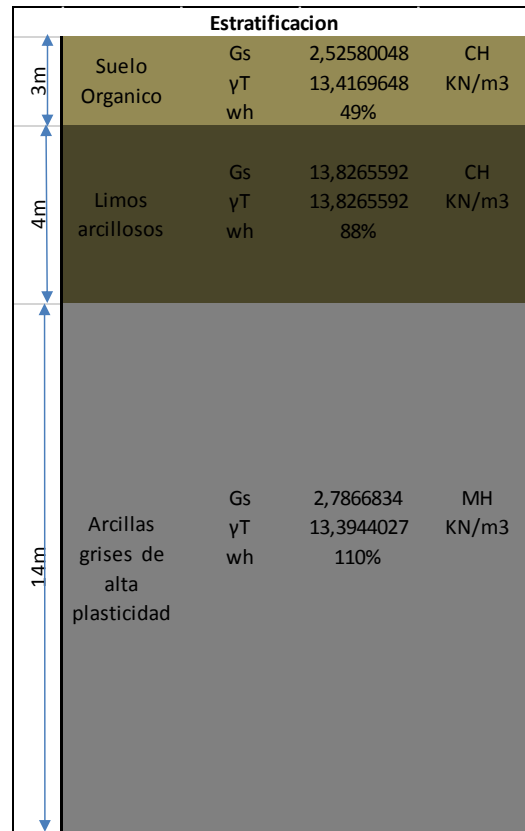


Figura 59: Estratificación sondeo 2

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



Luego de realizar la estratificación grafica se puede observar que al igual que el sondeo uno los primeros tres metros de material pertenecen a un suelo orgánico y relleno antrópico, con presencia montmorillonita como mineral predominante CH.

Los siguientes cuatro metros de suelo, es decir, de la cota tres metros a la cota siete metros, pertenece a un material limo arcilloso con alto grado de oxidación, montmorillonita como mineral predominante, LL de 164% e IP de 100% lo cual coincide con el análisis visual realizado.

Los últimos catorce metros de suelo analizado, es decir de la cota siete metros a la cota veinte metros corresponde a arcillas grises de diferentes humedades y con presencia de fisuras en su esqueleto. A diferencia de los primeros estratos estas arcillas grises pertenecen al grupo MH de la clasificación USCS, es decir predomina la caolinita.



7. CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL

7.1 Generalidades

Para la realización de la caracterización composicional de las muestras se tomó como base el ensayo cuantitativo destructivo denominado Fluorescencia de Rayos X (FRX), cuyos resultados se describirán a continuación.

7.2 Fluorescencia de Rayos X

Este ensayo fue realizado en los laboratorios de la Universidad Nacional, a donde se trasladaron 3 muestras denominadas (XRF 4047 M-5), (XRF 4048 M-13), (XRF 4049 M-23), que fueron secadas a 105° C por un periodo de 12 horas. Se arrojaron los siguientes resultados:

Muestra	Profundidad (m)
XRF 4047 M-5)	2,5
(XRF 4048 M-13)	6,50
(XRF 4049 M-23)	14

La composición de las arcillas presentes al Occidente de la Sabana de Bogotá, corresponden a una composición de minerales que reaccionan con la humedad, de tal forma que se expanden. Los resultados del laboratorio de FRX, mostrados en la tabla 20 confirma la alta presencia de silicio, común entre la caolinita, la illita y la montmorillonita, correspondiendo a los ensayos realizados anteriormente como lo son actividad de las arcillas y Carta de Casagrande.

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ



Elemento y/o Compuesto	XRF-4047 M-5 -U. Santo Tomas-	XRF-4048 M-13 -U. Santo Tomas-	XRF-4049 M-23 -U. Santo Tomas-
SiO ₂	75,91%	73,23%	65,13%
Al ₂ O ₃	16,09%	19,40%	19,64%
Fe ₂ O ₃	4,70%	3,80%	11,04%
K ₂ O	0,90%	1,07%	1,05%
TiO ₂	0,78%	0,80%	0,77%
MgO	0,44%	0,59%	0,62%
CaO	0,30%	0,23%	0,43%
Na ₂ O	0,25%	0,19%	0,18%
P ₂ O ₅	0,06%	0,08%	0,17%
MnO	0,00%	0,00%	0,04%
S	269 ppm	260 ppm	348 ppm
Zr	265 ppm	212 ppm	141 ppm
Ba	235 ppm	244 ppm	287 ppm
Zn	116 ppm	207 ppm	230 ppm
Sr	96 ppm	97 ppm	94 ppm
Cr	87 ppm	102 ppm	97 ppm
Pb	55 ppm	38 ppm	54 ppm
Rb	54 ppm	57 ppm	54 ppm
Ni	53 ppm	60 ppm	60 ppm
Cu	--*	12 ppm	11 ppm
As	--*	--*	--*

Tabla 20: Componentes de las muestras 5, 13 y 23



8. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

8.1 Consolidación Unidimensional

Para la realización de este laboratorio Se utilizó un intervalo de cargas de 1 a 16 kg duplicándolas sucesivamente, el brazo generaba una maximización de 10 kg por lo cual se trabajó de 10 a 160 kg. Los análisis gráficos de los que se obtuvieron los datos a continuación, se aprecian en el anexo 5

Tabla 21. Esfuerzos generados a las muestras.

carga (kg)	maximizacion	esfuerzo gerenerado (kg/cm2)	esfuerzo gerenerado (kPA)
1	10	0,34	33,29
2	20	0,67	65,28
4	40	1,32	129,26
8	80	2,62	257,23
16	160	5,23	513,17

8.1.1 Calculo de esfuerzo de preconsolidación por el método del trabajo.

Se calcula un trabajo generado de acuerdo al producto entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria generada. De la figura 69 se realizan dos rectas de tendencia de los primeros y últimos tres puntos, y la intersección de estas dos rectas nos presenta el esfuerzo de preconsolidación que se genera al suelo.

Sondeo 1

En primer lugar, se enunciarán las características generales de las muestras usadas, del sondeo 1, para la elaboración de este laboratorio



Tabla 22. Profundidades y tipo de muestras

No muestra	profundidad		tipo de muestra
	desde (m)	hasta(m)	
3	1	1,5	sh
11	5	5,5	sh
17	9	9,5	sh
25	15	15,5	sh
29	18	18,5	sh

Sondeo 2

Igual que en el sondeo 1, en el sondeo 2 se registran las características de las muestras usadas para la elaboración del laboratorio.

Tabla 23. Profundidades y tipo de muestras

No muestra	profundidad		tipo de muestra
	desde(m)	hasta(m)	
11	6	6,5	sh
15	10	10,5	sh
23	18	18,5	sh

Los resultados que se obtuvieron por cada muestra, alimentan la gráfica final que se describirá más adelante, en el anexos 5.

8.1.2 Esfuerzo de preconsolidación

En la figura 69 muestra los esfuerzos de pre consolidación, estas se realizaron partiendo de los datos hallados anteriormente.

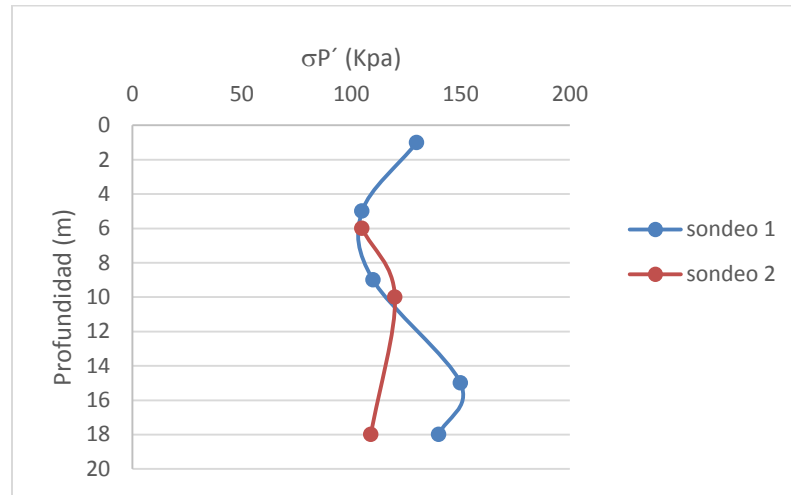


Figura 60. Esfuerzo de preconsolidacion vs profundidad.

El esfuerzo de preconsolidacion es alto en los primeros metros de profundidad, en los siguientes catorce metros el esfuerzo disminuye puesto que la rigidez y consistencia del suelo disminuyen, luego se presenta una leve recuperación y aumento pero vuelve a decrecer, mostrando así una lógica frente a lo estudiado de las arcillas grisáceas de alta humedad y blanda consistencia presentes. Se puede observar claramente la diferencia entre el primer y segundo sondeo puesto que el esfuerzo debe ser mayor en los primeros metros de suelo en el sondeo dos, que en el primero, esto a causa de que el contenido de agua y por ende ablandamiento de las arcillas es menor y comienza a más profundidad.

8.1.3 Índice de Compresión

En la figura 61 se muestra que los primeros 10 metros de suelo poseen un coeficiente grande debido posiblemente a que este estrato arcilloso sufre de desecación, por lo cual estos metros de suelo son más rígidos por las propiedades de las arcillas, las cuales sufren un agrietamiento y fisuras. En el resto de estrato se observa que al disminuir el coeficiente aumenta la presencia de agua y esto induce a que el esfuerzo de preconsolidacion es mayor. La tendencia de las



curvas de los dos sondeos son muy similares más sin embargo el suelo del sondeo 1 es más blando y su consolidación es mayor.

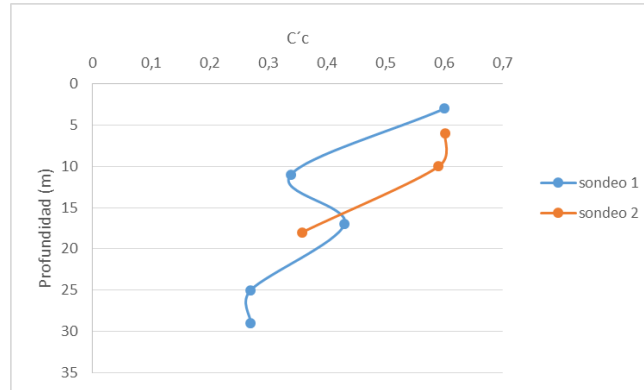


Figura 61. Índice de Compresion vs profundidad

En la figura 61 se muestra que la recuperación del suelo al principio es mayor pero esta va disminuyendo al pasar el tiempo, el cambio entre el primer punto y el segundo es grande, lo cual es característico de las arcillas, su recuperación es rápida al comienzo pero luego es muy lenta.

Al observar la figura 62, se puede entender que el sondeo 1 al tener suelos más blandos su recuperación en la descarga es mayor que en el sondeo 2, por lo cual podemos asumir que el suelo del sondeo 2 es más rígido y al serlo no tendrá tanta capacidad de recuperación por lo cual el suelo puede llegar a la falla y fisurarse más fácil que el suelo del sondeo 1.

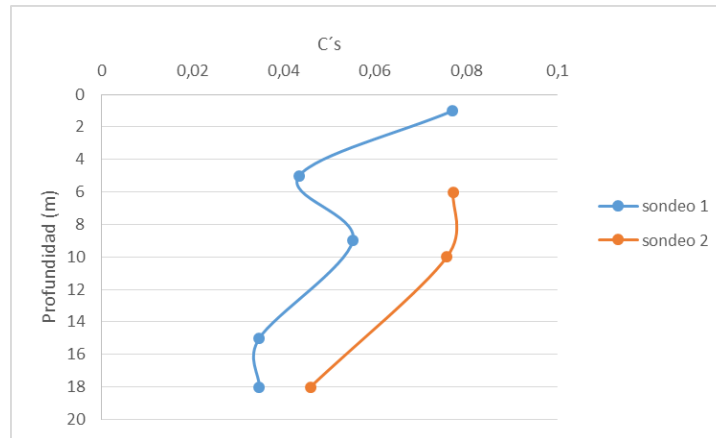


Figura 62: Coeficiente de recuperación vs profundidad

Como se observa en la figura 62, la recuperación del suelo es más rápida en los primeros metros, gracias a su mayor rigidez mientras en los metros finales las arcillas grises húmedas de consistencia blanda tardan más tiempo en alcanzar su recuperación total. Al comparar los dos sondeos se puede observar que la recuperación de las arcillas es mayor en el sondeo dos, puesto que el contenido de agua es mayor y su consistencia es blanda.

8.1.4 Variación mineralógica, LL y gravedad específica respecto a la profundidad.

Teniendo en cuenta las condiciones elegidas para realizar cada uno de los sondeos, es necesario relacionar los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio de la siguiente forma:

8.1.4.1 Primer sondeo: realizado en poca presencia vegetal

La zona en donde se realizó el primer sondeo, corresponde a un sector con poca presencia vegetal, en donde se observaban algunos daños en las estructuras de pavimento flexible. Relacionando estas condiciones con los resultados obtenidos en los laboratorios se obtiene lo siguiente:



Respecto al límite líquido, se tiene un incremento parcial a medida que aumenta la profundidad hasta los 14,50 metros, en donde decrece y se vuelve más inestable este parámetro, al tener LL tan elevados se hace más evidente la presencia de materiales expansivos, en donde se procede a hallar la gravedad específica de cada muestra, en donde se obtienen rasgos correspondientes, en su gran mayoría arcillas alta y medianamente plásticas, valores que fueron ratificados tanto en las tablas de plasticidad como en la Carta de Casagrande, de las cuales se obtiene que los minerales que componen dichas muestras, son en gran parte montmorillonitas, caolinitas e illitas.

8.1.4.2 Segundo sondeo: Realizado en presencia arbórea

La zona en donde se realizó el segundo sondeo, corresponde a un área en donde la presencia de árboles foráneos es bastante y las patologías que se evidencian en la carpeta asfáltica, restan funcionalidad a la vía.

Relacionando la información hallada con los laboratorios realizados, muestran porcentajes de LL por encima hasta del 200%, a una profundidad de aproximadamente 5 metros, seguido de inestabilidad de los datos con respecto al crecimiento y el decrecimiento de los porcentaje.

Los árboles que se hallan en esta zona, no son nativos de la región, así que los consumos de agua que tienen superan los niveles que el suelo puede dar, esto hace que se presenten niveles inesperados de saturación o desecación a las diferentes profundidades, al realizar las gravedades específicas, se encuentra que la composición mineralógica que presenta esta zona son en su mayoría montmorillonitas, que son elementos altamente absorbentes y expansivos, que al exponerlo a las condiciones generales de ambiente de la zona, presenta cambios de volúmenes que terminan por agrietar el terreno.



8.2 Succión

8.2.1 Resultados

Tabla 24. Tabla valores de humedades y succion sondeo 1.

prof	muestra	No	humedad	succion
3	7	A	0,34264733	1796,07293
6	13	B	0,13041441	1923,10879
6	13	C	0,20916549	595,947763
9	17	D	0,19092153	755,224296

Tabla 25. Tabla valores de humedades y succion sondeo 2.

prof	muestra	No	humedad	succion
6	11	A	0,31590596	214,352571
8	13	B	0,26192181	353,64918
8	13	C	0,16672259	1047,71008
10	15	D	0,28402913	280,415518

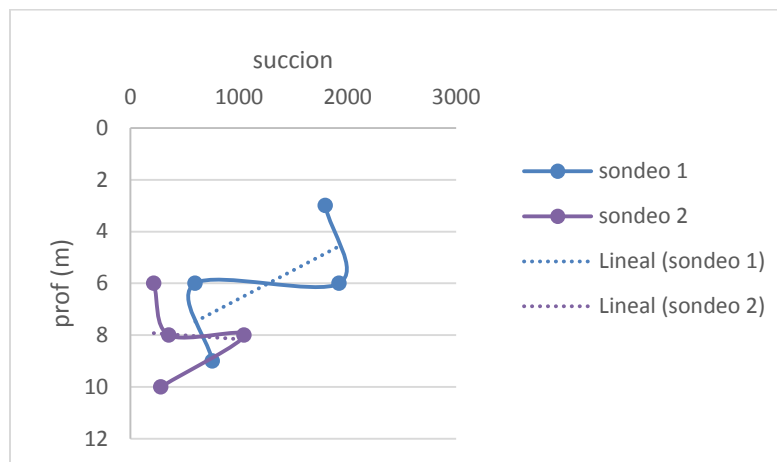


Figura 63: Profundidad vs Succion



En la figura 63. Se observa un comportamiento lógico, nos muestra que en el sondeo 1 a mayor profundidad la succión disminuye, En caso contrario el sondeo 2 nos muestra que hay un aumento de la succión en la parte media del estrato de suelo, este comportamiento se puede deber a la gran presencia de vegetación en la zona y la alteración a la estructura de suelo que genera esta.

8.3 Compresión Inconfinada

Este laboratorio se realizó utilizando cuatro muestras por sondeo, las tablas de resultados se pueden observar en el anexo 9.



Figura 64: Fotografía montaje de laboratorio

8.3.1 Sondeo 1

En las cuatro muestras se muestra una tendencia a que el punto máximo de deformación se encuentra entre el 30% y 40%, además las deformaciones que se presentan en el área transversal aumentan casi en dos centímetros. Lo que indica que es un material frágil y blando.

En la figura 65, se muestra el compilado de las muestras analizadas, se observa que la muestra más superficial tiene una resistencia mayor a las que están más



profundas, esto demuestra que se presenta una desecación en los estratos más superficiales del suelo en el sondeo 1, realizado alejado de las barreras vivas.

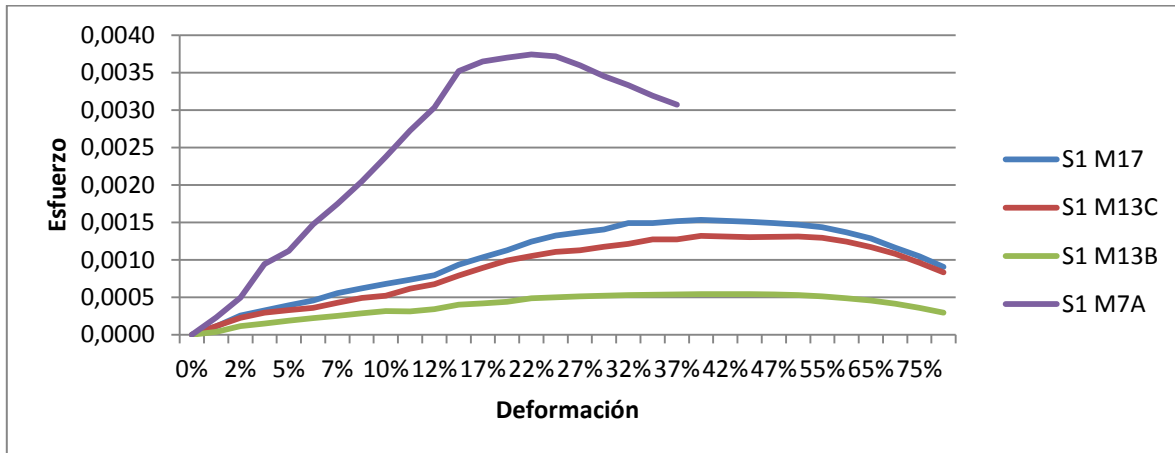


Figura 65: Resistencia a la compresión inconfiada en el sondeo 1.

8.3.2 Sondeo 2

En el sondeo 2 se presenta una situación similar a la del sondeo 1, el área transversal aumenta proporcionalmente con la carga aplicada, hasta que se produce la falla transversal, indicando que es un material plástico y frágil, debido a que su punto de falla se encuentra entre el 20% y el 40%.

En la figura 66, se muestra que en la muestra más superficial la fuerza que se debe aplicar es mayor, sin embargo hay que tener en cuenta que el sondeo 2 se realizó en presencia de vegetación, lo que hace que los contenidos de humedad sean variables, sobre todo hacia la superficie.

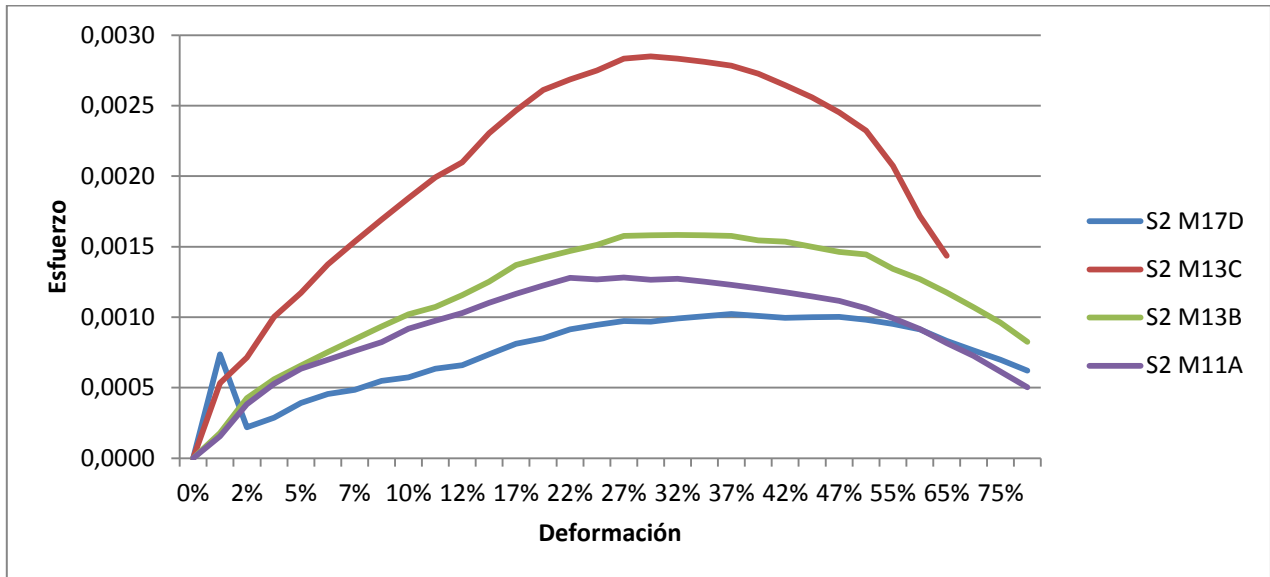


Figura 66: Resistencia a la compresión inconfiada Sondaje 2

8.3.3. Comparación sondeos

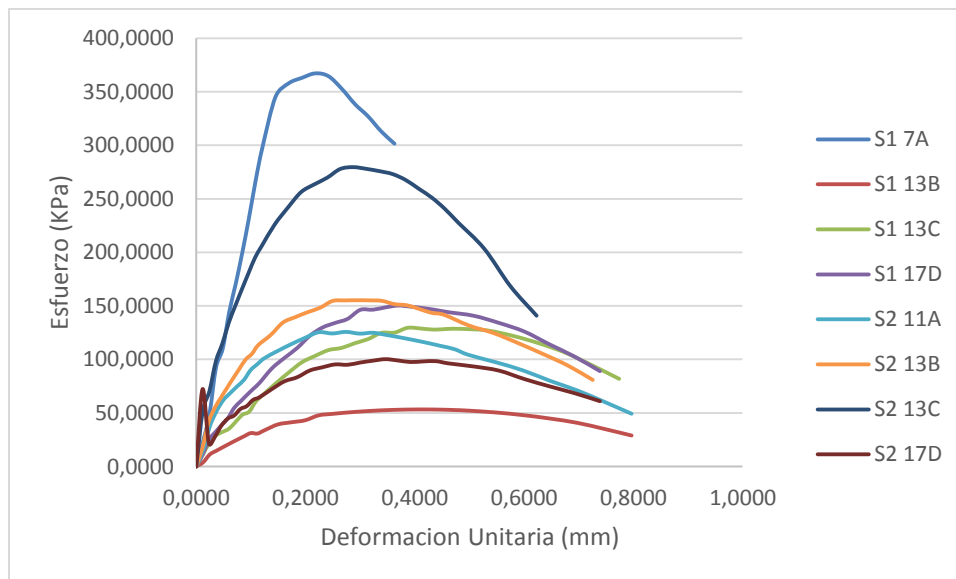


Figura 67: Resistencia a la compresión inconfiada Sondaje 1 y 2



Al observar la gráfica anterior se puede decir que la resistencia a la compresión es mayor en el primer sondeo en los primeros metros, pero luego al observar las muestras más profundas, el segundo sondeo comienza a tener una resistencia mayor a la compresión que el primero. Este comportamiento se puede deber a la mayor rigidez del suelo en el segundo sondeo por la gran pérdida de agua.

8.3.4. Relación de compresión con succión

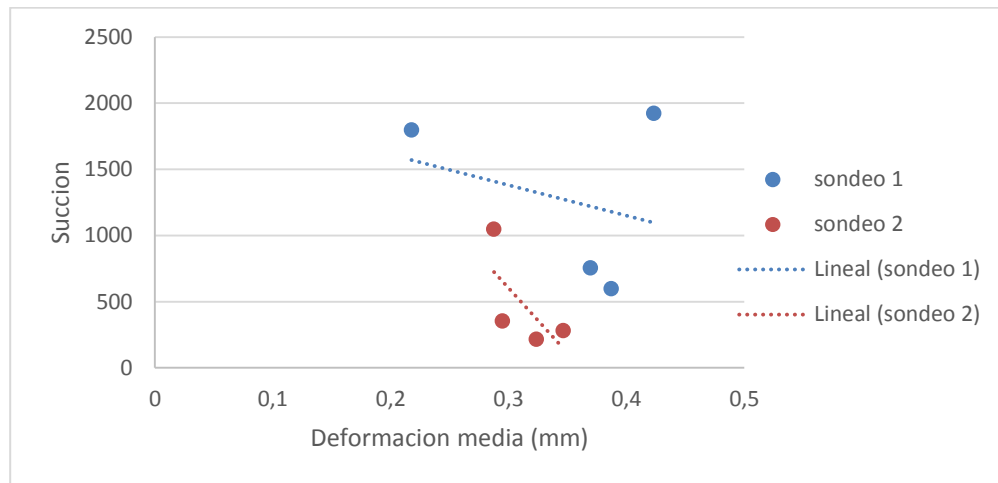


Figura 68: Succión vs Deformación Unitaria máxima Sondeo 1 y 2

En la gráfica 68 se observa como a medida que la succión disminuye el material aumenta su deformación, en las arcillas el aumento descontrolado de succión puede generar una deformación que puede llegar a ser irrecuperable.

Al comparar los dos sondeos se puede observar que la pendiente del sondeo dos es mayor que la del primer sondeo, lo cual muestra que el aumento de la deformación con respecto a la succión es menor en el sondeo dos.

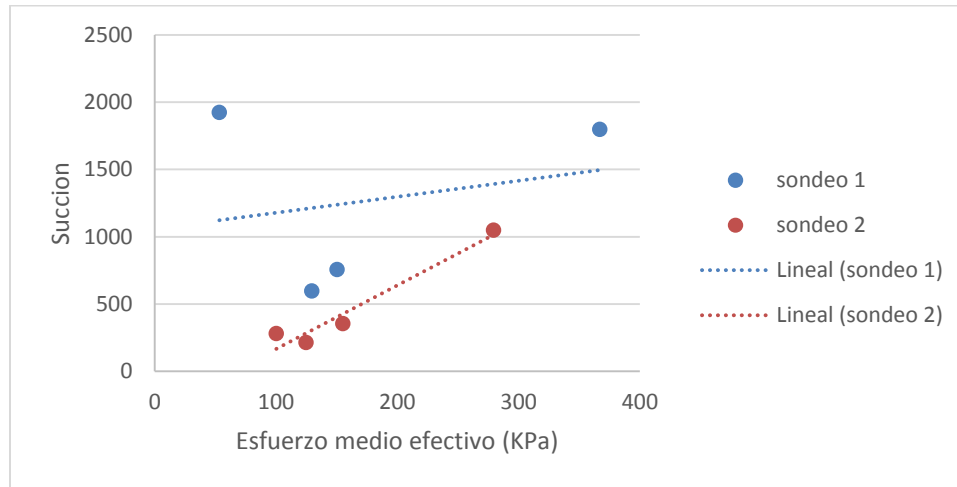


Figura 69: Esfuerzo máximo vs Deformación Unitaria máxima
Sondeo 1 y 2

El esfuerzo medio efectivo aumenta al aumentar la succión en el suelo, puesto que a mayor succión se genera un endurecimiento al material arcilloso, aportándole consistencia y rigidez a la masa arcillosa, la cual aumenta la resistencia a la compresión y por ende el esfuerzo debe ser mayor.

8.4 Triaxiales

Para la realización de este ensayo, se contó con la participación de la empresa Suelos y Pavimentos Gregorio Rojas y Cia LTDA, se analizaron dos muestras una de cada sondeo (S1-9 y S2-9), y por cada muestra se tomaron tres puntos para lograr más certeza en los resultados.

Por medio de este ensayo, se obtienen los siguientes datos:

- Ángulo de cohesión interna (Φ)
- Cohesión no drenada del suelo (C_u)
- Cohesión (c)



Los datos obtenidos por cada muestra analizada se encuentran en el anexo 9.

8.4.1 Sondeo 1

Para el sondeo 1 se tomó la muestra No. 9, que corresponde a una arcilla color gris con una humedad del 56 %, al hacer el ensayo para los tres puntos se obtienen los siguientes esquemas de rotura:

Punto 1	Punto 2	Punto 3
<p>Esquema de falla</p>	<p>Esquema de falla</p>	<p>Esquema de falla</p>
<p>En este esquema se puede observar que la falla es en toda la sección transversal de la muestra, lo que indica que la muestra tenía una humedad homogénea y es de consistencia blanda.</p>	<p>En este esquema se observa que la falla se produjo transversalmente, tiene una consistencia un poco más dura que en el primer punto.</p>	<p>En este esquema se observa que la falla se produce lateralmente y no cubre toda la sección transversal de la muestra, posee una consistencia más blanda que la segunda y más dura que la primera.</p>

Figura 70: esquemas de falla sondeo 1

Como resultado de la prueba realizada se obtiene la curva de esfuerzo vs deformación y la curva de presión de poros vs deformación que se muestran en la figura 71.

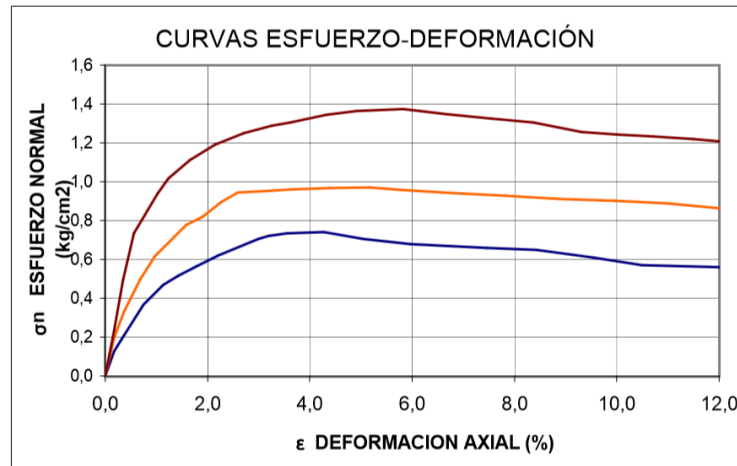


Figura 71: Curva esfuerzo vs Deformación, Sondeo 1, Muestra 9 (Ensayo Triaxial)

En la figura 72, se observa que el material de la muestra 9 sometida a los continuos esfuerzos presenta una deformación muy grande, en los tres puntos analizados, esto corrobora que se trata de un material muy blando.

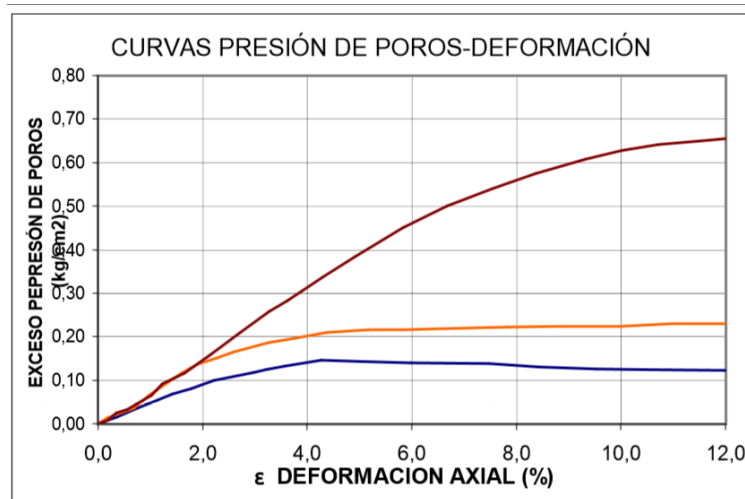


Figura 72: Curvas de presión de poros vs deformación (Ensayo Triaxial)



8.4.2 Sondeo 2

Para este sondeo se tomó la muestra N. 9 que corresponde a una arcilla limosa color gris con algo de oxidaciones y posee una humedad relativa de 66%, se hicieron tres puntos, cuyos resultados se muestran en el anexo 8, a continuación se muestran los esquemas de falla que resultan después de realizado el laboratorio.




Punto 1	Punto 2	Punto 3
Esquema de falla 	Esquema de falla 	Esquema de falla 
En este punto se presenta una falla transversal de derecha a izquierda, esto indica que el suelo es homogéneo y al fallar se forma la diagonal.	En este punto se presenta una falla transversal de izquierda a derecha, contrario a lo que sucede en el punto 1. Sin embargo, el suelo sigue siendo homogéneo y al fallar se forma la diagonal.	En este punto se presenta una falla transversal de izquierda a derecha, esto indica que el suelo es homogéneo y al fallar se forma la diagonal.

Figura 73: esquemas de falla sondeo 2

Para este caso la figura 74, representan las curvas de esfuerzo vs deformación y presión de poros vs deformación

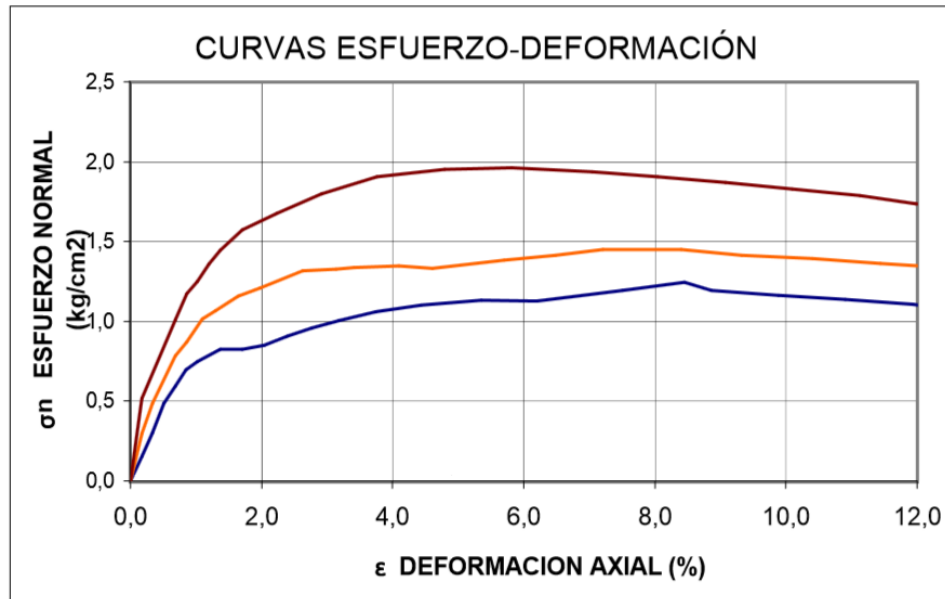


Figura 74: curvas de esfuerzo vs deformación (Ensayo Triaxial)

En el sondeo 2, a medida que la profundidad aumenta, requiere de menos esfuerzo para lograr la falla, esto indica una desecación que se acentúa en la parte superficial del sondeo, teniendo en cuenta que este sondeo se ubica en la zona con presencia vegetal alta, se puede decir que el consumo de agua que mantienen los árboles desnivela los contenidos de humedad que se va nivelando con la profundidad, haciendo que el suelo sea más blando.

Sin embargo, en la figura 75 se muestra que para la muestra más superficial se presenta una presión de poros que hace que la falla no se presente tan pronto como en las muestras más profundas.

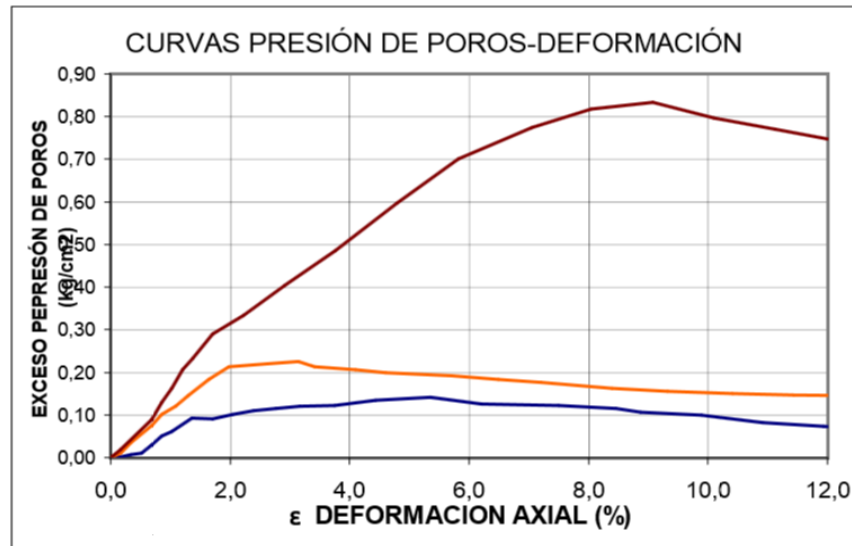


Figura 75: curvas de presión de poros vs deformación

8.5 Refracción Sísmica

El ensayo de refracción sísmica, es un método para hallar velocidad de onda cortante, para la realización de este procedimiento, se contó con la participación de JEOPROBE y la utilización de los siguientes elementos:

ÍTEM	CANTIDAD
Geófonos (4.5 Hz)	24
Cables	2
Sismógrafo	1
Computador	1
Batería (12 V)	1
Martillo (20 kg)	1

El procedimiento que se siguió, se describe en el anexo 6.

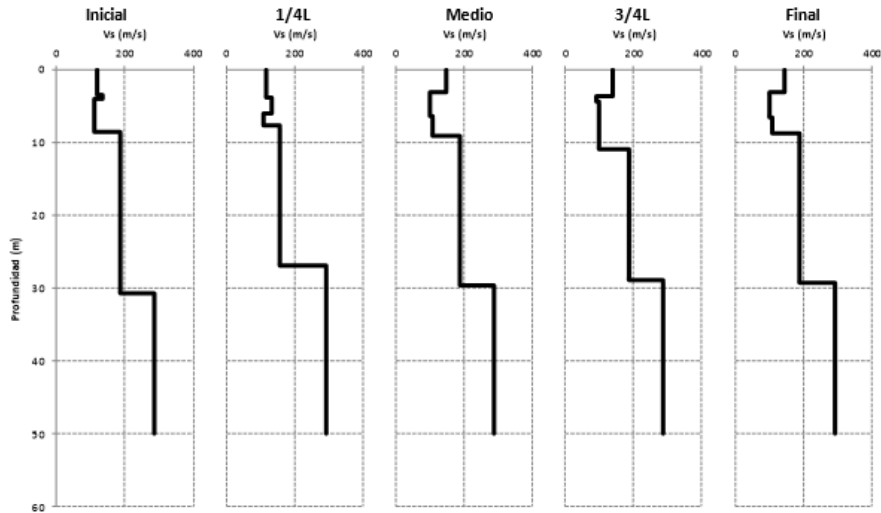
**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



La línea de refracción sísmica da un panorama general de la respuesta que pueden tener los suelos frente a movimientos repetitivos como sismos, para ello se calcula la velocidad de onda cortante (v_s), generando escenarios controlados.

Los resultados arrojados por este ensayo, indican el suelo encontrado en el área de trabajo, en la vía Tenjo-Bogotá al Occidente de la Sabana de Bogotá, se encuentra ubicado en el tipo de suelo E, según lo indica la norma NSR10 que corresponde a arcillas blandas, en donde la velocidad de onda se encuentra inferior a 180m/s, pero a menudo que aumenta la profundidad el suelo cambia sus propiedades y la velocidad de onda (V_s), aumenta progresivamente hasta los 290 m/s, lo que indica que el suelo aumenta su dureza, en la zona desecada se presenta una velocidad más baja que en una zona con una humedad normal, esta tendencia se debe a que la onda encuentra más resistencia para difundirse que en un estrato en donde el suelo sea relativamente homogéneo y blando.

El perfil bidimensional obtenido de esta prueba no destructiva es el mostrado en la figura 76



PERFIL BIDIMENSIONAL DE Vs

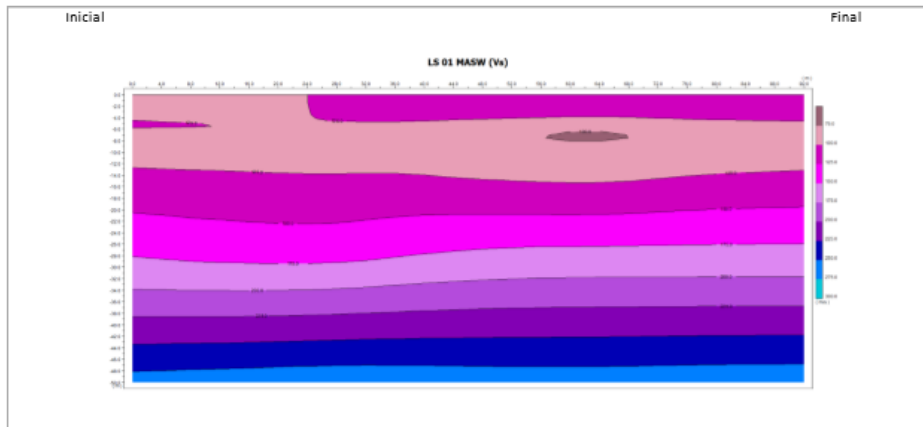


Figura 76: líneas de refracción sísmica (JEOPROBE)

8.6 Síntesis del capítulo

En el capítulo anterior se describieron y analizaron los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio durante el desarrollo del proyecto de arcillas.

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



La composición del suelo de esta zona está en su gran mayoría de Illita, lo que hace que tenga propiedades arcillosas, que igualmente reaccionan negativamente con las características del terreno y del ambiente que se mantiene al Occidente de la Sabana de Bogotá, creando los procesos de desecación que afectan la funcionalidad de la vía y las estructuras presentes.



9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos todos los resultados de los estudios realizados a las muestras extraídas, se encuentra que el material presente es un compuesto formado por capas de silicatos y aluminatos, es decir arcilla. Según la ubicación de la zona de muestreo y las descripciones dadas en los capítulos 2 y 3, el contenido de agua que posee el suelo es muy elevada, por esa razón la humedad en muchas de las muestras supera el 200%.

Tomando en cuenta lo anterior, junto con las descripciones dadas en campo, el índice de plasticidad es bastante elevado, lo que se ve reflejado en los resultados obtenidos de los ensayos de límites de Atterberg y de azul de metileno, en especial en los estratos superiores, esto debido a que la presencia vegetal de la zona.

Al tener alta plasticidad, la resistencia del suelo es menor y la compresibilidad mayor, ya que al someterla a esfuerzos axiales el agua que contiene la muestra se desplaza hacia los vacíos presentes haciendo que pierda su volumen inicial.

Teniendo los datos anteriores, se creó una estratigrafía que muestra que el suelo posee grietas profundas, causadas por los cambios continuos de volumen que sufre el suelo, como resultado de las variaciones en la humedad, condiciones propias de un suelo desecado.



10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Occidente de la Sabana de Bogotá, pertenece a una zona que presenta cambios drásticos de temperatura en cuestión de horas, lo que comúnmente se conoce como microclimas, esta es una de las condiciones que hacen que el terreno tenga cambios volumétricos y favorezca la formación de grietas en el suelo.
- La composición mineralógica que presentan las muestras extraídas en los dos sondeos, corresponden a un gran porcentaje de Illita y Montmorillonita, minerales que son altamente expansivos y que responden de manera casi inmediata al contacto con el agua.
- El sondeo 1 realizado lejos de presencia arbórea lo que hace que la saturación que se presente sea un poco más variable que en el sondeo 2, ya que este último fue realizado justo en un punto en donde la vegetación foránea es bastante fuerte y tienen un consumo de agua mayor al normalmente acostumbrado.
- Los asentamientos que se presentaron en las muestras son elevados y demorados, ya que el material arcilloso presente en la zona de estudio al Occidente de la Sabana de Bogotá, absorbe altos contenidos de humedad que por la poca permeabilidad, el agua se no fluye de forma que se compacte fácilmente.
- Las muestras extraídas y analizadas en el laboratorio demuestran que el terreno estudiado posee humedades, incluso superiores al 200%, con cambios marcados en los dos sondeos, ya que el primero no presentaba un consumo tan elevado como en el segundo, en el cual el nivel de



consumo de agua es mucho mayor debido a la presencia de vegetación que no pertenece a la zona.

- Los límites de Atterberg que se obtuvieron en los laboratorios, representa de forma coherente las condiciones de desecación y agrietamientos a niveles profundos, ya que los niveles tanto de plasticidad como de liquidez poseen cambios drásticos, de aumento y disminución, conforme aumenta la profundidad del sondeo.
- Los ensayos mecánicos realizados a las muestras, demuestran que en las zonas más superficiales de los sondeos realizados, se ven sometidos a problemas de desecación, causantes de diferentes patologías que sufre la vía.
- El material encontrado corresponde a arcillas con altos contenidos de humedad, lo que hace que el material sea blando y expansivo por su alto contenido de illitas y montorillonitas, que son elementos que reaccionan con el agua y aumentan su volumen.
- El ensayo de composición realizado FRX, mostró que el suelo tenía altos contenidos de óxido de azufre, que debilitan la estructura de composición del suelo, estos elementos vienen de las actividades agrícolas y de las generadoras de energía.
- La alta plasticidad que posee el suelo se debe al elevado contenido de materia orgánica que presentan las muestras analizadas y que hacen que pierda resistencia a la compresión.
- El suelo de la zona de estudio, presenta condiciones elevadas de desecación, que produce daños en la vía y hacen que pierda

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ**



funcionalidad y la carpeta asfáltica sufra diferentes patologías como ondulaciones, piel de cocodrilo, agrietamiento superficial, hundimientos, entre otras.



BIBLIOGRAFÍA

- APONTE GONZALES, Javier Alexander; Evaluación De Métodos No Convencionales De Caracterización Geotécnica; Pontificia Universidad Javeriana, 2011.
- BESOAIN, Eduardo; Mineralogía De Arcillas De Suelos – San Jose De Costa Rica: IICA, 1985.
- BLANCO RODRÍGUEZ, Marvin e MATUS LAZO Iván; Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad De Tecnología De La Construcción Departamento De Construcción; Guía De Mecánica De Suelos I
- BRADLEY, W. F. The Structural Scheme Of Attapulgite
- Especificaciones Tecnicas Invias, Facultad Ingenieria Civil; Unicauca.
- GOMEZ TUBIO, Blanca; ANGLE RESPALDIZA, Miguel, Y PARDO RODRIGUEZ, M Luisa; III Congreso Nacional De Arqueometria; Universidad De Sevilla.
- Instituto De Ciencia De Materiales De Madrid; Consejo Superior De Investigaciones Científicas, Laboratorio De Microscopía Fe-Sem
- JOHN ATKINSON, An Introduction To The Mechanics Of Soils And Foundations
- Laboratorio Técnicas Instrumentales Uva; Análisis Químicos, Difractometria De Rayos X Monocristal.
- Laboratorio De Microscopia Electronica Uami; Facultad De Ingenieria Civil Y Geologia Uami



- LEONI, Augusto; GEOTECNIA III “Introducción al Estado Crítico en Suelos”, Universidad Nacional De La Plata
- LOBO-GUERRERO USCÁTEGUI, Alberto, Geólogo, M.Sc. Gerente, LOBO-GUERRERO GEOLOGÍA, Descenso de Niveles de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá, Sociedad Colombiana de Ingeniería
- LOBOGUERRERO A, Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros. 1992.
- MORA ARDILA, Liliana Andrea. Corredor Industrial de Occidente, Nuevo modelo de industrialización- urbanización- regionalización sobre la autopista Medellín. Tesis de Maestría en Urbanismo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- NORMA; MoDOT TM 79 AASHTO T 89 & T90 Plasticity Index (Aggregate Specific)
- Oscar Javier Reyes Ortiz, Javier Fernando Camacho Tauta, Iván Morantes Ciencia e Ingeniería Neogranadina, núm. 13, julio, 2003, pp. 31-40, Universidad Militar Nueva Granada Colombia
- OSORIO, Liliana y ORTIZ, German, Identificación De Los Elementos De Gestión Para Un Desarrollo Sostenible Del Recurso Agua Subterránea, En Las Veredas El Chacal, Jacalito Y Carrasquilla Del Municipio De Tenjo (Cundinamarca), 2008.
- Plan de Ordenamiento Territorial Tenjo, Oficina de Planeación de Tenjo 2012
- Plan de Manejo Ambiental de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica.
- PINEDA J. y COLMENARES J.E. (2006). Influence of desiccation on volumetric behavior of Bogota Clay. Proceedings of XIII Panamerican



Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Editors:
Sociedad Venezolana de Geotecnia.

- PINEDA, J. (2003). Comportamiento volumétrico de arcillas de la Sabana de Bogotá en procesos de secado. Tesis para optar al título de Magíster en Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- RUEDA, M. y PINEDA, J. (2011). “Patologías asociadas a desecación en pavimentos del sector Siberia-Tenjo, al occidente de la Sabana de Bogotá”. XVIII Simposio de Ingeniería de Pavimentos. Cartagena, Colombia. Secretaría de Agricultura de Cundinamarca 2010- CEPEC Universidad del Rosario.
- SAINZ, José Angel, Análisis numérico bidimensional primaria de arcillas blandas saturadas, 1979.
- TABORA Ruíz Andrés y Calderón Yolanda, Hidrología y Clima de la Sabana de Bogotá, Volumen IV. Bogotá. Diciembre 2004. p. 4.
- VALENTINUZZI, María Cecilia; Analisis Por Fluorescencia De Rayos X: Implementacion De Guías De Haces En Reflexion Total, Universidad Nacional De Cordoba. 2008.
- VILLAMIZAR, Alexis y DIAZ, José, Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de corte directo y comprensión simple para arenas arcillosas, 2010