

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN
REPOSO “ K_o ”, PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE LA
SABANA DE BOGOTÁ D.C.**

DILAN EDUARDO ARIAS MONTAÑEZ

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director del Proyecto de Grado

ING. JORGE ARTURO PINEDA JAIMES



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE CENTRAL BOGOTÁ D.C

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2015

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	GENERALIDADES	1
1.2.	OBJETIVO.....	1
1.2.1.	General.....	1
1.2.2.	Específico	2
1.3.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
2.	MARCO CONCEPTUAL DEL COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO K_0	4
2.1.	COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO	4
2.1.1	PERFIL DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO	13
2.1.2	PROFUNDIDAD DE AGRIETAMIENTO	15
2.1.3	TEORIA ELÁSTICA	17
2.1.4	CÍRCULO DE MOHR Y TEORÍA DE RANKINE	20
2.2	EXPRESIONES QUE DEFINEN K_0	21
2.2.1	Estimación de K_0 en Laboratorio	22
3.	DETERMINACIÓN DE K_0 A PARTIR DE MEDICIÓN DE SUCCIÓN EN ARCILLAS.....	28
3.1.	DEFINICIÓN DE SUCCIÓN EN SUELOS	28
3.2.	REPRESENTACIÓN FÍSICA DE LA SUCCIÓN EN UN SUELO	32
3.3.	MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN DEL SUELO	34
3.3.1.	Método del Papel Filtro.	37
3.3.2.	CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA	41
4.	PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO USADOS EN LA INVESTIGACIÓN	45
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	45
4.1.1.	Descripción Geológica de la zona de estudio.....	49
4.1.2.	Estratigrafía del Cretácico superior del occidente de la sabana de Bogotá D.C.	51
4.1.3.	Exploración de Subsuelo	52
4.1.4.	Mineralogía, Composición Química y Descripción del Perfil Estratigráfico del Subsuelo..	52
4.2.	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MATERIAL ARCILLOSO	58
4.2.1.	Propiedades Índice del Material Arcilloso	58
4.2.2.	Distribución del tamaño de los granos.	72
4.3.	COMPRESIBILIDAD EN LA ARCILLA ENCONTRADA.....	74
4.3.1.	Ensayos de consolidación unidimensional.....	74

4.3.2.	Relaciones de Sobreconsolidación.....	76
4.4.	DETERMINACIÓN DE SUCCIÓN MATRICIAL.....	79
4.4.1.	Preparación de muestras utilizadas para medición de succión matricial.....	80
4.4.2.	Procedimiento para medir succión matricial en laboratorio.....	81
4.4.3.	Relación Muestra - Succión.....	88
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109
5.1.	PROPIEDADES ÍNDICE.....	109
5.2.	COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA.....	112
5.2.1.	Comparación de las curvas de retención de agua	115
5.3.	APLICACIÓN DE EXPRESIONES QUE DEFINEN EL COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO K_o	117
5.3.1.	Determinación del coeficiente K_o para arcillas sobreconsolidadas (SC)	118
5.3.2.	Determinación del coeficiente K_o para las arcillas del occidente de la sabana de Bogotá D.C teniendo en cuenta la succión matricial ($U_a - U_w$).....	124
5.3.3.	Comparación de los valores obtenidos del coeficiente K_o	129
6.	CONCLUSIONES	131
7.	REFERENCIAS.....	135
8.	ANEXO I	140
9.	ANEXO II	153
10.	ANEXO III	165
11.	ANEXO IV	204

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2.

Figura 2- 1. Perfil de esfuerzos geostáticos <i>in situ</i> , condiciones:(a) esfuerzo normal vertical; (b) esfuerzo normal horizontal. (Tomada de Fredlund <i>et al</i> 2011).	6
Figura 2- 2 Relación entre el coeficiente de presión de tierras en reposo K_o y succión matricial. (Tomada de Fredlund <i>et al.</i> 2011).	8
Figura 2- 3. (a) Esfuerzo efectivo horizontal para varios esfuerzos efectivos verticales. (b) Coeficiente de presión de tierras en reposo con cambio en la sobrecarga de esfuerzos para suelos saturados (Tomada de Fredlund <i>et al.</i> 2011).	10
Figura 2- 4. Relación entre el ángulo de resistencia ϕ' y el coeficiente de presión de tierras en reposo K_o . (Tomada de Fredlund <i>et al.</i> 2011).	11
Figura 2- 5. Perfil de K_o representativo para un depósito de 10 m de suelo arcilloso. (Tomado de Lu y Likos (2004).	14
Figura 2- 6. Ilustración conceptual de grietas de tensión desarrollada en un suelo parcialmente saturado. (Tomado de Lu y Likos 2004).	15
Figura 2- 7. Profundidad estimada de grietas de tensión de suelo superficial bajo condiciones hidrostáticas en 5 m para un suelo parcialmente saturado. Donde “ α ” es un parámetro hidrológico ligado con modelos de conductividad hidráulica y “ n ” está ligado a la distribución de poros del suelo. (Tomada de Lu y Likos 2004).	16
Figura 2- 8. Envolvente de falla para la variación del esfuerzo principales menor. (Tomada de Martínez y Rodríguez (2003).	20
Figura 2- 9. Prisma de Material granular. Tomado de Radoslaw, y Michalowski, (2005).	23
Figura 2- 10. Estados de esfuerzos que definen el valor del parámetro A. Fuente: Martínez y Rodríguez (2003).	27

Capítulo 3

Figura 3- 1. Agua intersticial presente en los suelos, A) suelos granulares, B) suelos finos. (Tomada de Suarez y Suarez (2005).	32
Figura 3- 2. Modelo físico de succión matricial (Tomado de Ridley 1996).	32
Figura 3- 3. Resumen de técnicas de laboratorio y campo para medición de succión en suelos. (Tomada de Lu y Likos 2004).	35
Figura 3- 4. Esquema Típico de Tensiómetros. A. Tensiómetro con manómetro de mercurio. B. Tensiómetro medidor de vacío. C. Tensiómetro con transductor electrónico. Tomado de Ridley (1996).	36

Figura 3- 5. Esquema del funcionamiento de un elemento separador utilizado en la técnica de control de succión por traslación de ejes. Tomado de Hoffmann (2005).	36
Figura 3- 6. Montaje de muestra de suelo para medición de succión con papel filtro.	39
Figura 3- 7. Esquema típico de una Curva de retención. (Tomada de Fredlund, 1994).	42
Figura 3- 8. Curvas de retención de agua típicas para un suelo fino en secado y Humedecimiento. Efecto de Histéresis para un mismo contenido de humedad. Pineda (2003).	45

Capítulo 4

Figura 4- 1. Localización de zona de extracción de muestras y de los Sondeos 1 y 2, Coordenadas Este/Norte: 990951/1020312 – Este/Norte: 991003/1020388. Sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS de los orígenes de la zona de proyección <i>Gauss Kruguer</i> en Colombia. Fuente: Google Earth.	
Figura 4- 2. Problemas de fisuramiento y asentamiento en las vía de estudio.	40
Figura 4- 3. Problema de inestabilidad y fisuramiento en la vía de estudio a causa de los arboles presentes en la zona.	48
Figura 4- 4. Localización de la Sabana de Bogotá D.C y sus vías principales. Tomada de Ingeominas (2005).	50
Figura 4- 5. Sinclinal de Subachoque, formando el valle, aflora formación de Guaduas y hacia los flancos las unidades del grupo Guadalupe. Tomada de Ingeominas (2005).	50
Figura 4- 6. Sección estratigrafía generalizada y esquemática del Cretácico superior del Occidente de la Sabana de Bogotá D.C. Tomada de Ingeominas (2005).	51
Figura 4- 7.	62
Figura 4- 8. Perfil de Límite Líquido para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.	64
Figura 4- 9. Perfil de Límite Plástico para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.	65
Figura 4- 10. Perfil de IP para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.	66
Figura 4- 11. Perfil del límite de contracción para la arcilla sondeos 1 y 2.	67
Figura 4- 12. Perfil de Peso Unitario Húmedo para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.	69
Figura 4- 13. Ubicación de las Muestras en la Carta de Plasticidad, para el sondeo uno y dos.	71
Figura 4- 14. Curvas Granulométricas para cada muestra.	74
Figura 4- 15. Perfil obtenido para la RSC, Sondeos 1 y 2.	78
Figura 4- 16. Papel Whatman # 42.	81
Figura 4- 17. Pasos para la colocación del papel filtro a la muestra de suelo.	85
Figura 4- 18. Espécimen de suelo envuelto en bolsa de cierre hermético, papel vinipel, y papel de aire sellado.	85
Figura 4- 19. Almacenamiento de muestras en nevera de icopor (Izq.) junto a medidor de temperatura y humedad de la cámara hermética.	86
Figura 4- 20. Determinación de humedad del papel filtro.	87
Figura 4- 21. Succión inicial Vs profundidad para los sondeos uno (1) y dos (2).	94
Figura 4- 22. Curvas de retención de agua para el sondeo 1 (sin ajustar).	95
Figura 4- 23. Curvas de retención de agua para el sondeo 2 (sin ajustar).	96
Figura 4- 24. Variación del parámetro a_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v	99
Figura 4- 25. Variación del parámetro n_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v	100
Figura 4- 26. Variación del parámetro m_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v	101
Figura 4- 27. Modelación de la SWCC experimental S1-M3.	103
Figura 4- 28. Modelación de la SWCC experimental S1-M11.	103

Figura 4- 29. Modelación de la SWCC experimental S1-M15.....	104
Figura 4- 30. Modelación de la SWCC experimental S1-M19.....	104
Figura 4- 31. Modelación de la SWCC experimental S1-M25.....	105
Figura 4- 32. Modelación de la SWCC experimental S1-M29.....	105
Figura 4- 33. Modelación de la SWCC experimental S2-M5.....	106
Figura 4- 34. Modelación de la SWCC experimental S2-M11.....	106
Figura 4- 35. Modelación de la SWCC experimental S2-M15.....	107
Figura 4- 36. Modelación de la SWCC experimental S2-M29.....	107
Figura 4- 37. Modelación de la SWCC experimental Sondeo uno (1).	108
Figura 4- 38. Modelación de la SWCC experimental Sondeo dos (2).....	108

Capítulo 5

Figura 5- 1. Límites de consistencia del suelo para Sondeos uno (1) y dos (2).....	111
Figura 5- 2. Perfiles de K_o para los sondeos 1 y 2 según ecuaciones (2.13) Tavenas y (2.15) NSR-10	
Figura 5- 3. Esfuerzo vertical efectivo y esfuerzo de preconsolidación Vs profundidad para los sondeos uno y dos en ambos sentidos (vertical y horizontal).....	123
Figura 5- 4. Coeficiente X en función del grado de saturación para hallar esfuerzo efectivo vertical teniendo en cuenta la succión matricial. Tomado de Fredlund (1994).	124
Figura 5- 5. Perfiles de esfuerzos efectivos verticales efectivos (a) y valores de $K_o(b)$ para los sondeos 1 y 2	128
Figura 5- 6. Valores para K_o para épocas inicial y final del año para ambos sondeos.....	134
Figura 5- 7. Perfiles de K_o para una arcilla superficial del occidente de la sabana de Bogotá D.C.	130

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2- 1. Resultado de ensayos para la determinación de K_o en Arcillas Bishop (1961), y Simons (1958). (Tomado de Fredlund <i>et al.</i> 2011)	12
---	----

Capítulo 3

Tabla 3- 1. Resumen de Calibraciones Realizadas para los principales Tipos de Papel de Filtro Para la medición de succión en suelos. Tomada de Pineda (2003).....	40
Tabla 3- 2. Métodos de Medición de Succión. Tomada de Ridley (1996).	41

Capítulo 4

Tabla 4- 1. Mineralogía de la Arcilla encontrada, a través del ensayo de fluorescencia de rayos X.....	55
Tabla 4- 2. Perfil del subsuelo encontrado en la vía Siberia – Tenjo para el Sondeo No 1.	56
Tabla 4- 3. Perfil del subsuelo encontrado en la vía Siberia – Tenjo para el Sondeo No 2.	57
Tabla 4- 4. Cuadro de ensayos ejecutados Vs norma aplicado del Instituto Nacional de Vías. Fuente: propia.	59
Tabla 4- 5. Tabla resumen propiedades índice del material arcilloso.	60
Tabla 4- 6. Clasificación del Material Arcilloso.	70
Tabla 4- 7. Actividad de los suelos arcillosos. (Tomada de Skempton, 1953).	73
Tabla 4- 8. Fracción arcillosa para la profundidad seleccionada de suelo del sondeo 1 y 2.	73
Tabla 4- 9. Esfuerzos de preconsolidación obtenidos a partir de ensayos de consolidación unidimensional rápida.	75
Tabla 4- 10. Relaciones de Sobreconsolidación para los sondeos 1 y 2.	77
Tabla 4- 11. Muestras Talladas para medir Succión Matricial.	80
Tabla 4- 12. Calibración de papel filtro para la determinación de succión matricial. Tomada de Dinnen (1997).	82
Tabla 4- 13. Valores de succión matricial por punto para S1-M3	88
Tabla 4- 14. Valores de succión matricial por punto para S1-M11	89
Tabla 4- 15. Valores de succión matricial por punto para S1-M15	89
Tabla 4- 16. Valores de succión matricial por punto para S1-M19	89
Tabla 4- 17. Valores de succión matricial por punto para S1-M25	90
Tabla 4- 18. Valores de succión matricial por punto para S1-M29	91
Tabla 4- 19. Valores de succión matricial por punto para S2-M5	91
Tabla 4- 20. Valores de succión matricial por punto para S2-M11	91
Tabla 4- 21. Valores de succión matricial por punto para S2-M15	92
Tabla 4- 22. Valores de succión matricial por punto para S2-M23	92
Tabla 4- 23. Parámetros obtenidos de la modelación de las SWCC experimentales junto a las propiedades del suelo	102

Capítulo 5

Tabla 5- 1. Relación entre el límite líquido y el valor de entrada de aire para diferentes tipos de suelo. Tomada de Fleureau <i>et al</i> , (1993).	114
Tabla 5- 2. Valores de AEV y Límite líquido hallados para la arcilla del occidente de la sabana de Bogotá.	115
Tabla 5- 3. Algunas Expresiones para el coeficiente de presión de tierras en reposo.	117
Tabla 5- 4. Valores de K_o para las ecuaciones 2-13 y 2-15	120
Tabla 5- 5. Datos para K_o Teniendo en cuenta la succión matricial inicial del suelo.	127
Tabla 5- 6. Valores de K_o estimados para épocas iniciales y finales del año para ambos sondeos.	133

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Santo Tomás por permitir un espacio para la investigación y el desarrollo de nuevos conceptos aplicados a la Ingeniería civil. Igualmente al investigador principal Ing. Jorge Pineda por brindar su apoyo intelectual durante todo el proceso, así mismo a mis compañeros de investigación Laura, Sebastián, Diego, y Mauricio deseando lo mejor en su vida profesional, y otros como el Ing. Andrés cruz, Ing. Livaniel, Juan Carlos Sánchez por su acompañamiento y colaboración desinteresada. Para ellos mil gracias.

Gracias Mamá por tu eterno acompañamiento y por perseverar tanto en este camino que nos ha puesto la vida.

Promesa Cumplida Mi Viejo, Mi querido Viejo...

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La presente investigación busca determinar el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo “ K_o ”, para los suelos arcillosos lacustres superficiales del occidente de la sabana de Bogotá, el cual es un parámetro aún no evaluado para este tipo de materiales, los cuales están sometidos a elevadas pérdidas de humedad debida a procesos de desecación causados por aumentos en la succión matricial del mismo, la vegetación presente en la zona (árboles en su mayoría pinos) y el clima. A su vez, se hace un análisis de la variación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_o , en función de las condiciones de humedad y profundidad a las que fue determinado, esto es dado a partir de la aplicación del método de papel filtro para determinar succión matricial, junto con ensayos de consolidación unidimensional realizados en direcciones horizontales y verticales. Los resultados mostrarán la relación entre el contenido de humedad y el estado de esfuerzos de los materiales, con el fin de complementar los datos que permitirán una modelación del problema y un entendimiento racional del agrietamiento de los suelos arcillosos y sus consecuencias sobre estructuras livianas como vías y cimentaciones superficiales.

1.2. OBJETIVO

1.2.1. General

Determinar experimentalmente el coeficiente de presión lateral de tierras en reposo K_o para los suelos arcillosos del occidente de Bogotá D.C.

1.2.2. Específicos:

- Determinar el esfuerzo de pre-consolidación de las arcillas mediante ensayos de consolidación unidimensional.
- Determinar el coeficiente de presión lateral de tierras en reposo (K_o) a partir de curvas de retención de agua halladas experimentalmente.
- Realizar el análisis comparativo de los valores del coeficiente lateral de tierras en reposo (K_o), deducidos experimentalmente.

1.3.ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación pretende usar la mecánica de suelos aplicada a suelos parcialmente saturados, para la determinación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo " K_o ", que depende en gran medida de los notables cambios de humedad que presente el suelo en estudio (que se encuentra por encima del nivel freático), mediante la evaluación y pertinente utilización de las curvas de retención de agua, a su vez, a partir de ensayos de consolidación unidimensional del suelo arcilloso del occidente de Bogotá.

Martínez y Rodríguez (2003) afirman que:

Estas curvas de retención expresan las relaciones existentes entre el contenido de agua de la masa de suelo y la presión de poros negativa generada en los vacíos inter-granulares presentes en la masa de suelo; esta presión de poros negativa se da por la diferencia entre la presión atmosférica y la presión del agua contenida en los poros de la masa de suelo y se conoce como *succión matricial*, que dentro del presente trabajo de laboratorio se puede medir por medio del ensayo del papel de filtro ya que es un método de bajo costo.

Posterior a la determinación de las curvas de retención de agua en función de la succión matricial y humedad. Hallamos K_o para la profundidad del suelo en estudio. Los resultados obtenidos anteriormente se comparan con valores de K_o hallados a partir de ensayos de consolidación unidimensional; donde K_o se obtendrá de la relación del esfuerzo de preconsolidación horizontal con el esfuerzo de preconsolidación vertical para diferentes profundidades del suelo en estudio. Los anteriores resultados permitirán concluir que tanto está variando K_o , y que incidencia tiene una variable como la succión matricial en la determinación del mismo.

En Colombia se han realizado pocos estudios que tienen como objeto determinar K_o para un suelo en consideración, algunos de estos autores son: Vaca y Martínez (2005), Martínez y Rodríguez (2003), quienes investigaron suelos lacustres del norte y centro de la ciudad de Bogotá, sin embargo aún es objeto de investigación establecer valores de K_o para los suelos parcialmente saturados que se encuentran al occidente de la sabana de Bogotá afectados por fenómenos como la desecación, y que no se ha tenido en cuenta por los anteriores investigadores.

Complementario a la presente investigación se ha planteado realizar un cuadro comparativo de los K_o hallados por diferentes métodos y que permitan desarrollar científicamente un análisis de estado de esfuerzos "in situ".

2. MARCO CONCEPTUAL DEL COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO K_o .

Terzaghi (1936) afirma que el descubrimiento de conceptos como el esfuerzo efectivo para suelos saturados, establece el escenario para el desarrollo de una ciencia como es la mecánica de suelos saturados. Asimismo, la identificación de estados de esfuerzo para un suelo parcialmente saturado, forma las bases para el desarrollo de una ciencia como es la mecánica de suelos parcialmente saturados. Para determinar la magnitud del esfuerzo vertical en condiciones geostáticas (σ_v) en un punto del horizonte del suelo, se debe conocer el peso unitario del material (γ_t) y la profundidad a la cual se encuentra (z). No obstante no sucede lo mismo para el esfuerzo horizontal (σ_h) ya que determinar su magnitud, implica conocer el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo (K_o) que junto al esfuerzo vertical darán como resultado un valor de carga horizontal presente en el punto deseado del suelo en estudio.

2.1. COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO

Autores como Fredlund *et al.* (2011), reconocen que se torna complejo cuantificar teóricamente el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo, esto asociado a complejidades derivadas de la historia de esfuerzos a la que cada masa de suelo haya sido sometida. Sin embargo la consideración de un estado de equilibrio elástico dentro de una masa de suelo, puede proveer algunas aproximaciones al coeficiente lateral de presión de tierras en reposo y a su vez puede darnos algunas indicaciones de la profundidad de agrietamiento que presenta el material.

El coeficiente lateral de presión de tierras K_o , puede ser definido como la relación del esfuerzo normal horizontal neto, sobre el esfuerzo normal vertical neto (ecuación 2.1). Esta es una leve variación de la mecánica de suelos saturados, tanto el esfuerzo horizontal (σ_h) como vertical

(σ_v) son ahora referencia de presión de poros de aire según la ecuación (2.2), así lo es generalmente la presión atmosférica.

$$(2.1) \quad K_o = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$$

$$(2.2) \quad K_o = \frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a}$$

Dónde:

- $\sigma_h - u_a$ = esfuerzo normal neto horizontal.
- $\sigma_v - u_a$ = esfuerzo normal neto vertical.

Fredlund *et al.* (2011) reiteran que la condición de esfuerzo geostático, donde no hay deformación horizontal está referido al coeficiente lateral de presión de tierras en reposo, conocido como K_o , así mismo que el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo depende de varios factores, tales como el tipo de suelo, historia de esfuerzos, y densidad. Los suelos saturados, tienen por lo general valores de K_o , que van desde 0.4 a 1.0. Sin embargo los suelos parcialmente saturados son a menudo, sobre consolidados y pueden tener coeficientes de presión de tierras en reposo, mayor que 1.0 (Brooker e Ireland 1925). Los coeficientes de presión de tierras en reposo tienden a cero para el caso donde los suelos llegan a ser desecados y agrietados. En la Figura (2-1) se ilustra un perfil del esfuerzo normal vertical y horizontal bajo condiciones de reposo.

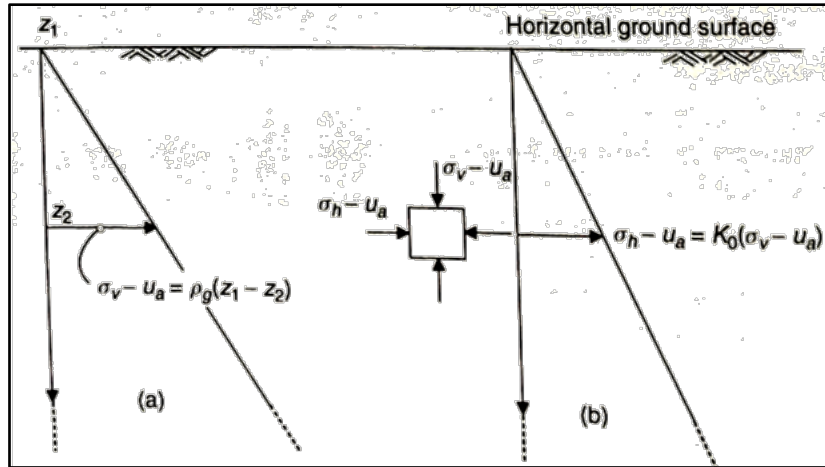


Figura 2- 1. Perfil de esfuerzos geostáticos *in situ*, condiciones:(a) esfuerzo normal vertical; (b) esfuerzo normal horizontal. (Tomada de Fredlund *et al* 2011).

La aplicación de la teoría de presión lateral de tierra para suelos parcialmente saturados (que presentan serios agrietamientos) ha sido por varios años una técnica que ha presentado dificultad de su puesta en marcha, sin embargo Fredlund *et al.* (2011), dados a la investigación de dicha teoría indican que los esfuerzos totales horizontales a través de una grieta son prácticamente cero, a su vez afirman que el suelo inmediatamente adyacente a la grieta está ligado directamente por la succión del suelo.

Para Fredlund *et al.* (2011), la ecuación de esfuerzo versus deformación, en la dirección vertical para un suelo homogéneo, isotrópico, elástico lineal y parcialmente saturado puede expresarse en la ecuación (2.3) como:

$$(2.3) \varepsilon_v = \frac{\sigma_v - u_a}{E} - \frac{2\mu}{E} (\sigma_h - u_a) + \frac{u_a - u_w}{H}$$

Dónde:

- ε_v = deformación normal en dirección vertical
- σ_v = esfuerzo normal en dirección vertical
- σ_h = esfuerzo normal en dirección horizontal
- μ = relación de Poisson
- E = módulo elástico con respecto a un cambio en σ - u_a
- H = módulo elástico con respecto a un cambio en u_a - u_w
- U_a = presión de poros de aire
- U_w = presión de poros de agua

Igualmente la ecuación de esfuerzo en función de la deformación en dirección horizontal puede expresarse en la ecuación (2.4) como:

$$(2.4) \varepsilon_h = \frac{\sigma_h - u_a}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_v - \sigma_h - 2u_a) + \frac{u_a - u_w}{H}$$

Para la condición de reposo o K_o , en una masa de suelo parcialmente saturada, la deformación en dirección horizontal puede tender a cero ($\varepsilon_h=0$). Es decir que el esfuerzo horizontal neto puede ser escrito en términos del esfuerzo vertical según ecuación (2.5) como:

$$(2.5) \sigma_h - u_a = \frac{\mu}{1 - \mu} (\sigma_v - u_a) - (1 - \mu) \left(\frac{E}{H} \right) (u_a - u_w)$$

La ecuación (2.5) puede ser normalizada al esfuerzo vertical neto, y la ecuación toma la forma de la ecuación (2.6) para el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_o :

$$(2.6) K_o = \frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a} = \frac{\mu}{1 - \mu} - \frac{E}{(1 - \mu)H} * \frac{u_a - u_w}{\sigma_v - u_a}$$

La ecuación (2.6) vuelve a la forma común para un suelo saturado ($\frac{\mu}{1-\mu}$) cuando la succión matricial tiende a cero. Cuando la succión matricial se hace presente en el suelo (con valores iniciales de menores a 50 kPa) el esfuerzo horizontal se ve reducido, dando como consecuencia la formación de grietas de tensión en los primeros estratos del suelo. Es preciso mencionar que la reducción del esfuerzo horizontal es también una función de la profundidad en consideración.

Valores típicos de K_o para arcillas en los primeros metros de profundidad oscilan entre 0.3 y 0.7, en función de la relación de Poisson. Para propósitos ilustrativos Fredlund *et al.* (2011) suponen las siguientes propiedades; $\mu=0.35$, $E/H=0.17$, y densidad $\rho=1886 \text{ kg/m}^3$.

La Figura (2-2) muestra la relación entre el coeficiente de presión de tierras en reposo y la succión matricial para varias sobrecargas de presión.

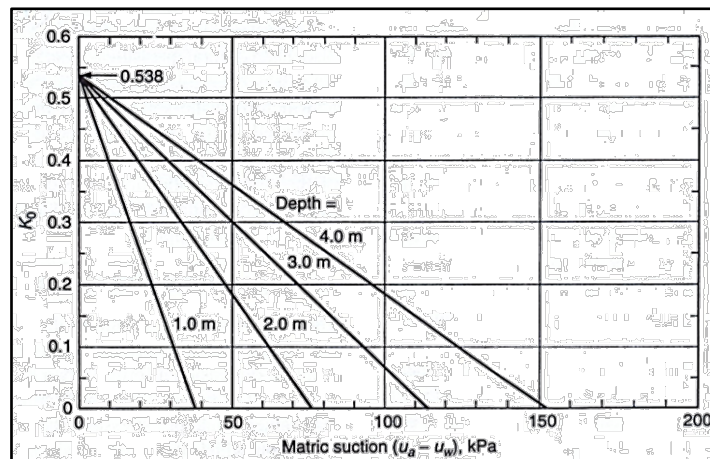


Figura 2- 2 Relación entre el coeficiente de presión de tierras en reposo K_o y succión matricial. (Tomada de Fredlund *et al.* 2011).

Investigaciones llevadas a cabo por Fredlund *et al.* (2011) arrojan que para cuando un suelo presenta condiciones de saturación del 100% con cero presiones de poros de agua ($\frac{\mu}{1-\mu}$), K_o tiene un valor de 0.538, sin embargo su magnitud disminuye a medida que la succión matricial aumenta. Este tipo de comportamiento se presenta a cualquiera de las cuatro profundidades en consideración, sin embargo K_o según la Figura 2-2 se hace mayor en los primeros metros donde la succión matricial se hace menor. Un K_o con un valor igual a cero, indica una tendencia a la formación de grietas de tensión por parte del suelo. Lo anterior no tiene en consideración efectos de humedad, secado, congelamiento, ni ciclos de carga y descarga.

En la Figura (2-3), se ilustra el comportamiento de esfuerzos efectivos horizontales y verticales, donde un suelo saturado está sujeto a una historia de sedimentación, junto a factores como erosión y posterior recarga, este comportamiento puede llegar a ser incluso más complejo para suelos parcialmente saturados que están sujetos a ciclos de humedad, secado, y congelamiento. Los coeficientes de presión de tierras pueden ir de disminuyendo (con tendencia a cero), hasta valores similares a los del coeficiente de presión pasiva.

Fredlund *et al.* (2011) mencionan que si todos los parámetros elásticos conocidos y el análisis anterior fuese aplicado al suelo que tiene una compleja historia de esfuerzos, el coeficiente de presión de tierras K_o , puede ser la tangente de la parte (a) de la Figura (2-3), opuesto al valor de K_o de la secante de la misma parte (a). A su vez aseguran que los ingenieros están interesados generalmente en el valor de la secante.

En la Figura (2-3) Gráfica (a), el suelo se comporta de manera no lineal, y los incrementos de los parámetros elásticos son de difícil determinación; es decir que la determinación del estado de esfuerzos horizontal en un suelo parcialmente saturado, es un tema complejo. Es esta ante todo la

razón por la cual esta expresión empírica ha sido propuesta para el coeficiente lateral de presión de tierras.

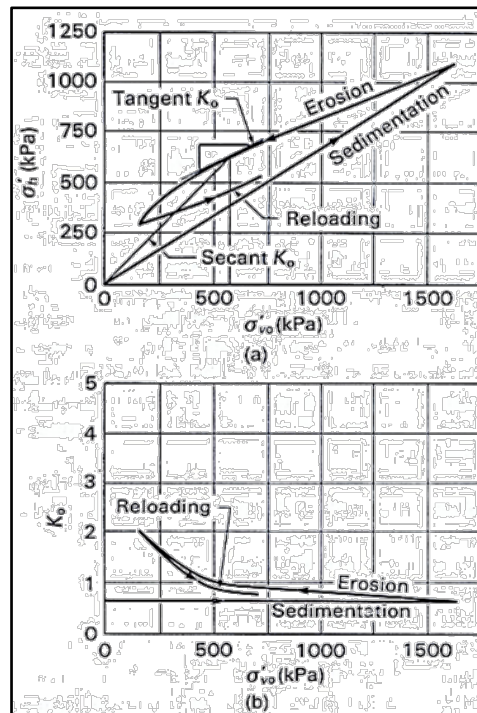


Figura 2- 3. (a) Esfuerzo efectivo horizontal para varios esfuerzos efectivos verticales. (b) Coeficiente de presión de tierras en reposo con cambio en la sobrecarga de esfuerzos para suelos saturados (Tomada de Fredlund *et al.* 2011).

Bishop (1957), usando la ecuación propuesta por Jaky (1948) (ecuación 1.7), sumado a sus estudios de laboratorio, presenta los resultados de relación entre el ángulo de resistencia (ϕ') y el coeficiente de presión de tierras en reposo (K_0) que se ilustran en la Figura (2-4). En la Tabla (2-1) se soportan otros resultados comprobados más adelante por Bishop (1961) y Simons (1958).

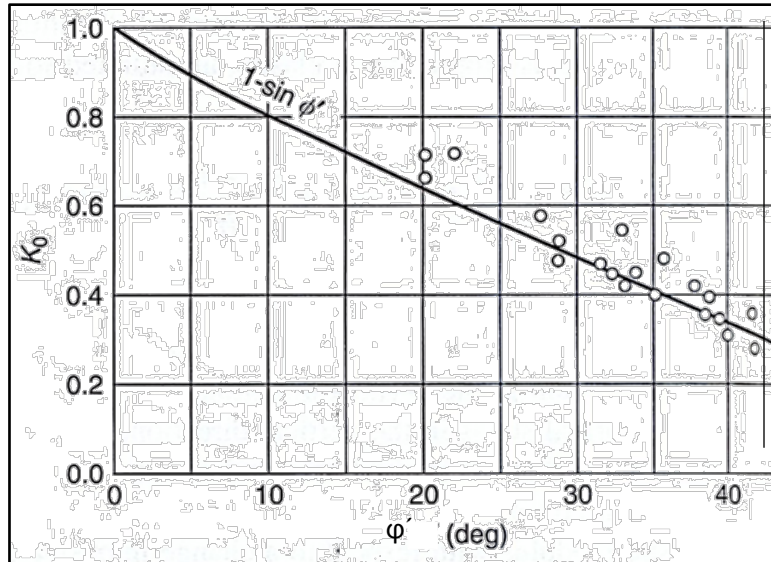


Figura 2- 4. Relación entre el ángulo de resistencia ϕ y el coeficiente de presión de tierras en reposo K_0 . (Tomada de Fredlund *et al.* 2011).

Tipo de Suelo	LL	LP	IP	Actividad	K_o
Arcilla residual compactada			9.3	0.44	0.42
Arcilla residual compactada			31	1.55	0.66
Arcilla Limosa	74	28.6	45.4	1.2	0.57
Arcilla remoldeada	61	38	23	0.32	0.66
Arcilla Marina	37	21	16	0.21	0.48
Arcilla rápida	34	24	10	0.18	0.52

Tabla 2- 1. Resultado de ensayos para la determinación de K_o en Arcillas Bishop (1961), y Simons (1958).

(Tomado de Fredlund *et al.* 2011)

Fredlund *et al.* (2011) establecen que la compactación en suelos granulares producen esfuerzos horizontales más altos, que los verticales (donde K_o es mayor que 1.0). Al igual que en suelos expansivos donde se ejercen presiones tan altas que los esfuerzos horizontales superan los

verticales, a tal punto que se llega a un estado pasivo de presión de tierras, lo que posteriormente ocasionaría una falla por corte del suelo, a su vez un incremento en la relación de sobre consolidación del suelo produce un incremento de K_o .

2.1.1 PERFIL DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO

Luy Likos (2004) establecen un perfil de presión de tierras en reposo para un depósito de arcillade 10 m, ilustrado en la Figura (2-5). De donde se infiere que el valor de K_o al encontrar el nivel freático es una constante igual a 0.538. Valor típico hallado por Fredlund *et al.* (2011) y mencionado en el numeral anterior para un suelo completamente saturado; es decir la presión horizontal es 53.8% de la presión vertical o sobrecarga de esfuerzo, y es una invariante en el espacio. En cambio si el suelo está parcialmente saturado, el coeficiente de presión de tierras decrece a medida que la succión matricial incrementa. Estos autores además aseguranque para casos donde se estudia un suelo fino, el coeficiente de presión de tierra en reposo (K_o) tiende a cero muy cerca a nivel freático para unas condiciones hidrostáticas es decir; para cuando la cantidad de agua presente en el suelo tanto de limo como arcilla se encuentra en unestado de reposo, esto se podría constatar alrededor de unos 7.5 m por encima del nivel freático o 2.5 m bajo la superficie del terreno. Igualmente establecen que de no ser cero quiere decir que está dependiendo constantemente de las tasas de flujo que ocurren cerca de la superficie cuando ocurre infiltración.

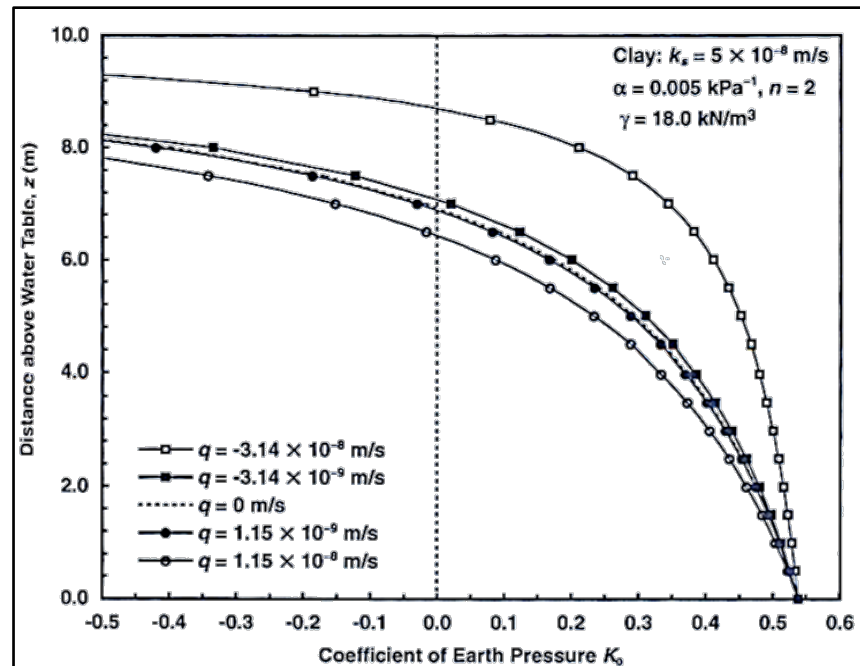


Figura 2- 5. Perfil de K_o representativo para un depósito de 10 m de suelo arcilloso. (Tomado de Lu y Likos (2004).

Dónde:

- q = descarga específica o infiltración (m/s), dada a partir de la ley de Darcy y variable aplicada para describir el flujo vertical en suelos parcialmente saturados
- k_s = conductividad hidráulica saturada
- γ = peso unitario
- α = parámetro hidrológico.

Finalmente deducen que factores como la infiltración en el suelo ocasionan que K_o aumente a lo largo del estrato de suelo. Contrario a la evaporación, que causa que K_o decrezca, que indica la existencia de esfuerzos de tensión en el suelo; que físicamente prevén la presencia de grietas bajo condiciones de desecación en la superficie.

2.1.2 PROFUNDIDAD DE AGRIETAMIENTO

Lu y Likos (2004) investigaron la profundidad de agrietamiento para una masa de suelo, encontrando que el suelo parcialmente saturado en estudio presenta una resistencia relativamente baja a la tensión, esto se debe a la formación de grietas, que pueden desarrollarse cuando el valor del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo (K_0) tiende a cero (señal de la llegada de la fuerza de tensión). La Figura (2-6) ilustra un modelo conceptual para grietas de tensión en una zona parcialmente saturada a una profundidad donde K_0 es cero o negativo.

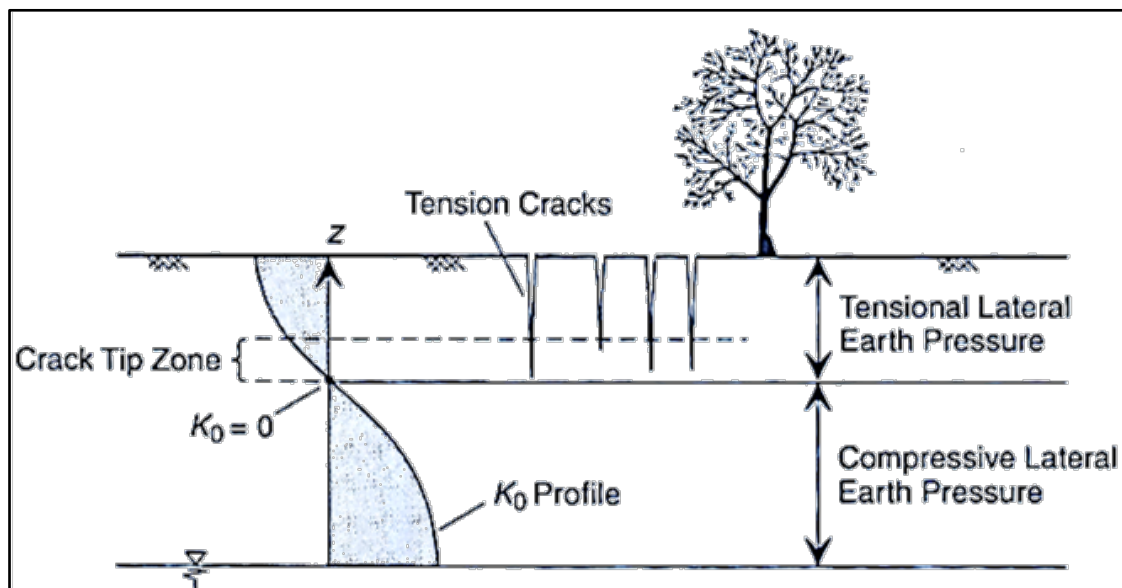


Figura 2- 6. Ilustración conceptual de grietas de tensión desarrollada en un suelo parcialmente saturado. (Tomado de Lu y Likos 2004).

Lu y Likos (2004) suponen que si las grietas en efecto se desarrollan cuando $K_0=0$, para lo cual se puede presentar una expresión que pueda cuantificar la deformabilidad del suelo, a partir de una definición de variables, la deformabilidad (G) puede representarse como se indica en la ecuación (2.7).

$$(2.7)Z_o - Z = G \frac{Z}{(1 + Z^n)^{(n-1)/n}}$$

Dónde:

- Z_o = Profundidad a la que se encuentra el nivel freático
- Z = Profundidad total
- $n =$

La ecuación (2.7), es ilustrada en la Figura (2-7) para un valor de $G=0.47$. Se puede observar que la profundidad de agrietamiento sobre las condiciones hidrostáticas está en función de la profundidad del estrato parcialmente saturado. Basados en este análisis la posible profundidad de agrietamiento para este tipo de suelo, está entre 0.0 y 1.6 m. Figura (2-7).

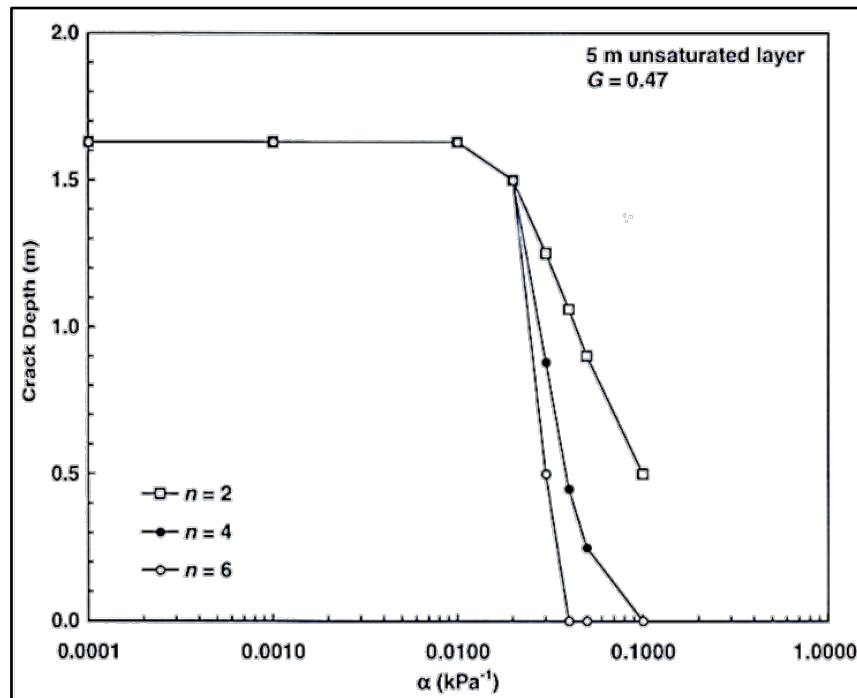


Figura 2- 7. Profundidad estimada de grietas de tensión de suelo superficial bajo condiciones hidrostáticas en 5 m para un suelo parcialmente saturado. Donde “α” es un parámetro hidrológico ligado con modelos de conductividad hidráulica y “n” está ligado a la distribución de poros del suelo. (Tomada de Lu y Likos 2004).

2.1.3 TEORIA ELÁSTICA

La teoría elástica, puede relacionar las deformaciones unitarias en los planos principales (ε_1 , ε_2 , ε_3) con los esfuerzos efectivos (σ'_1 , σ'_2 , σ'_3) para lo cual hay que tener en cuenta la relación de Poisson (μ) y el módulo de elasticidad de Young (E), como se muestra en las siguientes expresiones (ecuación 2.8, 2.9, 2.10, y 2.11).

$$(2.8) \varepsilon_1 = \frac{\sigma'_1}{E} - \frac{\mu(\sigma'_2 + \sigma'_3)}{E}$$

$$(2.9) \varepsilon_2 = \frac{\sigma'_2}{E} - \frac{\mu(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{E}$$

$$(2.10) \varepsilon_3 = \frac{\sigma'_3}{E} - \frac{\mu(\sigma'_1 + \sigma'_2)}{E}$$

Se tienen en cuenta, suposiciones considerando una gran masa de suelo:

- Se considera una superficie libre horizontal semi-infinita, es decir $\sigma'_2 = \sigma'_3$, y por consiguiente en estado de reposo las deformaciones laterales son nulas ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$).
- Los planos principales deben ser el vertical y el horizontal, entonces ($\sigma'_1 = \sigma'_v = \sigma'_3 = \sigma'_h$). esto lleva a una relación entre los esfuerzos efectivos principales como muestra el desarrollo matemático de la ecuación (2.11), así:

$$(2.11) \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Como se puede notar, la presión lateral, σ'_h , se puede obtener a partir del esfuerzo efectivo vertical, como se enuncia en la ecuación (2.12), en una condición de reposo para un suelo seco así:

$$(2.12) \sigma'_h = \sigma'_v * \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)$$

Al suponer una gran superficie horizontal sin deformaciones laterales, se obtienen esfuerzos que se denominan geostático, estos se presentan frecuentemente en los suelos sedimentarios que conforman la mayor parte de la Sabana de Bogotá. El esfuerzo geostático vertical total depende del peso propio de la masa de suelo y se define como: el producto del peso unitario por la profundidad, ambos en la franja donde se desee obtener el valor del esfuerzo, según ecuación (2.13).

$$(2.13) \sigma_v = \gamma_t * z$$

Dónde:

γ_t = Peso unitario total del suelo.

z = Profundidad a la que se examina el esfuerzo geostático vertical.

Debido a esto, y teniendo en cuenta el nivel freático del terreno, el esfuerzo vertical efectivo es definido como se presenta según la ecuación (2.14).

$$(2.14) \sigma'_v = \gamma_t * z - u$$

Dónde: u = presión de poros a la profundidad z .

Así es posible calcular las componentes en términos de esfuerzos efectivos como se muestra en la ecuación (2.15), y en términos de esfuerzos totales expresado en la ecuación (2.16), expresiones en las cuales se introduce la presión de poros u :

$$(2.15) \sigma'_h = (\gamma_t * z - u) * K_o$$

$$(2.16) \sigma_h = (\gamma_t * z - u) * K_o + u$$

Basándose en el anterior análisis Martínez y Rodríguez (2003) mencionan que es posible concluir que las fuerzas que se desarrollan en una masa de suelo dependen del peso propio del mismo y de las cargas externas aplicadas sobre él. La influencia que estos dos factores tienen sobre el suelo se calcula a través de ecuaciones de distribución de esfuerzos en un medio elástico.

Lu y Likos (2004) presentan una expresión general para hallar K_o (ecuación 2.17).

$$(2.17) K_o = \frac{\mu}{1 - \mu} + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \frac{\ln\left[\left(1 + \frac{q}{k_s}\right) e^{-\gamma_w \alpha z} - \frac{q}{k_s}\right]}{\alpha(\sigma_v - u_a)(1 + \{-\ln\left[\left(1 + \frac{q}{k_s}\right) e^{-\gamma_w \alpha z} - \frac{q}{k_s}\right]\}^n)^{(n-1)/n}}$$

Lu y Likos (2004) Afirman que si un suelo está saturado, la succión matricial (que están en función de la infiltración “ q ”) se hace cero lo cual hace que la ecuación (2.17) se reduzca notablemente y K_o sea constante tal como en la ecuación (2.11). Sin embargo cuando el suelo es parcialmente saturado el esfuerzo por succión puede tener un impacto importante en la presión de tierras.

2.1.4 CÍRCULO DE MOHR Y TEORÍA DE RANKINE

Teniendo en cuenta las condiciones *in situ* necesarios para el desarrollo de la teoría elástica, no debe haber presencia de esfuerzos cortantes en los planos principales, por este motivo los esfuerzos principales son el vertical y el horizontal, como se indica en la Figura (2-8), los cuales determinan el estado de falla en el círculo de Mohr.

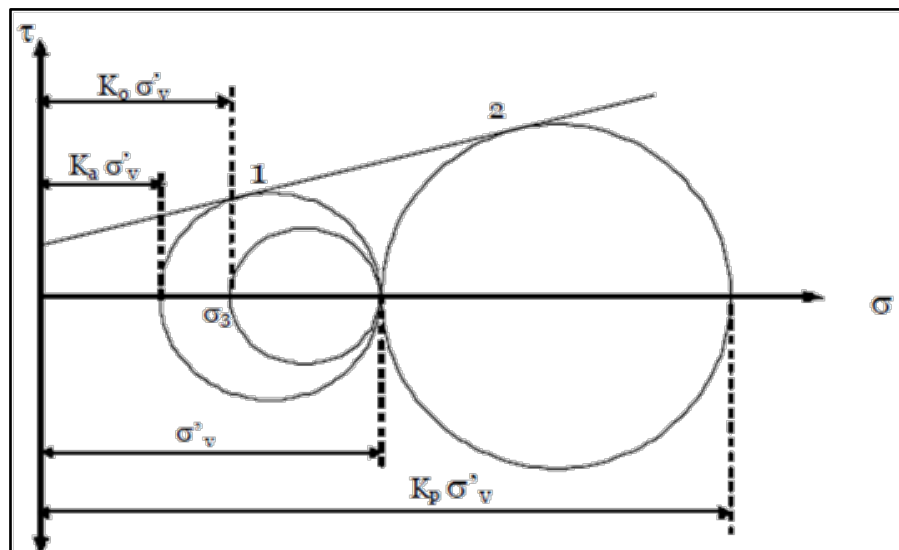


Figura 2- 8. Envolvente de falla para la variación del esfuerzo principal menor. (Tomada de Martínez y Rodríguez (2003).

En la Figura (2-8) se muestra el comportamiento de los esfuerzos principales donde se varía el esfuerzo principal menor (σ_3), llevándolo hasta los límites donde se presentaría la falla, analizando un punto de la masa de suelo a una profundidad constante. Primero nuestra partícula en consideración se expande lateralmente, es decir, se disminuye el esfuerzo horizontal efectivo hasta llegar a la falla (punto 1 en la Figura 2-8), en este instante se obtiene un coeficiente de

presión de tierras activo (K_a) dando una condición de esfuerzos, como el que se enuncia en la ecuación (2.18) así:

$$(2.18) \sigma'_v = \gamma_t * z - u, \quad \sigma'_{ha} = K_a * \sigma'_v = K_a(\gamma * z - u)$$

Para la situación contraria, al aumentar la carga horizontal se llega al valor de σ'_v y si se sigue comprimiendo, también se obtiene un estado de falla (punto 2 en el círculo de Mohr de la Figura 2-8), donde el valor del esfuerzo horizontal está determinado por un coeficiente de presión de tierras pasivo (K_p), dado en la ecuación (2.18) así:

$$(2.19) \sigma'_v = \gamma_t * z - u, \quad \sigma'_{hp} = K_p * \sigma'_v = K_p(\gamma * z - u)$$

Con este análisis se determina que el coeficiente de presión de tierras en reposo debe estar dentro de un rango limitado por un valor mínimo K_a y un máximo igual a K_p ; cabe anotar que durante este desarrollo no se tuvo en cuenta la influencia de la cohesión del material ya que se asumió constante.

La ecuación que define K_o en función de otras variables es la que indica qué propiedades es necesario medir y en qué condiciones. Varios investigadores han propuesto expresiones que definen K_o en función de diferentes variables, estas expresiones se pueden poner a prueba en pruebas de laboratorio y diversas correlaciones.

2.2 EXPRESIONES QUE DEFINEN K_o

La invención de sofisticados equipos y diferentes técnicas de laboratorio, han permitido obtener gran información sobre el comportamiento del suelo, parámetros como K_o ha llevado a diferentes investigadores a la determinación del mismo, y a que su estimación es de gran importancia a la hora de determinar los estados de esfuerzos en una masa de suelo, y a su vez entender su comportamiento en el estado esfuerzo-deformación.

A continuación se hacen mención algunas investigaciones realizadas para medir y hallar K_o en arcillas usando distintos métodos de laboratorio.

2.2.1 Estimación de K_o en Laboratorio

2.2.1.1 Suelos granulares y arcillas normalmente consolidadas

Radoslaw y Michalowski (2005), tratando de demostrar lo publicado por Jaky (1944) presentan para suelos normalmente consolidados a partir de varios análisis de esfuerzos en campo sobre un prisma de material granular, que K_o está relacionado directamente con el ángulo de resistencia ϕ' (ecuación 2.20). A su vez encuentran que para cuando el ángulo de resistencia forma un ángulo de 90° (plano O-C de la Figura 2-9) sobre la horizontal del prisma, se hallaba una condición en reposo. (Figura 2-9).

$$(2.20) K_o = (1 - \sen \phi')$$

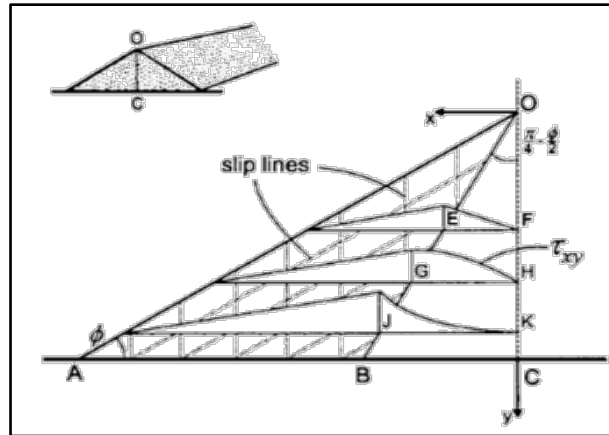


Figura 2- 9. Prisma de Material granular. Tomado de Radoslaw, y Michalowski, (2005).

2.2.1.2 Arcillas Sobreconsolidadas

Hendron (1963) y Brooker (1964)(citados por Martínez y Rodríguez 2003) realizaron ensayos con arenas y arcillas usando un consolidómetro construido para medir presiones laterales inducidas, y así evitar deformaciones en las paredes cilíndricas del aparato, la aplicación de la carga se hacía a través de una presión externa de aceite. Observaron que para las muestras normalmente consolidadas el valor de K_o tiende a conservarse constante durante el proceso de carga, mientras que en la descarga la magnitud de K_o crece sostenidamente, de tal manera que llega a un instante donde los esfuerzos principales igualan al vertical para luego superarlos, hasta que el suelo llega a una envolvente de falla por extensión entrando en la condición pasiva (K_p). Para la anterior condición se determina una curva de forma característica durante la extensión, que permite relacionar el K_o con la relación de sobre consolidación (RSC).

Posteriormente Brooker e Ireland (1965) demostraron que el valor de K_o depende de la historia de esfuerzos del suelo, a su vez que al aumentar la relación de sobreconsolidación (RSC), también aumenta el valor de K_o , a tal punto que llega aproximarse al coeficiente pasivo de presión de tierras (K_p) el cual sería el máximo al que puede llegar. Teniendo en cuenta lo anterior al

siguiente año Schmidt (1966), propuso la ecuación (empírica 2.21) para arcillas sobreconsolidadas que están en proceso de descarga y que depende del coeficiente de presión de tierras en reposo del suelo normalmente consolidado K_o (ecuación 2.20).

$$(2.21) K_{o(sc)} = RSC^m * K_{(NS)}$$

Donde $m = 1.25 \text{ Sen } \phi'$.

Alpan (1967) propone la siguiente relación (ecuación 2.22) para suelos sobreconsolidados:

$$(2.22) K_{o(sc)} = RSC^n * K_{(NS)}$$

Donde $n = 0,54 \cdot 10^{-\left(\frac{IP}{281}\right)}$

IP = Índice de plasticidad en porcentaje

Tavenas *et al* (1975) menciona que la relación del esfuerzo de preconsolidación horizontal a vertical (ecuación 2.23) es un valor cercano al correcto de K_o para las arcillas sobreconsolidadas. Una manera de conocer el valor del esfuerzo de preconsolidación horizontal (σ'_{ph}) es tomar una muestra de suelo tallarla en dirección perpendicular al eje de extracción y hacer consolidaciones unidimensionales en dicho eje o sentido.

$$(2.23) K_o = \frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{pv}}$$

La NSR (2010), en su título H expresa el coeficiente lateral de presión de tierras como:

$$(2.24) K_o = (1 - \sin \phi') * RSC^{\sin \phi'}$$

Dónde:

ϕ' = ángulo de resistencia

RSC = relación de sobre consolidación

2.1.1.1. Arcillas teniendo en cuenta la presión de poros

Mediciones de la variación en la presión de poros de una muestra de suelo simulando situaciones *in situ*, se utilizan como alternativa para determinar los esfuerzos horizontales (Martínez y Rodríguez, 2003). Esta metodología es aplicable solo para suelos arcillosos, en los cuales el efecto del muestreo es pequeño, principalmente en arcillas sobreconsolidadas.

Para Suarez y Suarez (2003) el estado de esfuerzos *in situ* puede ser afectado por factores como el humedecimiento, que tiende a generar descensos en los esfuerzos horizontales debido a la degradación del material del depósito. Igualmente la desecación y expansión en suelos arcillosos son fenómenos de gran influencia en depósitos poco profundos; donde la contracción genera grandes agrietamientos en los cuales el esfuerzo efectivo horizontal puede ser reducido a cero.

Fredlund, Rahardjo, y Fredlund (2011) plantean en sus más recientes investigaciones, que suelos arcillosos saturados llegan a tener comúnmente valores de K_o mínimo de 0.4 a valores mayores de 1.0, a su vez han comprobado que arcillas parcialmente saturadas, están comúnmente sobreconsolidadas y pueden tener valores de K_o mayores que 1.0. Esto se debe a que durante el proceso de consolidación, los esfuerzos verticales pueden ser mayor a los horizontales, en consecuencia K_o sería menor que uno (1). Pero teniendo en cuenta escalas de tiempo geológico se pueden tener fenómenos de humedecimiento y erosión los cuales causan reducción de los esfuerzos verticales, lo que significaría el aumento de K_o , por encima de uno (1).

Skempton (1961) (mencionado por Martínez y Rodríguez, 2003) elaboró una de las propuestas más interesantes e importantes para evaluar los esfuerzos *in situ* usando un aparato triaxial y a partir de pruebas de laboratorio en muestras de arcilla, aplicó una presión de cámara bastante grande, para asegurar la presión de poros positiva. Esta presión de poros está en términos de un

parámetro de presión de poros y el esfuerzo que generan los planos principales, obtenido por la diferencia de la presión de cámara y la presión de poros de la muestra, es decir; que el cambio en la presión de poros esta dado como un promedio del cambio en los esfuerzos dentro de una situación no drenada, (ecuación 2.25).

$$(2.25) \Delta u = B * \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

La ecuación (2.25) se desarrolla a partir de algunas definiciones de cambio volumétrico como así se puede verificar en el anexo I, a través del desarrollo matemático mostrado en el apéndice A.

Skempton (1954) mostró que para materiales que se comportan de acuerdo a la teoría elástica, el cambio en la presión de poros dentro de la trayectoria de descarga (tal como ocurre en un muestreo) se puede definir como la ecuación (2.26):

$$(2.26) \Delta u = B * [\Delta\sigma_3 + A * (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Para suelos saturados el parámetro B, de la presión de poros, se toma como uno (1), no es el caso del parámetro A, el cual depende del proceso al que haya sido sometida la muestra de suelo. En la presente investigación, se analizan procesos de compresión y extensión axial a los cuales puede estar sometido el suelo, los cuales toman valores de A iguales a 1/3 y 2/3 respectivamente. Los valores de A se muestran en la Figura (2-10). Los correspondientes procedimientos de cálculo, son mostrados en los apéndices A y B del anexo I. Cabe mencionar que se toma en consideración este tipo de procedimientos con base a los calculados por Martínez y Rodríguez (2003), y a que permiten de manera satisfactoria obtener una expresión que define K_o de un material arcilloso.

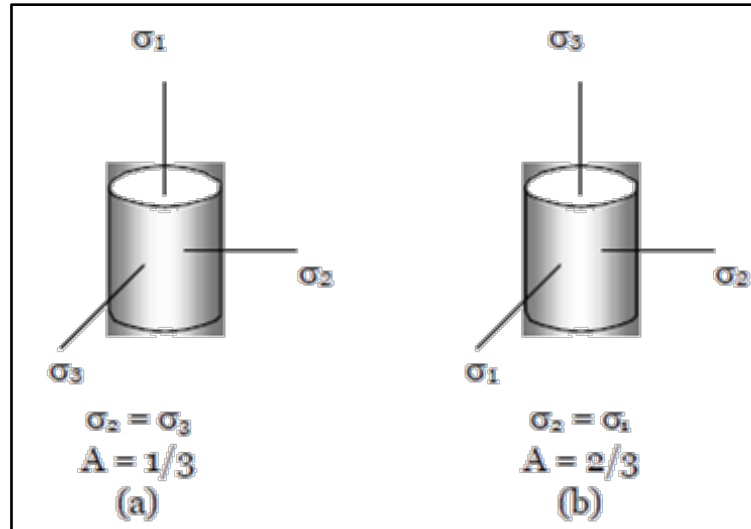


Figura 2- 10.Estados de esfuerzos que definen el valor del parámetro A. Fuente: Martínez y Rodríguez (2003).

A partir de la ecuación (2.26) es posible encontrar una expresión (reemplazándola por esfuerzos efectivos) que define el valor de la presión de poros en función del esfuerzo efectivo vertical, K_o , y el parámetro de presión de poros A ; (este procedimiento matemático se puede ver en el apéndice B, anexo I).

La ecuación (2.28) hace referencia a la deducción matemática para el caso de compresión axial; donde se supone que la mayor variación de esfuerzos corresponde al esfuerzo vertical total.

$$(2.27)(u_a - u_w) = \sigma'_v [K_o - A * (K_o - 1)]$$

Lo anterior muestra que el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo, puede ser definido en términos de la succión matricial medida en una muestra de suelo. Despejando K_o de la ecuación (2.28) tenemos:

$$(2.28) K_o = \frac{\left(\frac{u_a - u_w}{\sigma'_v} \right) - A}{1 - A}$$

Para el caso de extensión axial (ecuación 2.29) donde se supone que K_0 *in situ* es menor que 1.0, debe aplicarse con el parámetro A donde la mayor variación de esfuerzos está dada por el esfuerzo horizontal total.

$$(2.29) K_0 = \frac{\left(\frac{u_a - u_w}{\sigma'_v} \right) + A - 1}{A}$$

Las anteriores expresiones son de vital importancia durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, a su vez es necesario determinar el esfuerzo efectivo principal, así como la presión de poros final, parámetros que se pueden medir sin mayor dificultad.

3. DETERMINACIÓN DE K_0 A PARTIR DE MEDICIÓN DE SUCCIÓN EN ARCILLAS

Los esfuerzos *in situ* que se presentan a diferente profundidad en un suelo arcilloso, puede llegar a estimarse a través de diferentes métodos conocidos en la mecánica de suelos, entre ellas suposiciones físicas y mecánicas. A su vez, es importante definir conceptos que lleven a relacionar fenómenos como la succión y su incidencia en una masa de suelo. Ahora, partiendo del hecho que la mayor variación de esfuerzos corresponde al esfuerzo vertical efectivo (ecuación 2.28), es posible obtener una expresión que defina K_0 en función de la presión de poros negativa (succión) y esfuerzos efectivos verticales; por ello es importante definir este tipo de variables, y métodos de medición.

3.1. DEFINICIÓN DE SUCCIÓN EN SUELOS

Para Pineda (2003) en un depósito de suelo donde se encuentra el nivel freático a una determinada profundidad bajo la superficie; el suelo que conforma el depósito presenta estados de esfuerzo *in situ* particulares y diferentes entre sí, con respecto a la presión de agua intersticial; es decir que la parte del suelo que está por encima del nivel freático, presenta una presión de agua negativa, contrario a lo que ocurre en el suelo por debajo del nivel freático en donde la presión de agua de poros es positiva. A su vez afirma que el suelo que está por encima del nivel freático presenta entonces *succión* en su fase líquida, debido a la posición relativa de las moléculas de agua respecto al mismo.

En general Pineda (2003) hace referencia a la succión como una “***forma de interacción***” entre partículas sólidas y la fase líquida de un material térreo siempre y cuando el material permanezca aún saturado ($S=100\%$). Precisa en decir que cuando el material se encuentra parcialmente saturado ($S < 100\%$) la interacción de las superficies sólidas y la fase líquida es influida por la presencia de la fase gaseosa (que generalmente es aire) que comienza aparecer en el material. Este comportamiento se explicará posteriormente.

En la literatura la succión es concebida como una combinación de efectos químicos y físicos debidos a la interacción entre la fase sólida, líquida, y gaseosa. A esta apreciación se le conoce como ***succión total***.

De la ***succión total*** está formado por la ***succión matricial*** y la ***succión osmótica***. Pineda (2003) afirma que en problemas de resistencia la componente más importante de la ***succión total***; es la ***succión matricial***.

Diferentes definiciones de succión total y sus componentes se han dado a conocer el mundo, sin embargo las más aceptadas son las propuestas por Ridley (1993) (Mencionado por Pineda, 2004) que se mencionan a continuación:

- **Succión Total (Ψ):**

Es el esfuerzo requerido para extraer en forma de vapor, una molécula de agua en fase líquida, de la matriz del suelo. Este esfuerzo se expresa en un cambio de estado líquido a gaseoso para extraer la molécula de agua.

- **Succión Matricial ($u_a - u_w$):**

Es el esfuerzo necesario para extraer una molécula de agua en la fase líquida, de la matriz de suelo sin que haya lugar a un cambio de estado.

- **Succión Osmótica (π):**

Esfuerzo adicional requerido para mover la molécula de agua, causado por sales disueltas, o en otras palabras es la diferencia del valor medido entre la succión total y la succión matricial.

Para Martínez y Rodríguez (2003) la succión total de un suelo, se define en la ecuación (3.1).

$$(3.1) \psi = \frac{R \cdot T}{V} \ln \left(\frac{P}{P_o} \right)$$

Dónde:

- Ψ = succión Total (kPa).
- R = constante universal de los gases. [8.31432 J/(mol K)]
- T = temperatura absoluta (°K)
- V = volumen molecular del agua (m³/kmol)
- P/P_o = humedad relativa, en porcentaje (%)

- P = presión parcial de vapor (kPa)
- P_o = presión de vapor en estado saturado (kPa).

En un ambiente que se encuentra en estado saturado de vapor y el suelo tiene esta misma condición el valor de la succión es cero. Dineen (1997)

La ecuación (3.1) indica que la succión total de un suelo aumenta cuando en el medio en que se encuentra presenta una humedad relativa decreciente, de esta manera el medio ambiente impone ciertas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa que causan que el suelo pierda o gane líquidos.

Para Mitchell (1992) (mencionado por Suarez y Suarez, 2005) la succión matricial está relacionada con la tensión superficial generada por los espacios intergranulares. En donde las partículas de suelo generan entre si espacios de diferentes diámetros, en los cuales el agua se difunde. Esta componente de la succión está ligada con la fábrica del suelo; es decir con ese arreglo de granos que conforman la matriz y los intersticios generados entre ellos. La Figura (3-1) ilustra que en suelos granulares, los cambios en la fábrica son mínimos al presentarse una pérdida de agua; en suelos finos como arcillas no ocurre de esta manera, y a que la variación en la cantidad de agua intersticial genera re-acomodamiento y cambios en la fábrica, la cual es importante en el comportamiento de suelos finos.

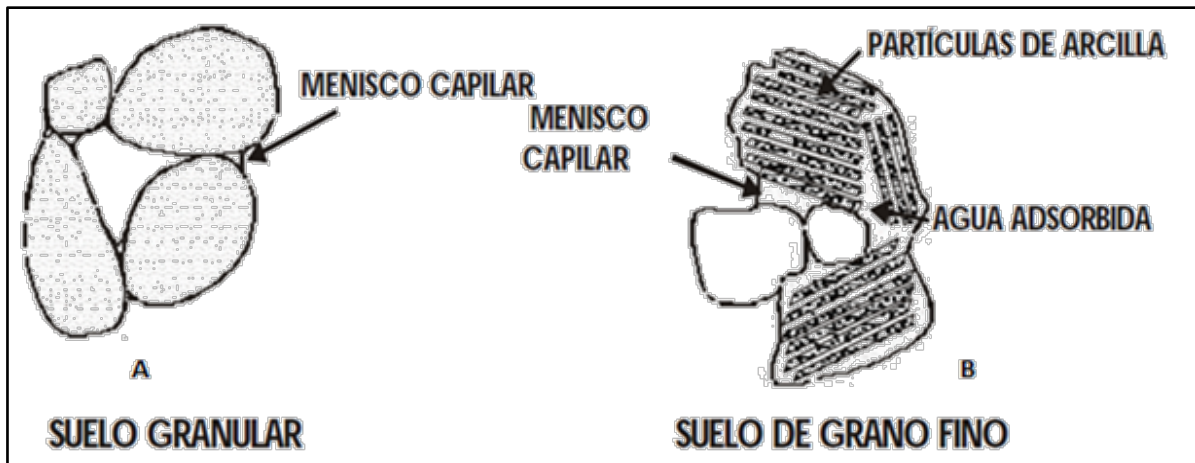


Figura 3- 1. Agua intersticial presente en los suelos, A) suelos granulares, B) suelos finos. (Tomada de Suarez y Suarez (2005).

3.2. REPRESENTACIÓN FÍSICA DE LA SUCCIÓN EN UN SUELO

Buckingham (1907) propone un modelo ilustrado en la Figura (3-2), en el cual hace una representación física de la succión matricial para un suelo, que generalmente se presenta como partículas sólidas separadas por una lámina o capa de agua. La interface aire-agua en el menisco formado entre las partículas sólidas del suelo es semejante a lo ocurrido en un tubo capilar.

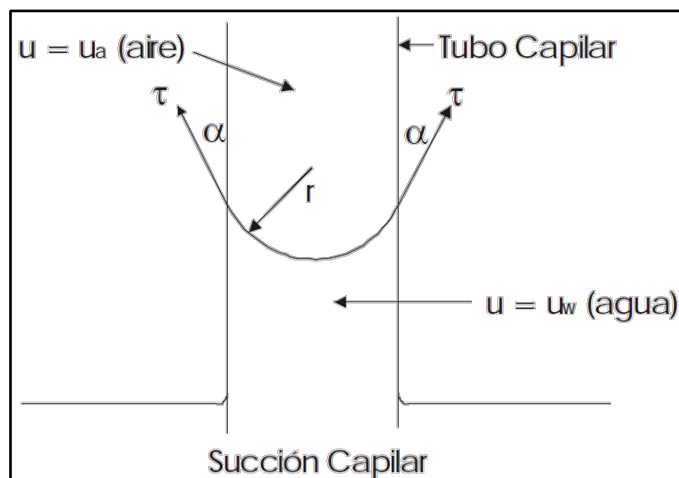


Figura 3- 2. Modelo físico de succión matricial (Tomado de Ridley 1996).

Según el modelo, para mantener el equilibrio de fuerzas en la interface aire-agua, el aire ejerce una fuerza hacia abajo que debe ser igual a la ejercida por el agua hacia arriba. La forma curvada de la interface se da por el humedecimiento de las paredes del tubo. Esta fuerza que genera la tensión superficial es hacia arriba debido a que corresponde a la parte superior de la columna de agua.

De lo anterior se tiene la ecuación (3.2):

$$(3.2)(u_a - u_w) = \frac{2 * \tau}{r} * \cos(\alpha)$$

Dónde:

- u_a = presión atmosférica.
- r = radio del tubo capilar.
- u_w = presión de agua de poros.
- τ = tensión superficial de agua.
- α = ángulo entre la pared del tubo y la superficie del agua.

Con este modelo, cuando el menisco es perfectamente esférico el ángulo α tiene un valor de 90° y tomando como presión de referencia la presión atmosférica ($u_a = 0$), el equilibrio y u_w solo dependerán del radio del tubo capilar y de la tensión superficial del agua, como lo demuestra la ecuación (3.3):

$$(3.3)u_a - u_w = \frac{2 * \tau}{r}$$

De esta manera, la succión matricial depende del radio de tubo capilar el cual representa el tamaño de los espacios intergranulares en un suelo. Este modelo funciona muy bien para suelos granulares, donde es posible asumir una forma esférica de las partículas sólidas y de los

intersticios. Según Martínez y Rodríguez (2003) aplicar este modelo en suelos arcillosos no es del todo acertado. Las partículas de suelo fino, como arcilla, son de forma alargadas y están eléctricamente cargadas, estas dos características son las que hacen cambiar un poco el modelo (Figura 3-1).

3.3. MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN DEL SUELO

Lu y Likos (2004) aseguran que técnicas experimentales para la medición de succión en suelos y sus correspondientes curvas características de retención de agua, varían extensamente en términos de costo, complejidad y rango de medición. Dichas técnicas pueden establecerse tanto en campo como en laboratorio y se diferencian por la componente de succión que es medida, y sea matricial o total. Pruebas de laboratorio, suelen requerir muestras inalteradas de suelo, con el fin de obtener valores de succión similares a las tenidas *in situ.*, particularmente para valores no muy altos de succión, donde la capilaridad tiende a dominar el comportamiento de las presiones de poros, esto dado generalmente para suelos finos como los arcillosos expansivos. La Figura (3-3), muestra un cuadro resumen de varias de las técnicas usadas, tanto en campo como en laboratorio para la determinación de succión en suelos.

Suction Component Measured	Technique/Sensor	Practical Suction Range (kPa)
Matric suction	Tensiometers	0–100
	Axis translation techniques	0–1,500
	Electrical/thermal conductivity sensors	0–400
	Contact filter paper method	Entire range
Total suction	Thermocouple psychrometers	100–8,000
	Chilled-mirror hygrometers	1,000–450,000
	Resistance/capacitance sensors	Entire range
	Isopiestic humidity control	4,000–400,000
	Two-pressure humidity control	10,000–600,000
	Noncontact filter paper method	1,000–500,000

Figura 3- 3. Resumen de técnicas de laboratorio y campo para medición de succión en suelos. (Tomada de Lu y Likos 2004).

Entre las diferentes técnicas para la medición de succión en suelos incluye:

- Tensiómetros.
- Técnicas de traslación de ejes.
- Sensores de conductividad eléctrica.
- Técnicas de contacto con papel filtro.

Los tensiómetros (Figura 3-4) son usados generalmente para la medición de presión de poros de agua negativa para bajas succiones. La técnica de traslación de ejes (Figura 3-5) controla la diferencia entre la presión de poros de aire y presión de poros de agua. A su vez mide el contenido de agua del suelo en equilibrio con la succión matricial aplicada. Los sensores de conductividad eléctrica conocidos también como sensores “bloque de y eso”, son usados indirectamente para relacionar succión matricial a la conductividad eléctrica incrustada en un medio poroso en una masa de suelo no saturado.

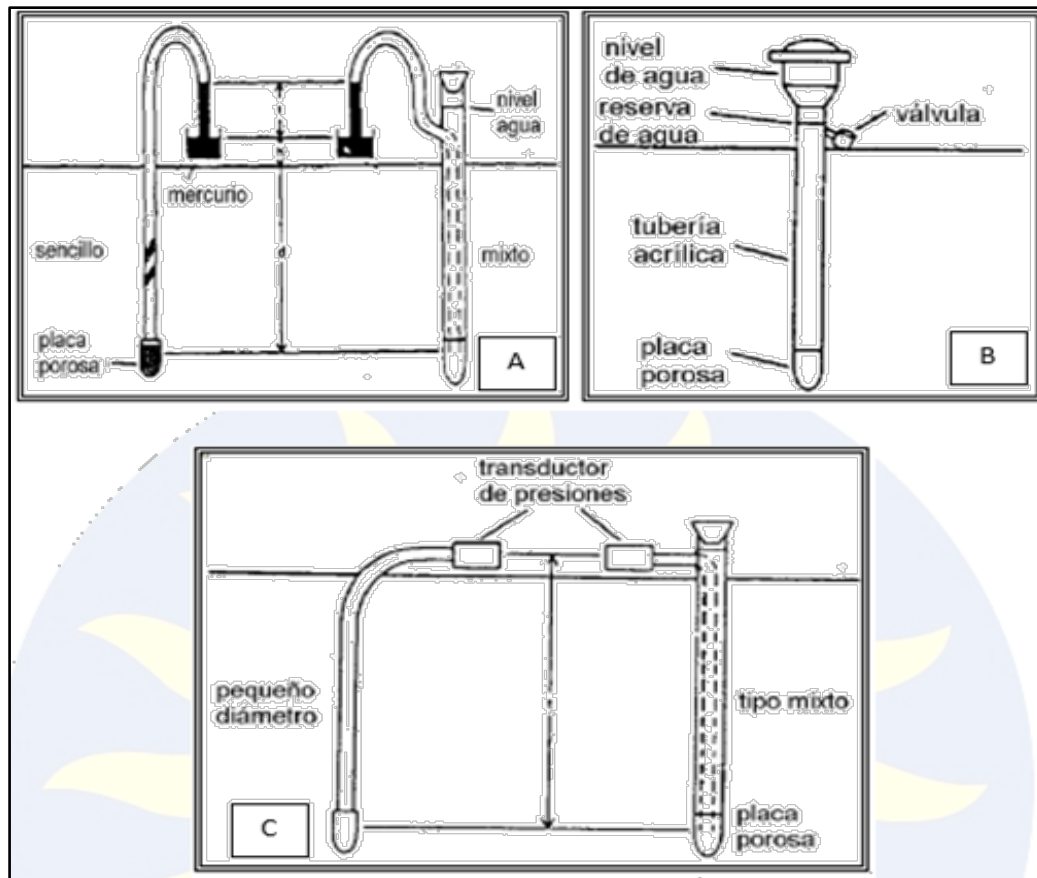


Figura 3- 4. Esquema Típico de Tensiómetros. A. Tensiómetro con manómetro de mercurio. B. Tensiómetro medidor de vacío. C. Tensiómetro con transductor electrónico. Tomado de Ridley (1996).

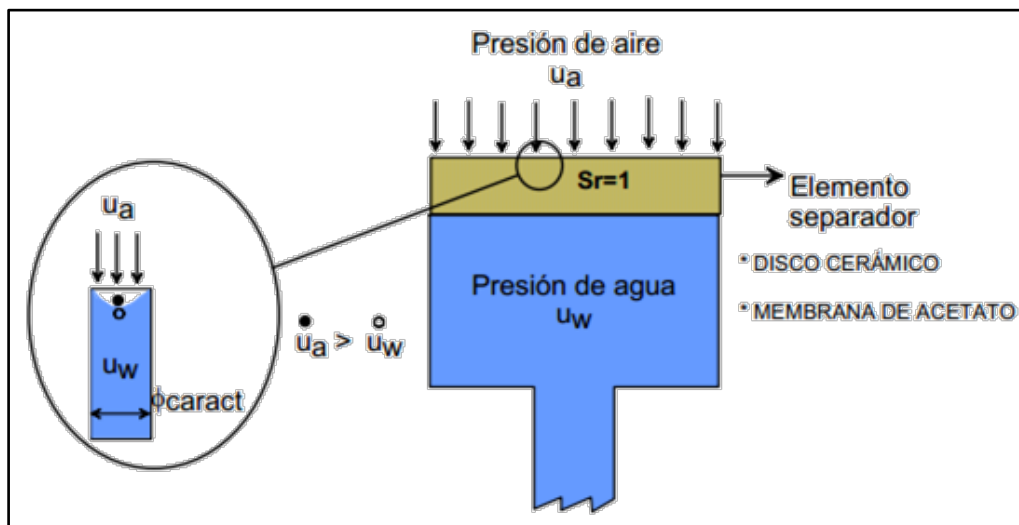


Figura 3- 5. Esquema del funcionamiento de un elemento separador utilizado en la técnica de control de succión por traslación de ejes. Tomado de Hoffmann (2005).

Finalmente la técnica de contacto con papel filtro se basa en la medición del contenido de agua en equilibrio de pequeños papeles de filtro en contacto directo con las muestras de suelo parcialmente saturado. En cada uno de estos casos, el contenido de agua correspondiente a la medición de succión genera puntos a lo largo de curva de retención de agua. El resultado de la curva de retención de agua bien sea para proceso de humedecimiento o secado depende de la humedad, saturación, relación de vacíos o variable en función a la que se someta la muestra durante toda su medición. Este método se explica con mayor detalle a continuación, tomando en cuenta que es el técnicamente seleccionado para la presente investigación.

3.3.1. Método del Papel Filtro.

Si bien el uso de papel filtro para medición de succión en laboratorio fue tenido en cuenta desde los años 30, fue en la década de los 60 cuando se le dio un uso específicamente para los suelos. Diversos trabajos dieron a conocer reconocidos autores para la mecánica de suelos (Swarbrick (1995), Ridley (1996), Luy Likos (2004), Fredlund y Rahardjo (2011) entre otros), y hoy en día ha sido validado por normas oficiales como ASTM, 1993.

Un principio básico propuesto por Ridley (1996) establece que la humedad de un material absorbente (como el papel filtro) se relaciona con la succión generada para atraer agua hacia su interior. A partir de este principio, un papel filtro es colocado sobre una muestra de suelo, con el fin que absorba parte de la humedad del suelo hacia el papel filtro; la fracción de humedad extraída por el papel desde el suelo es muy pequeña como para generar efectos negativos en la muestra.

El sistema de medición contempla un montaje donde el papel filtro está en un contacto directo con la muestra de suelo (succión matricial), A su vez también es posible medir succión total, sin embargo habría que hacer una variación en el montaje; dejando un espacio entre el papel filtro y la muestra de suelo (Martínez y Rodríguez, 2003).

Para Pineda (2003), las ventajas del uso del papel filtro para determinar succión matricial o total en suelos, radican en su simplicidad, su precisión y bajo costo.

3.3.1.1. Principio de Operación

Para medir succión matricial, se coloca cuidadosamente y con los elementos de manipulación correspondientes, un papel filtro en contacto directo con la muestra de suelo que se desee medir para que absorba humedad por flujo capilar, sobre estos se colocan adicionalmente unos discos de acrílicos que me garanticen la protección tanto del papel como de la muestra a medir. Este conjunto es sellado herméticamente y puesto en un lugar (cámara de aislamiento térmico) donde se garantice su temperatura y presión constante en su interior durante el tiempo requerido. (Figura 3-6).

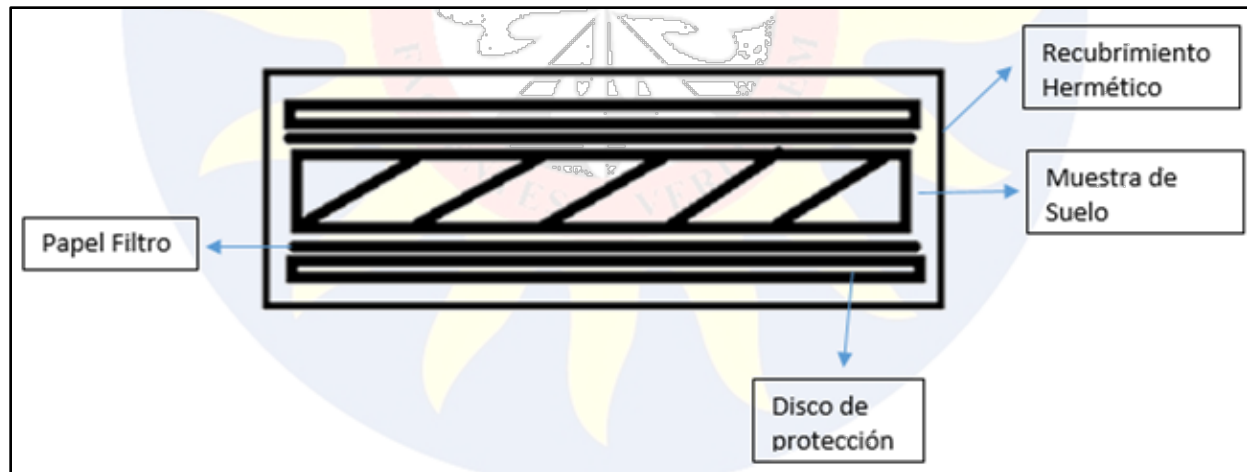


Figura 3- 6. Montaje de muestra de suelo para medición de succión con papel filtro.

Luego de haber alcanzado el equilibrio (7 días), se determina la cantidad de agua absorbida por el papel filtro y la succión de la muestra de suelo es calculada por medio de una curva de calibración descrita mediante una ecuación lineal (Pineda, 2003).

La Tabla 3-1. Muestra un resumen de las diferentes calibraciones realizadas para la medición de succión por medio de dos de los principales tipos de papel filtro (Wathman 42 y Schleicher and Schuell No 589).

Tabla 3- 1. Resumen de Calibraciones Realizadas para los principales Tipos de Papel de Filtro Para la medición de succión en suelos. Tomada de Pineda (2003).

INVESTIGADORES	TIPO DE PAPEL DE FILTRO	RANGO DE HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO, W _c [%]	Log ₁₀ Succión [kPa]
Fawcett y Collis George (1967)	Wathman 42	W _c <43 W _c >43	4.777-0.06(W _c) 2.271-0.023(W _c)
McQueen y Miller (1968)	Schleicher and Schuell No. 589	W _c <54 W _c >54	5.246-0.0723(W _c) 1.895-0.0103(W _c)
Al-Khafaf y Hanks (1974)	Schleicher and Schuell No. 589	W _c <83 W _c >83	5.117-0.0337(W _c) 1.983-0.009(W _c)
McKeen (1980)	Schleicher and Schuell No. 589	W _c <66 W _c >66	4.9-0.0624(W _c) 1.25-0.0069(W _c)
Hamblin (1981)	Wathman 42		5.281-0.0822(W _c)
Chandler y Gutierrez (1986)	Wathman 42		4.85-0.0622(W _c)
Gracen, Walker y Cook (1987);	Schleicher and Schuell No. 589	W _c <54 W _c >54	5.058-0.0688(W _c) 1.882-0.0102(W _c)
ASTM D 5298, (1992)	Wathman 42	W _c <45.3 W _c >45.3	5.327-0.078(W _c) 2.413-0.0135(W _c)
Chandler, Crilly & Montgomery-Smith (1991)	Wathman 42	W _c <47 W _c >47	4.842-0.0622(W _c) 6.05-2.481Log(W _c)
Miller y Nelson, (1992)	TS 4705 – F10	W _c <43	4.883-0.0599(W _c)

Para la presente investigación la calibración a tomar es la adoptada por Pineda (2003), (Wathman 42) y a que es la más aceptada para el cálculo de succión. La determinación del contenido de humedad del papel filtro debe realizarse por medio del uso de una balanza de 0.0001 gramos de precisión; donde se determina la masa del papel húmedo, luego el papel de filtro se somete secado por un lapso aproximado de dos horas dentro de un horno estandarizado a una temperatura constante de 110±5 °C, horno similar al usado en la determinación de la humedad del suelo. Finalmente se obtiene la masa del papel seco. El papel debe manipularse con unas pinzas para impedir el contacto directo con las manos del operador.

La Tabla (3-2), muestra los principales métodos existentes para la medición de succión en suelos, cada uno ellos enseña un rango de presiones sobre el cual brinda una buena aproximación sobre la componente de succión que puede medir y el tiempo necesario para aplicar la prueba.

Tabla 3- 2.Métodos de Medición de Succión. Tomada de Ridley (1996).

SISTEMA	MEDICION	RANGO (kPa)	Tiempo de Equilibrio aproximado
Psicrómetro térmico	Total	100 - 7500	Minutos
Psicrómetro Termoresistencias/transistores	Total	100 - 71000	Minutos
Papel de filtro (en contacto)	Matricial	30 - 30000	7 días
Papel de filtro (sin contacto)	Total	400 - 30000	7 a 14 días
Bloque Poroso	Matricial	30 - 3000	Semanas
Conductividad térmica	Matricial	0 - 300	Semanas
Plato de Succión	Matricial	0 - (-)90	Horas
Plato de presión	Matricial	0 - 1500	Horas
Tensiómetro estándar	Matricial	0 - 100	Minutos
Tensiómetro osmótico	Matricial	0 - 1500	Horas
Tensiómetro I.C.	Matricial	0 - 1800	Minutos

3.3.2. CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA

3.3.2.1.Definición

La formación de succión total de un material térreo (con sus componentes matricial y osmótica) está directamente relacionado con cambios en la humedad del mismo. (Pineda, 2003). Estos cambios de humedad están relacionados directamente con la saturación del material.

Dichas relaciones de succión – humedad para un material térreo (como el investigado en la presente investigación) se expresan en su gran mayoría a través de la curva de retención de agua. Para Martínez y Rodríguez (2003), la variación del contenido de agua de una curva de retención de agua, puede expresarse en función de la humedad gravimétrica (ω) humedad volumétrica (θ), o el grado de saturación (S) y la succión ($u_a - u_b$). Figura (3-7).

Mitchell y Soga (2005), establecen que la forma de la curva depende básicamente de factores como: tamaño y forma de las partículas, tamaño y forma de los poros de la matriz del suelo, fábrica del suelo, e historia de esfuerzos del mismo.

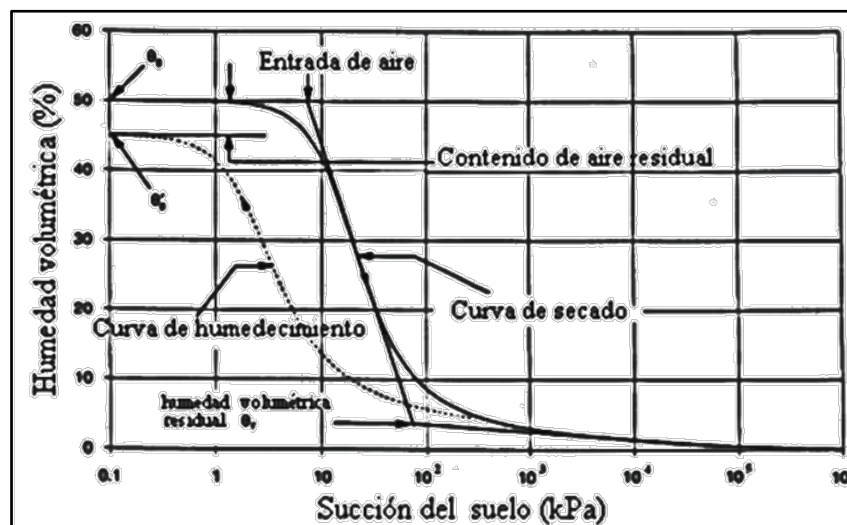


Figura 3- 7. Esquema típico de una Curva de retención. (Tomada de Fredlund, 1994).

3.3.2.2. Descripción de una Curva de Retención.

La Curva de Retención de agua para un material determinado, suele presentarse de manera Gráfica en un plano cartesiano en donde en el eje horizontal se representa el valor de la succión

en escala logarítmica, y en el eje vertical en escala aritmética, se representa la humedad gravimétrica o volumétrica, o el grado de saturación. (Figura 3-6).

Para Pineda (2003) la curva de retención de agua, parte del principio de un estado inicial de saturación total de agua (100%) que se somete a pérdidas de humedad. Dicho suelo se encuentra en un proceso de secado, sin embargo, si un suelo en estado seco o con saturación parcial de agua (<100%) presenta ganancias de humedad; se dice que el mismo se encuentra en un proceso de humedecimiento. Para ambos procesos (secado o humedecimiento); la curva de retención de agua puede ser definida.

Esta curva es obtenida a partir de mediciones en succión sobre las muestras de suelo, durante un periodo determinado haciendo variar el contenido de humedad de las mismas. Como se mencionó anteriormente, las mediciones de succión pueden llevarse a cabo por diferentes métodos usados en la actualidad, o por combinación de los mismos. En la presente investigación se contempla solamente el método de papel filtro como método para cuantificar la succión matricial presente en el suelo.

Para Dinnen (2000) una trayectoria de secado comienza con un suelo saturado o cercano a una saturación del 100% y llega a un punto donde hay una transición que designa como valor de presión de entrada de aire, (lo que en ingles se designa como AEV “*Air entry Value*”) punto donde el aire empieza a ingresar al interior de los poros del suelo. A partir de ese momento, se encuentra una zona intermedia donde los puntos describen una tendencia lineal decreciente, con una pendiente negativa y de un valor absoluto alto hasta donde la saturación inicia nuevamente en un estado casi constante con tendencia lineal, pero ahora, con una pendiente muy baja (menor a la anterior) que corresponde a la zona final. En la zona intermedia se requiere un incremento

bajo en el valor de la succión para lograr un descenso considerable en el nivel de saturación, mientras que en la zona final la saturación se vuelve casi constante; contrariamente, allí se requiere un incremento alto en el valor de la succión para lograr sacar del interior de la muestra de suelo una mínima cantidad de agua.

Estas tres zonas; cada una de ellas, se pueden representar con una línea recta que describa la tendencia de los puntos allí comprendidos. Los puntos de intersección entre estas líneas determinan puntos de interés. Ver Figura (3-7).

La intersección entre la línea de la zona inicial y la zona intermedia muestra el punto donde se alcanza el valor de succión para la cual se inicia la entrada de aire al interior de los poros de la masa de suelo (AEV), es allí donde la saturación deja de ser del 100%.

La ordenada sobre la cual se presenta la intersección entre la línea de la zona intermedia y la zona final, muestra el valor de succión en el que se alcanza la saturación residual, es decir donde el contenido de humedad de la muestra requiere un mayor esfuerzo para ser retirado.

Para Pineda (2003) la naturaleza discontinua del suelo y los cambios en el arreglo de las partículas sólidas originadas por los procesos de secado y/o humedecimiento (cambios en la fábrica del material); y por consiguiente del tamaño de los poros del suelo, hacen que las Curvas Características de Retención no sean idénticas en su forma gráfica. La diferencia de las curvas refleja el fenómeno de histéresis en las relaciones succión-humedad (Figura 3-8).

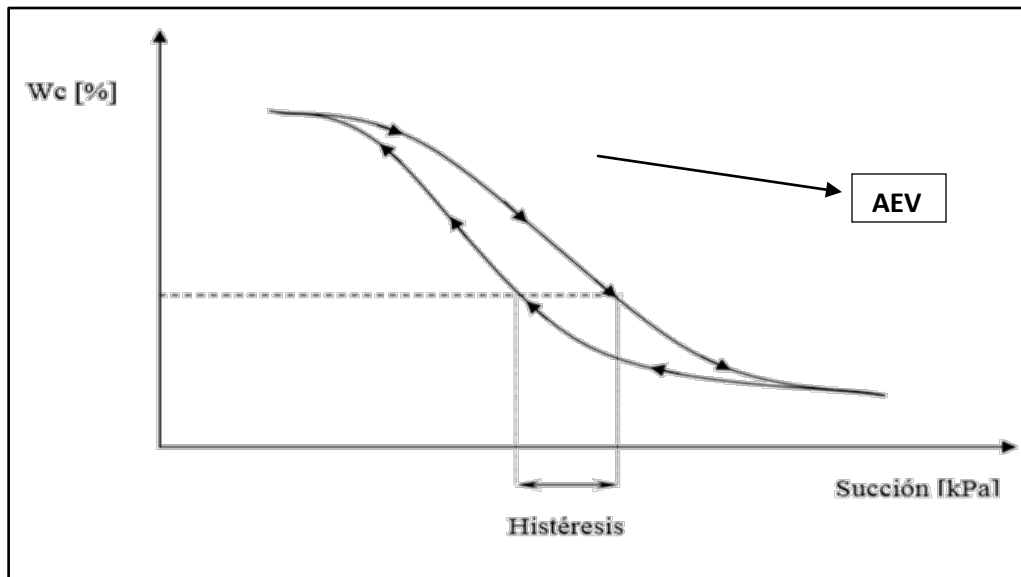


Figura 3- 8. Curvas de retención de agua típicas para un suelo fino en secado y Humedecimiento. Efecto de Histéresis para un mismo contenido de humedad. Pineda (2003).

4. PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó material, extraído de la vía, que del municipio de Siberia conduce al municipio de Tenjo en el departamento de Cundinamarca, como representativo de la zona de suelos blandos y parcialmente saturados de la sabana de Bogotá D.C. Colombia. Se realizaron dos perforaciones mecánicas a veinte (20) metros de profundidad, tanto al costado lateral izquierdo como al costado lateral derecho, obteniendo muestras continuas que permitieron evaluar la incidencia de árboles presentes en la zona y pérdidas de

humedad en el comportamiento físico mecánico del suelo hallado en la zona. Figura (4-1, 4-2 y 4-3).

El registro fotográfico de exploración y perforación se muestra en el anexo IV. El plan de trabajo en la parte experimental consistió posterior a la toma de muestras, en la identificación y caracterización del material encontrado (arcilla), por medio de ensayos de clasificación, desarrollo de ensayos mecánicos como el de consolidación unidimensional y otros como medición de succión matricial. A partir de cada una de las propiedades y resultados obtenidos (físicos y mecánicos) a su vez incluyendo las condiciones encontradas para agua de poros, se analizó el comportamiento de la arcilla superficial de la sabana de Bogotá D.C. y se obtuvieron valores de K_0 por primera vez en este tipo de suelo, que dependen de la historia de esfuerzos del mismo.

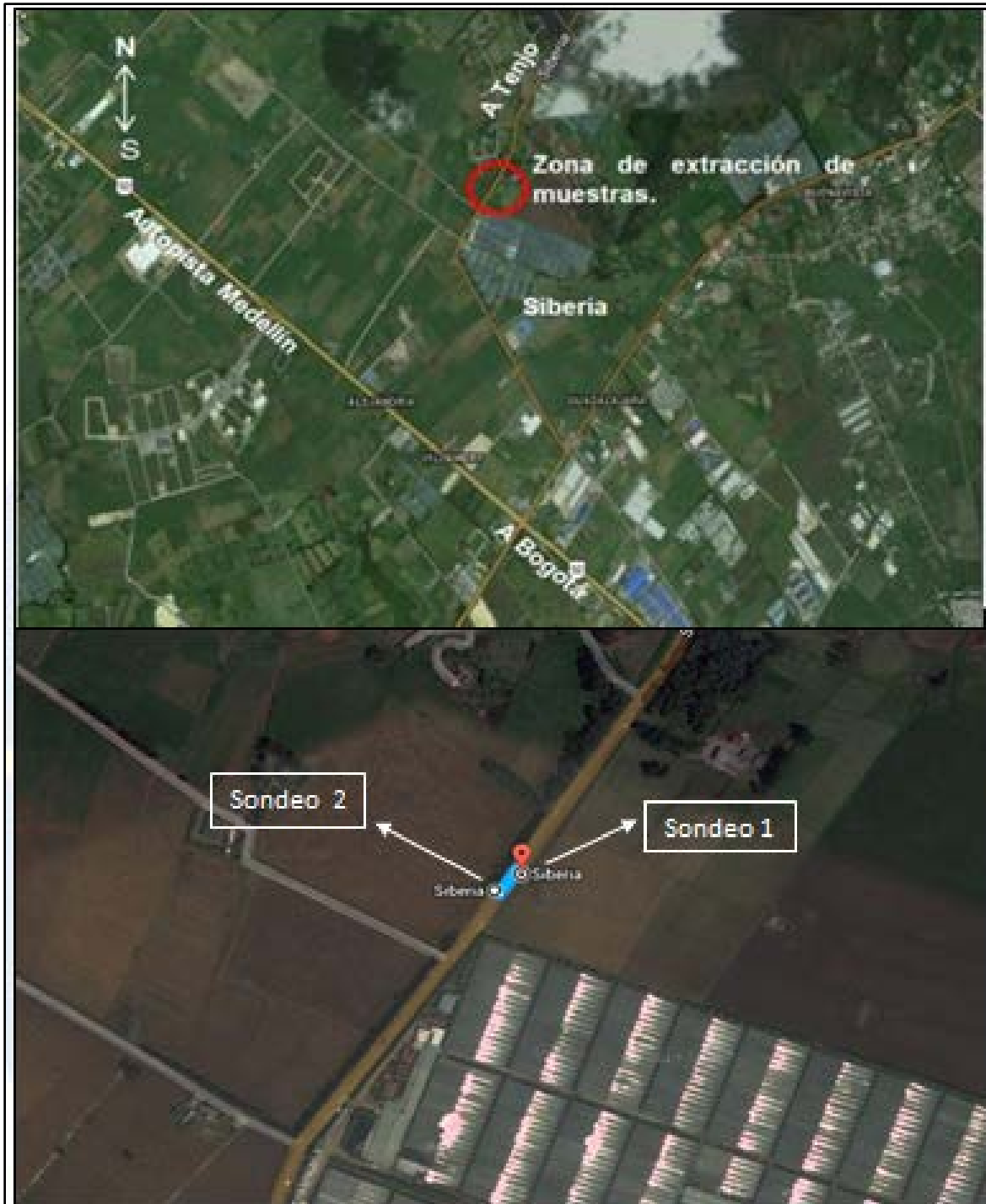


Figura 4- 1. Localización de zona de extracción de muestras y de los Sondeos 1 y 2, Coordenadas Este/Norte: 990951/1020312 – Este/Norte: 991003/1020388. Sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS de los orígenes de la zona de proyección Gauss Kruguer en Colombia. Fuente: Google Earth.



Figura 4- 2. Problemas de fisuramiento y asentamiento en las vía de estudio.



Figura 4- 3. Problema de inestabilidad y fisuramiento en la vía de estudio a causa de los arboles presentes en la zona.

4.1.1. Descripción Geológica de la zona de estudio

La ciudad de Bogotá está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, a una altura de 2640 m.s.n.m. En ella se distinguen dos zonas geomorfológicas principales: la primera corresponde a la zona plana, donde se asienta la mayor parte de la población y el urbanismo, conformada por depósitos poco consolidados, y la segunda corresponde a la zona montañosa conformada por rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cetráceo y Terciario. (Ingeominas, 2005).

Para Guerrero (1992), la Sabana de Bogotá está conformada por el Grupo Villeta y las Formaciones Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme, Tilatá, Sabana y Tunjuelo. Las Formaciones Tilatá (Plioceno), Sabana (Plioceno, Pleistoceno y Holoceno), y Tunjuelo (Pleistoceno y Holoceno) son depósitos lagunares, fluviales y fluvio-glaciares depositados en el centro y en los bordes de la cuenca durante los últimos 3.5 millones de años. En la Figura (4-4) se muestra un esquema general de la Sabana de Bogotá.

La perforación realizada en la presente investigación, hace parte de la formación Tilatá (Terciario Plioceno), la cual Guerrero (1992) describe como una formación hallada en la hacienda Tilatá en el cañón del río Bogotá, a 4 km del SW de Chocontá. La cual está compuesta por gravas, gravillas, arenas, limos y arcillas grises, así como numerosos niveles de piroclastos finos en capas lenticulares poco consolidadas. Alcanza un espesor variable hasta unos 300 m. La zona de estudio (Siberia - Tenjo), contempla las fallas del Chital y Subachoque. A su vez el sinclinal de Subachoque (Figura 4-5), y anticlinal de Tabio.

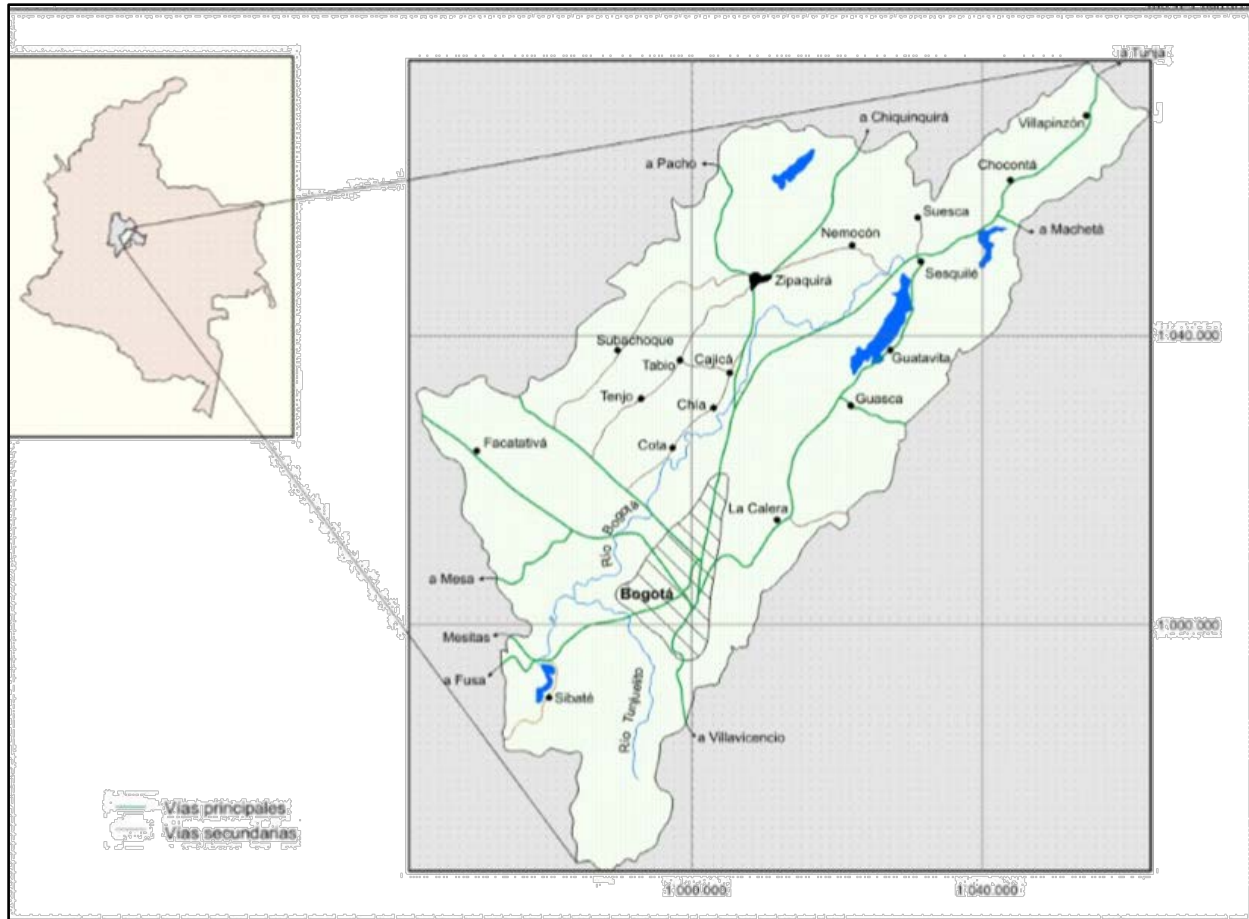


Figura 4- 4. Localización de la Sabana de Bogotá D.C y sus vías principales. Tomada de Ingeominas (2005).

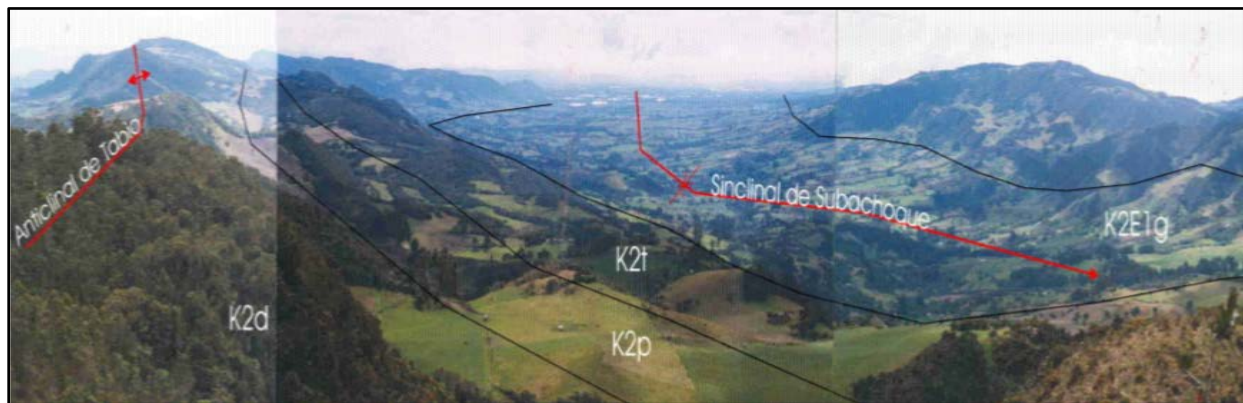


Figura 4- 5. Sinclinal de Subachoque, formando el valle, aflora formación de Guaduas y hacia los flancos las unidades del grupo Guadalupe. Tomada de Ingeominas (2005).

4.1.2. Estratigrafía del Cretácico superior del occidente de la sabana de Bogotá D.C.

El espesor máximo de los sedimentos hasta el nivel de la roca, alcanza en la parte occidental del depósito valores de 780 metros y se va reduciendo al acercarse a la zona montañosa (Ingeominas 2005). En el sitio de exploración (descrito en el numeral 4.1) donde se tomaron las muestras para la presente investigación, el espesor del depósito alcanza profundidades mayores a los 150 metros.

Ingeominas (2005) establece una estratigrafía esquemática del cretácico superior para el occidente de la sabana de Bogotá D.C. (Figura 4-6). La nomenclatura que usa corresponde a las formaciones de Simijaca, la Frontera y Conejo. A su vez Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna.

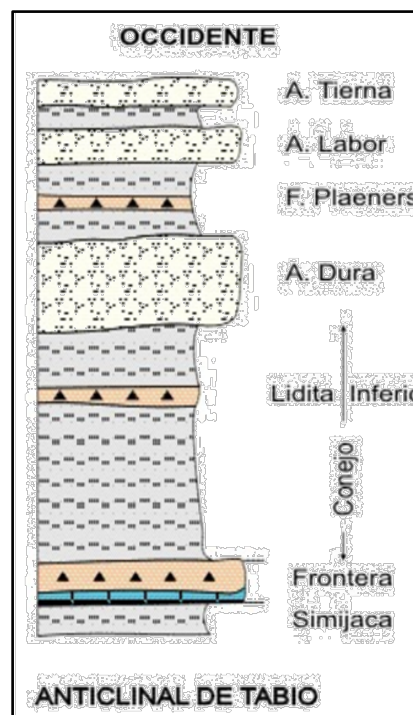


Figura 4- 6. Sección estratigrafía generalizada y esquemática del Cretácico superior del Occidente de la Sabana de Bogotá D.C. Tomada de Ingeominas (2005).

4.1.3. Exploración de Subsuelo

Como se mencionó anteriormente para llevar a cabo de manera satisfactoria la parte experimental, se decidió recuperar material para realizar las diferentes pruebas de laboratorio por medio de dos perforaciones en la vía que de Siberia conduce a Tenjo.

La exploración de subsuelo se realizó utilizando un equipo de perforación manual alcanzando profundidades de 20 metros para cada uno de los dos sondeos o perforaciones. Donde no se registró el nivel freático. Las muestras de suelo se tomaron cada 50 cm aproximadamente, obteniendo muestras alteradas a través de un toma muestras SPT e inalteradas a través de un tubo de toma muestras Shelby, teniendo en cuenta las recomendaciones y procedimientos contenidos en la norma I.N.V-E 105-07 (Obtención de muestras para probetas de ensay o mediante tubos de pared delgada, o tubos Shelby).

Las muestras alteradas se conservaron en bolsas herméticas para conservar su humedad y propiedades físicas iniciales debidamente rotuladas y marcadas. Para las muestras inalteradas luego de ser extraídas, se protegían con papel aluminio y papel látex (vinipel) para evitar pérdidas de humedad, luego eran debidamente almacenadas en tubos de PVC acordes con su longitud para conservar su forma y consistencia para la posterior ejecución de laboratorios.

4.1.4. Mineralogía, Composición Química y Descripción del Perfil Estratigráfico del Subsuelo.

4.1.4.1 Mineralogía

La composición mineralógica de los minerales del suelo encontrado fue identificada por medio del método de difracción de rayos X, el cual permite la identificación de los minerales de la arcilla encontrada presentes en una masa de suelo, y de las fases mineralógicas del mismo, en donde la difracción se genera cuando los rayos que se inciden sobre la superficie del suelo analizado se re-emiten y difractan como respuesta a dicha incidencia en todas las direcciones, generando que el rayo incidente se separe del difractado y este rango se tome como patrón que permite identificar la mineralogía en la muestra. La difracción de rayos X en la presente investigación se determinó tomando tres muestras del sondeo número dos a profundidades de 2.00, 8.00 y 18.00 metros de profundidad identificadas como S2-M5, S2-M13 y S2-M23.

Como resultado se obtuvo una alta presencia de minerales como la Caolinita, el cual es un mineral dominante en el suelo arcilloso de tipo silicato estratificado, así como otros identificados en ella que no son tan dominantes como el Cuarzo, Micas y Esmectita. Y a en los difractogramas realizados para cada una de las muestras mencionadas anteriormente se logra observar la presencia de Montmorillonita, Vermiculita, Clorita, Halosita, Gibbsita, silicatos laminares, Y eso, Hematites, Goetita, Cristobalita, Ilmenita, Cuarzo, Feldespatos, Calcita, y Magnetita en cantidades apreciables. Los difractogramas son mostrados en el Anexo 3 apéndice A.

4.1.4.2. Composición Química

La composición química de la arcilla encontrada se identificó a partir del ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX); a partir del cual se llega a la plena identificación de los elementos químicos presentes en el suelo arcilloso, con excepción de los elementos livianos (H), (C), (Li), (Be), (B),

(N), (O) y de los elementos transuránicos. Las muestras a analizar pueden ser sólidas o líquidas, para objetos de la presente investigación se tomaron sólidas, ya que se pueden llevar a cabo análisis no destructivos. Para el mencionado ensayo se tomaron las mismas tres muestras usadas para ensayo de DRX (difracción de rayos X) mencionado en el numeral 4.1.4.1.

Los resultados de la composición química de la arcilla encontrada (ensayo de fluorescencia de rayos X) son presentados en la Tabla (4-1). Como resultado se obtiene que para cada una de las tres muestras estudiadas, el óxido de silicio es el que mayor concentración presenta en el material, ocupando entre un 65% – 80 %. En una menor escala encontramos óxido de aluminio en un 15% a 20 % de las muestra analizadas, seguido a este encontramos el óxido ferroso en un porcentaje mucho menor entre el 3.8 y 4.7 % para las muestras 5 y 13 y ligeramente por encima del 11% para la muestra 23, lo cual indica su alto contenido a profundidades mayores a 15 metros. Las demás composiciones químicas están en un porcentaje mucho menor del 1% y otras en pequeñas partes por millón.

Tabla 4- 1. Mineralogía de la Arcilla encontrada, a través del ensayo de fluorescencia de rayos X.

Nombre del Elemento	Símbolo Del Elemento	XRF-4047 S2-M5	XRF-4048 S2-M13	XRF-4049 S2-M23
Óxido de Silicio	Si O ₂	75,91%	73,23%	65,13%
Óxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	16,09%	19,40%	16,64%
Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	4,70%	3,80%	11,04%
Óxido de Potasio	K ₂ O	0,90%	1,07%	1,05%
Dióxido de Titanio	TiO ₂	0,78%	0,80%	0,77%
Óxido de Magnesio	MgO	0,44%	0,59%	0,62%
Óxido de Calcio	CaO	0,30%	0,23%	0,43%
Óxido de Sodio	Na ₂ O	0,25%	0,19%	0,18%
Óxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0,06%	0,08%	0,17%
Óxido de Manganeseo	MnO	0,00%	0,00%	0,04%
Azufre	S	269 ppm	260 ppm	348 ppm
Circonio	Zr	265 ppm	212 ppm	141 ppm
Bario	Ba	235 ppm	244 ppm	287 ppm
Zinc	Zn	116 ppm	207 ppm	230 ppm
Estroncio	Sr	96 ppm	97 ppm	94 ppm
Cromo	Cr	87 ppm	102 ppm	97 ppm
Plomo	Pb	55 ppm	38 ppm	54 ppm
Rubidio	Rb	54 ppm	57 ppm	54 ppm

Níquel	Ni	53 ppm	60 ppm	60 ppm
Cobre	Cu	--	12 ppm	11 ppm
Arsénico	As	--	--	--

4.1.4.3. Perfil Estratigráfico del subsuelo

De las dos exploraciones realizadas para este proyecto se obtuvieron los perfiles que se describe a continuación (Tabla 4-2 y 4-3).

Tabla 4- 2. Perfil del subsuelo encontrado en la vía Siberia – Tenjo para el Sondeo No 1.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
0 - 1.50	Limo con suelo orgánico y arena de relleno color amarillo, presenta material granular usado como soporte de la vía existente.
1.50 - 7.00	Arcilla Limosa café con oxidaciones, levemente fisurada, humedad media, consistencia media alta, plasticidad baja
7.00 - 10.00	Arcilla gris verdosa de humedad alta consistencia baja y plasticidad media - alta
10.00 - 20.00	Arcilla gris oscura, de humedad alta consistencia baja y plasticidad alta

Tabla 4- 3. Perfil del subsuelo encontrado en la vía Siberia – Tenjo para el Sondeo No 2.

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
0 - 1.50	Limo con suelo orgánico y arena de relleno color amarillo, presenta material granular usado como soporte de la vía existente.
1.50 - 9.00	Arcilla Limosa café con oxidaciones, y presencia de raíces de los arboles presentes en el estrato de suelo, suelo fisurado, con humedad media, plasticidad baja, consistencia media alta
9.00 - 14.00	Arcilla Limosa gris verdosa, de humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta.
14.00 - 20.00	Arcilla gris oscura, de humedad alta consistencia baja y plasticidad alta

Para una mejor identificación del subsuelo de la sabana de Bogotá, y una mejor descripción visual de lo que se ha descrito en el presente numeral, la evidencia fotográfica de la exploración, y perforaciones realizadas se encuentran en el anexo IV.

4.2. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MATERIAL ARCILLOSO

El geomaterial extraído se utilizó para realizar ensayos de clasificación y caracterización básicos. Por medio de estos se determinaron propiedades índice como: humedad natural, peso unitario, gravedad específica, relación de vacíos, porosidad, grado de saturación, límite líquido, límite plástico, límite de contracción y granulometría por hidrómetro. Se tomaron muestras inalteradas con el fin de establecer presiones del agua de poros a partir de la medición de succión matricial por medio del método de papel filtro.

Los ensayos de caracterización geotécnica del material arcilloso encontrado, se llevó a cabo sobre muestras alteradas e inalteradas tomadas cada 0.50 m de profundidad, siguiendo los criterios y lineamientos establecidos por las normas del Instituto Nacional de Vías (I.N.V-E 07). También se establecieron características de compresibilidad en las arcillas extraídas a partir de ensayos de consolidación rápida. En la Tabla (4-4) se resumen los ensayos ejecutados y la norma adoptada para su realización.

4.2.1. Propiedades Índice del Material Arcilloso

El trabajo de laboratorio realizado obtuvo como resultado humedad natural (ω_n), peso unitario total (γ_t), gravedad específica (G_s) y los límites de consistencia, (líquido (LL), plástico (LP)) y de

contracción (LC). Además se calculó el Índice de plasticidad (I_p). Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla (4-5) de acuerdo con la profundidad analizada.

Tabla 4- 4. Cuadro de ensayos ejecutados Vs norma aplicado del Instituto Nacional de Vías. Fuente: propia.

Ensayo	Norma I.N.V.
Determinación en Laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo.	I.N.V. E-122-07.
Peso Unitario Total	I.N.V. E – 217 – 07
Límites de Atterberg: -Límite Líquido -Limite Plástico -Límite de Contracción	I.N.V. E – 125 – 07 I.N.V. E – 126 – 07 I.N.V. E – 127 – 07
Hidrometría	I.N.V. E – 124 – 07
Gravedad específica	I.N.V. E – 128 – 07
Consolidación unidimensional en suelos	I.N.V. E – 151 – 07
Determinación de la succión de un suelo con el método del papel de filtro	I.N.V. E – 159 – 07

Tabla 4- 5. Tabla resumen propiedades índice del material arcilloso.

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	$\omega_n(\%)$	γ_t (kN/m ³)	LÍMITES				Gs
					LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	
1	1	0,00 - 0,50	10,52	-	-	NTLP	-	-	2,48
	2	0,50 - 1,00	48,16	-	-	NTLP	-	-	2,46
	3	1,00 - 1,50	-	-	-	NTLP	-	-	-
	4	1.50-2.00	73,45	15.26	116,95	55,42	39,42	61,53	2,66
	5	2,00 - 2,50	-	-	-	-	-	-	-
	6	2.50-3.00	90,01	12.8	135,98	48,86	52,06	87,12	2,79
	7	3,00 - 3,50	-	11.3	-	-	-	-	-
	8	3.50 - 4.00	105,96	-	171,44	56,93	33,29	114,51	2,69
	9	4,00 - 4,50	-	-	-	-	-	-	-
	10	4.50 - 5.00	108,13	14.6	149,64	50,40	25,42	99,24	2,74
	11	5,00 - 5,50	-	-	-	-	-	-	-
	12	5.50 - 6.00	139,32	12.1	180,08	76,63	34,70	103,45	-
	13	6,00 - 6,50	-	-	-	-	-	-	-
	14	6.50 - 7.00	141,70	13.2	172,11	94,77	27,99	77,34	2,70
	15	7,50 - 8,00	-	-	-	-	-	-	-
	16	8,00 - 8,50	110,14	-	160,00	54,77	31,59	105,23	2,79
	17	9,00 - 9,50	-	-	-	-	-	-	-
	18	9.50 - 10.00	104,25	11.5	131,46	46,97	28,35	84,49	2,66
	19	10.50 - 11.00	-	-	-	-	-	-	-
	20	11,00 - 11,50	115,56	-	172,11	81,91	27,68	90,20	2,78
	21	12,00 - 12,50	-	-	-	-	-	-	-
	22	12.50 - 13.00	201,15	11.3	-	-	33,12	-	2,76
	23	13.50 - 14.00	-	-	-	-	-	-	-
	24	14,00 - 14,50	127,70	-	143,55	76,34	-	67,21	2,75
	25	15,00 - 15,50	-	-	-	-	-	-	-
	26	15.50 - 16.00	206,08	-	93,39	55,63	-	37,76	2,75
	27	17,00 - 17,50	-	-	-	-	-	-	-

28	17,50 - 18,00	115,64	-	134,49	110,97	27,57	23,52	2,77
29	18,00 - 18,50	-	-	-	-	-	-	-
30	18,50 - 19,00	133,58	-	-	-	17,07	-	2,73
31	19,50 - 20,00	-	-	155,71	-	-	-	-

2	1	0,00 - 0,50	49,39	-		43,50	-	-	2,38
	2	0,50 - 1,00	0,00	-		51,03	-	-	2,24
	3	1,00 - 1,50	49,39	-		44,89	-	-	2,60
	4	1,50 - 2,00	45,45	14.4	79,56	57,74	28,56	21,82	2,70
	5	2,00 - 2,50	-	-	-	-	-	-	-
	6	2,50 - 3,00	74,90	13.0	100,60	52,12	30,91	48,48	2,70
	7	3,00 - 3,50	45,76	14.1	114,79	56,88	21,92	57,91	2,71
	8	3,50 - 4,00	56,48	-	128,59	53,90	25,86	74,69	2,67
	9	4,00 - 4,50	-	-	-	-	-	-	-
	10	4,50 - 5,00	76,48	14.1	-	-	31,64	-	2,7
	11	6,00 - 6,50	-	-	-	-	-	-	-
	12	6,50 - 7,00	110,99	12.8	158,32	66,64	26,69	91,68	2,77
	13	8,00 - 8,50	-	-	-	-	-	-	-
	14	8,50 - 9,00	125,96	10.9	160,62	68,13	16,19	92,49	276
	15	10,00 - 10,50	-	-	-	-	-	-	-
	16	10,50 - 11,00	112,47	-	141,26	53,24	23,52	88,02	
	17	12,00 - 12,50	-	-	-	-	-	-	-
	18	12,50 - 13,00	127,66	12.3	135,65	77,25	23,45	58,40	2,76
	19	14,00 - 14,50	-	-	-	-	-	-	-
	20	14,50 - 15,00	116,97	-	134,84	50,00	27,78	84,84	2,79
	21	16,00 - 16,50	-	-	-	-	-	-	-
	22	16,50 - 17,00	116,19	11.3	152,01	-	34,39	-	2,76
	23	18,00 - 18,50	-	-	-	-	-	-	-
	24	18,50 - 19,00	134,35	-	160,28	62,41	37,57	97,87	2,73

4.2.1.1. Humedad Natural.

El contenido de humedad natural en el suelo arcilloso de estudio, se determinó tanto para los sondeos 1 y 2 en muestras extraídas en campo cada 50 cm. Dichas perforaciones se realizaron en noviembre del año 2013, en época de invierno.

En la Figura 4-7. Se muestra la variación de la humedad natural vs la profundidad para ambos sondeos, donde se ve la diferencias de humedad que presentaron ambos sondeos.

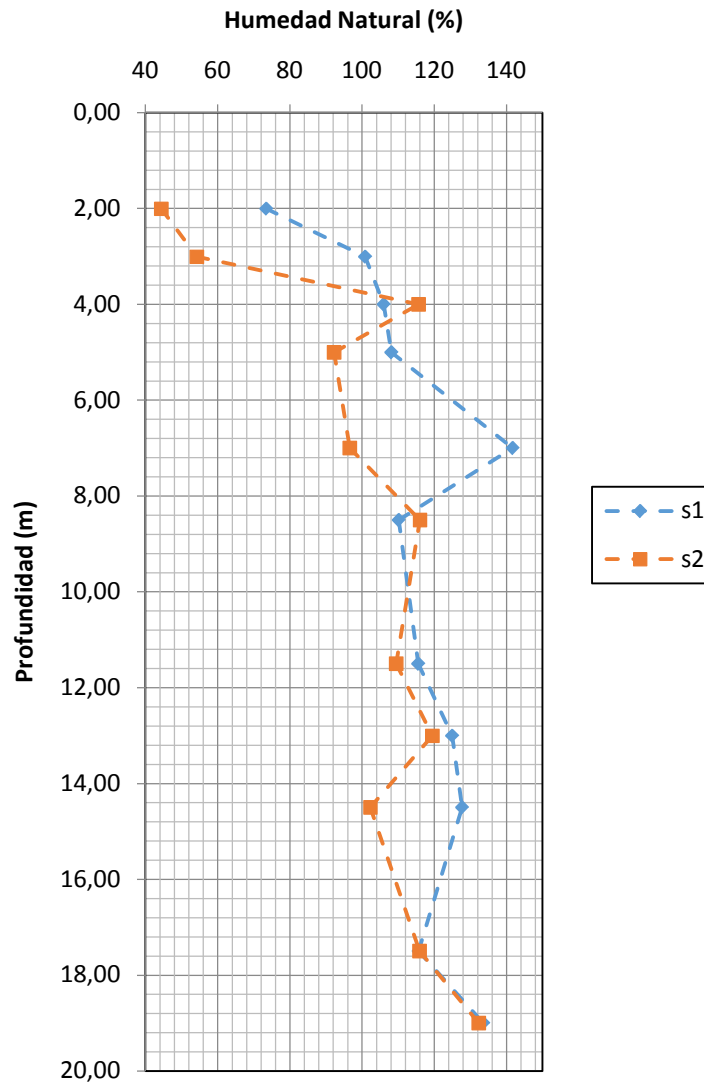


Figura 4- 7

Figura 4-7. Humedad Natural (%) Vs Profundidad (Z), para los sondeos 1 y 2.

El perfil anterior, muestra que el sondeo uno, presento más humedad natural en los primeros metros que el sondeo número dos, esto puede explicarse a que dicho sondeo no presentaba a su alrededor arboles presentes en la zona como si lo presentaba el sondeo número dos. Y a

que al estar sometido el suelo arcilloso a cambios intermitentes de humedad por condiciones ambientales, los arboles presentes en la zona suelen aprovechar dicho incidente climatológico para tomar agua presente en los poros del suelo y así mantener su estado natural.

4.2.1.2. Límites de Consistencia

Los límites de consistencia se realizaron sobre muestras inalteradas cada cincuenta centímetros (50 cm), el propósito de estos es clasificar el material encontrado en la zona y a su vez determinar algunas de sus propiedades para determinar el comportamiento del material.

4.2.1.2.1. Límite Líquido

Utilizando el procedimiento descrito en la norma (INV-E 125-07), se graficó el perfil presentado en la Figura (4-8) para los dos sondeos. En esta Figura se ve un comportamiento ascendente en los primeros metros pero cambia a mayor profundidad donde se hace decreciente; esto puede deberse a la presencia de materia orgánica en el suelo arcilloso en los primeros metros como así sucedió en la arcilla encontrada por Suarez y Suarez (2005). Los valores máximos que se presentan tanto para el sondeo uno como para el sondeo dos, se ubican en los primeros metros (180% a 6m y 255% a 5m respectivamente). A pesar de que ambos comportamientos tienden a ser decrecientes con la profundidad, los valores mínimos encontrados se encuentran a dos metros de profundidad para ambos sondeos (116% y 79% respectivamente).

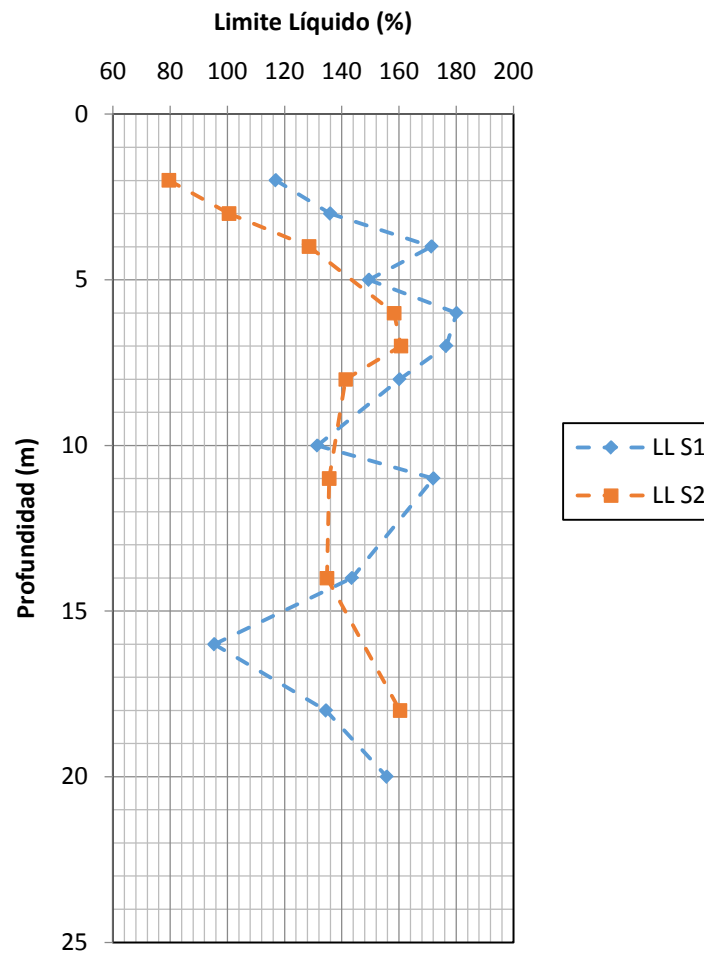


Figura 4- 8. Perfil de Límite Líquido para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.

4.2.1.2.2. Límite Plástico

Siguiendo la norma (INV-E 126-07) se graficó un perfil (Figura 4-9), de la misma forma que se hizo en el límite líquido correspondientes tanto para el sondeo uno como para el sondeo dos en el cual hay una tendencia demasiado variable del límite plástico, pues no presenta una claramente definida, los valores máximos se presentan a lo largo de toda la profundidad del suelo analizado, sin embargo el mayor es de 115 % para el sondeo 1, el

sondeo números 2 presenta un límite plástico con un mejor comportamiento, sin embargo sus valores también oscilan constantemente, con un valor máximo de 77 %.

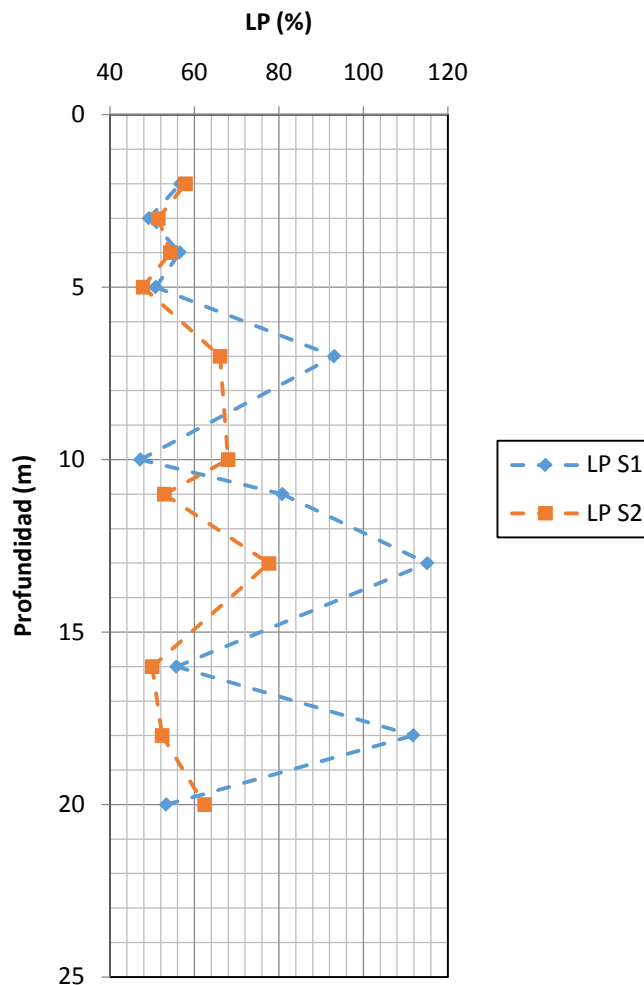


Figura 4- 9. Perfil de Límite Plástico para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.

4.2.1.2.3. Índice de Plasticidad

Se calcula como la diferencia que existe entre el límite líquido y el límite plástico, y la cual Lambe (1995) define como intervalo de humedad, en la cual el suelo posee una consistencia plástica (Figura 4-10).

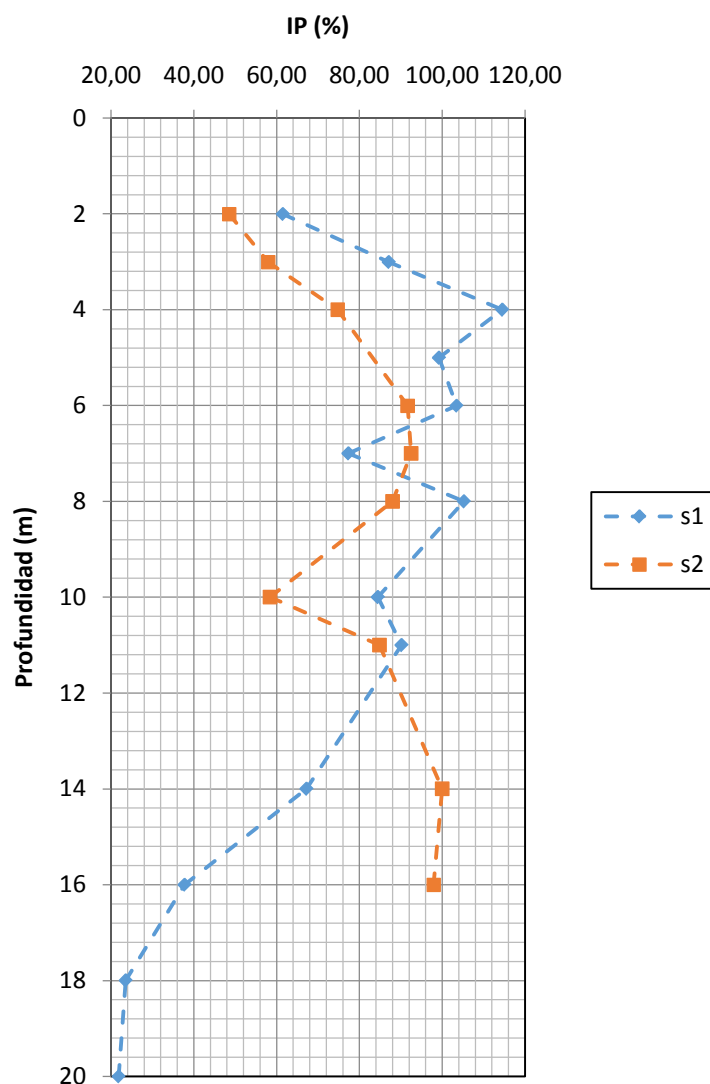


Figura 4- 10. Perfil de IP para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.

4.2.1.3.Límites de Contracción

Siguiendo la norma correspondiente (INV-E 127-07) se encontraron valores los cuales se describen en el perfil característico en la Figura (4-11).

Analizando los datos obtenidos para los dos sondeos, se observa que el sondeo 1 presenta un aumento del límite de contracción en los primeros metros, luego tiende a tomar un valor

constante y aproximándose a los 20 metros se torna decreciente. Los altos valores en los primeros metros se pueden deber a ataques de factores ambientales como evaporación, humedecimiento, desecación, entre otros que hacen que la fábrica del suelo se torne un material rígido (Martínez y Rodríguez, 2003). Para el sondeo dos sucede algo similar, sin embargo cerca a los 20 metros el límite de contracción no disminuye, esto puede ser causado por la alta presencia de raíces que se encuentra especialmente en esta zona, capaz de alterar la fábrica del suelo a esta profundidad (Suarez y Suarez, 2005).

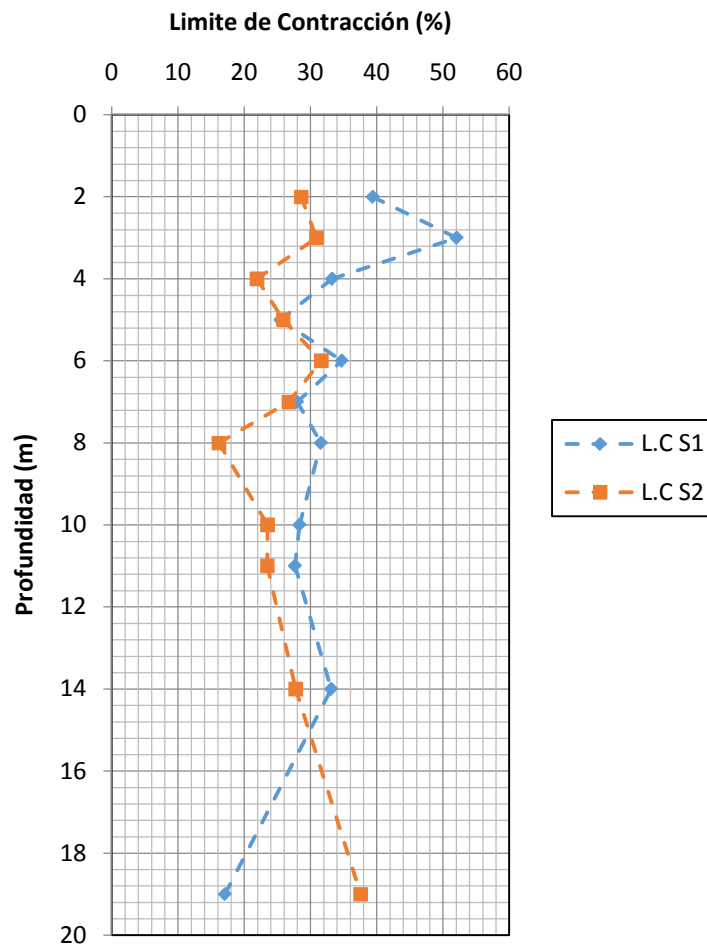


Figura 4- 11. Perfil del límite de contracción para la arcilla sondeos 1 y 2.

4.2.1.4. Peso Unitario Húmedo

El peso unitario húmedo, para ambos sondeos, no muestra grandes variaciones, sin embargo, tienden a tener una trayectoria decreciente con la profundidad como así lo muestra el perfil característico (Figura 4-12), donde para el sondeo uno los valores mínimos se encuentran en los primeros metros y al final de la perforación, a su vez los valores máximos se ubican en los cinco primeros metros. Por el contrario, para el sondeo dos, los valores mínimos ocurren a una profundidad media y final, sin embargo los valores máximos se ubican en los primeros metros generando esta tendencia arqueada.

Los valores para el sondeo uno van desde $15,25 \text{ kN/m}^3$ en las primeras capas superficiales, (valor máximo obtenido), empieza a tener un comportamiento decreciente, sin embargo vuelve a aumentar a una profundidad de cinco metros, y decrece con la profundidad hasta llegar a $11,13 \text{ kN/m}^3$ (valor mínimo obtenido).

El sondeo dos tiene un comportamiento algo similar, tomando valores de $14,35 \text{ kN/m}^3$ en los primeros metros (valor máximo obtenido), disminuyendo con la profundidad, pero a los cinco metros aumenta de nuevo, luego se torna decreciente registrando valores de $11,76 \text{ kN/m}^3$ como uno de los valores mínimos presentados. Esta clase de comportamientos para ambos sondeos, se debe a los procesos geológicos los cuales han sido formadores de este tipo de suelo.

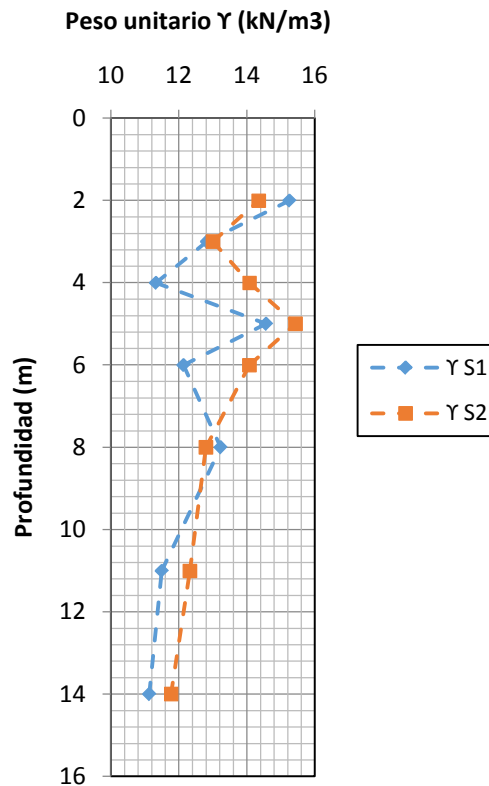


Figura 4- 12. Perfil de Peso Unitario Húmedo para la arcilla encontrada en los sondeos 1 y 2.

4.2.1.5. Clasificación del Material Arcilloso USCS

Con los resultados de caracterización anteriormente descritos, se realizó la clasificación del suelo encontrado para ambas perforaciones, según el sistema de clasificación unificado (USCS) por medio de la carta de plasticidad de Casagrande, como se muestra en la Figura (4-13) para el sondeo uno y dos, en la cual se ubican las muestras de acuerdo a su profundidad.

La Tabla (4-6), muestra la clasificación de suelos encontrada a su vez una aproximación composicional de cada una de las muestras.

Tabla 4- 6. Clasificación del Material Arcilloso.

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	LL (%)	IP (%)	Clasificación	Mineral
1	4	1.00- 2.00	116,95	61,53	ML	Caolinita
	6	2.50-3.00	135,98	87,12	MH	illita
	8	3.50 - 4.00	171,44	114,51	MH	illita
	10	4.50 - 5.00	149,64	99,24	CL	illita
	12	5.50 - 6.00	180,08	103,45	CH	Caolinita
	14	6.50-7.00	176,53	77,34	CH	Caolinita
	16	8.00 - 8.50	160,17	105,23	MH	illita
	18	9.50-10.00	131,46	84,49	CH	illita
	20	11.00 - 11.50	172,11	90,20	CH	Caolinita
	24	14.00 - 14.50	143,55	67,21	CH	Caolinita
	26	15.50-16.00	95,39	37,76	CH	Caolinita
	28	17.50-18.00	134,49	23,52	CH	Caolinita
	30	18.50-19.00	155,71	21,82	CH	illita
2	4	1.50-2.00	79,56	48,48	ML	Caolinita
	6	2.50-3.00	100,6	57,91	ML	Caolinita
	7	3.00 - 3.50	114,79	74,69	MH	Caolinita
	8	3.50 - 4.00	128,59	207,79	MH	Caolinita
	10	4.50 - 5.00	254,69	91,68	MH	Montmorillonita
	12	6.50 - 7.00	158,32	92,49	MH	Caolinita
	14	8.50 - 9.00	160,62	88,02	CL	Caolinita
	16	10.50 - 11.00	141,26	58,40	CL	Caolinita
	18	12.50 - 13.00	135,65	84,84	CH	Caolinita
	22	16.50- 17.00	152,01	100,00	CH	illita
	24	18.50 - 19.00	160,28	97,87	CH	Caolinita

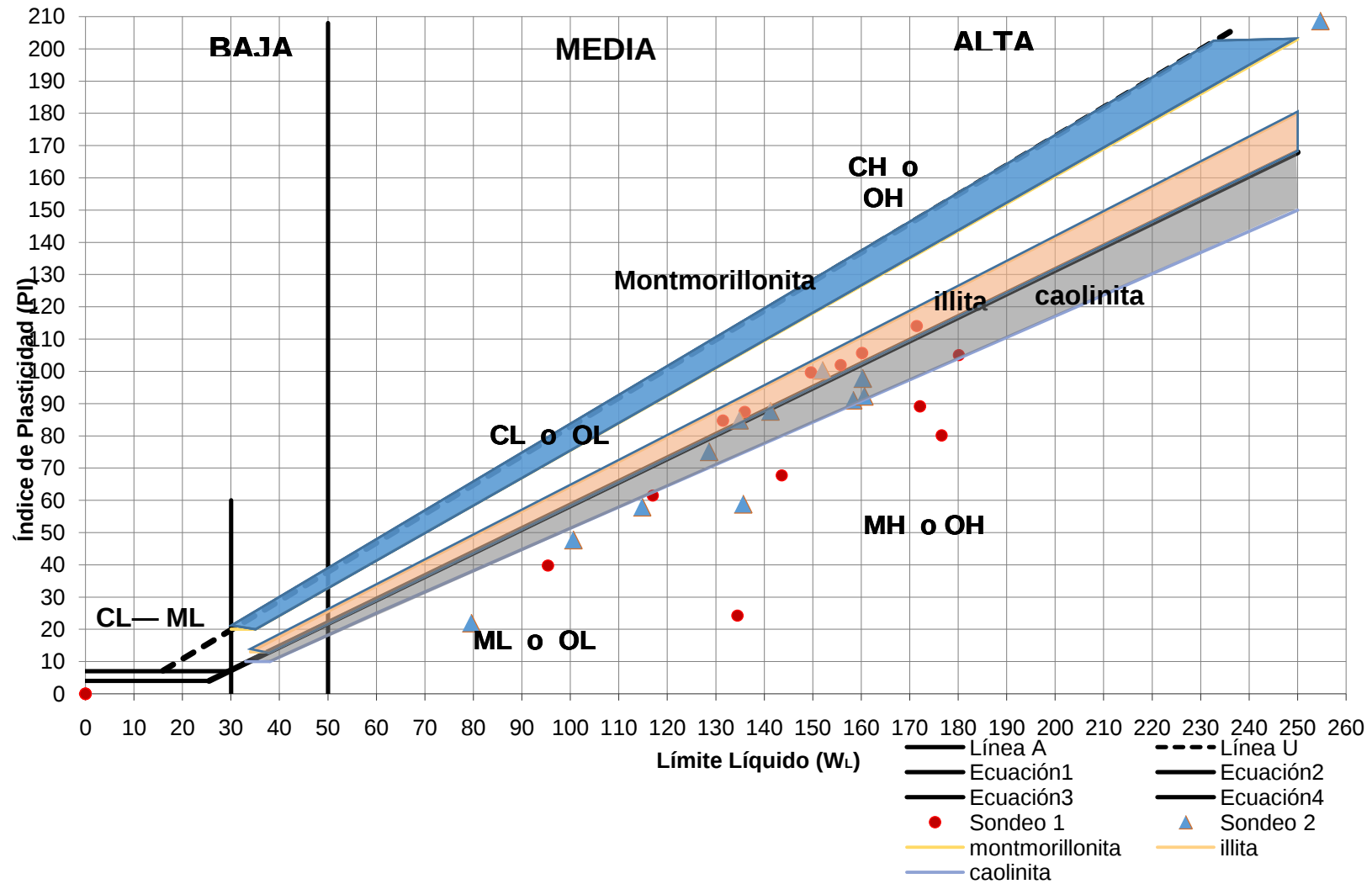


Figura 4- 13. Ubicación de las Muestras en la Carta de Plasticidad, para el sondeo uno y dos.

Después de ubicar el límite líquido e índice de plasticidad en la carta de plasticidad de Casagrande se puede ver que el suelo en estudio es de alta y media plasticidad, muy cerca de la línea A, que en su mayoría reciben denominaciones OH (orgánicas) y MH (Inorgánicas).

4.2.2. Distribución del tamaño de los granos.

El análisis de distribución de granos del material arcilloso encontrado en la zona se realizó por medio del hidrómetro, este análisis se aplicó para cuatro muestras correspondientes al sondeo uno y dos. El material utilizado, se macero y fue tamizado por el tamiz número 200, secado al aire y se usó como agente dispersante una solución de hexametáfosfato de sodio, (según lo aconseja la norma INV-E 123).

A partir de los Límites de Aterberg es posible hallar aproximaciones sobre parámetros del suelo que dan indicios sobre su comportamiento, o así ha sido demostrado por varios autores de la mecánica de suelos. Uno de los usos es la actividad de arcilla (planteada por Skempton, 1953), que acompañada con el análisis granulométrico nos da un mayor acercamiento a la clasificación del suelo arcilloso en estudio.

Skempton (1953), propone que el grado de plasticidad de un suelo está relacionado con el tipo y cantidad de minerales arcillosos presentes. Esta relación matemáticamente se conoce como la actividad de la arcilla (A_c) y se define según la ecuación(4.1).

$$(4.1) A_c = \frac{IP}{\% < 2\mu m}$$

Donde,

IP = Índice de plasticidad

$\% < 2\mu m$ = Porcentaje en masa de partículas con diámetro inferior a 0.002 mm

La actividad de arcilla refleja la capacidad de las partículas de un suelo arcilloso para retener la humedad, y se clasifica según se indica en la Tabla (4-7).

Tabla 4- 7. Actividad de los suelos arcillosos. (Tomada de Skempton, 1953).

Clasificación	Ac	Mineral Predominante
Baja	$Ac \leq 1$	Caolinita
Mediana	$1 \leq Ac \leq 4$	Illita
Alta	$Ac \geq 4$	Montmorillonita

El resumen de los resultados obtenidos para la fracción arcillosa del suelo y la clasificación para los suelos estudiados en la sabana de Bogotá según Skempton, se presentan en la Tabla (4-8). La Figura 4-14 presenta las curvas de gradación correspondiente a cada una de las muestras elegidas.

Tabla 4- 8. Fracción arcillosa para la profundidad seleccionada de suelo del sondeo 1 y 2.

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	IP (%)	FRACCIÓN ARCILLOSA ($\leq 0,002$ mm) (%)	Ac Skempton	Clasificación
1	12	5.50 - 6.00	103,45	15	6,9	Alta
1	28	17,50 - 18,00	23,52	15	1,6	Alta
2	8	3,50 - 4,00	114,51	13	8,8	Alta
2	24	18,50 - 19,00	67,21	19	3,5	Alta

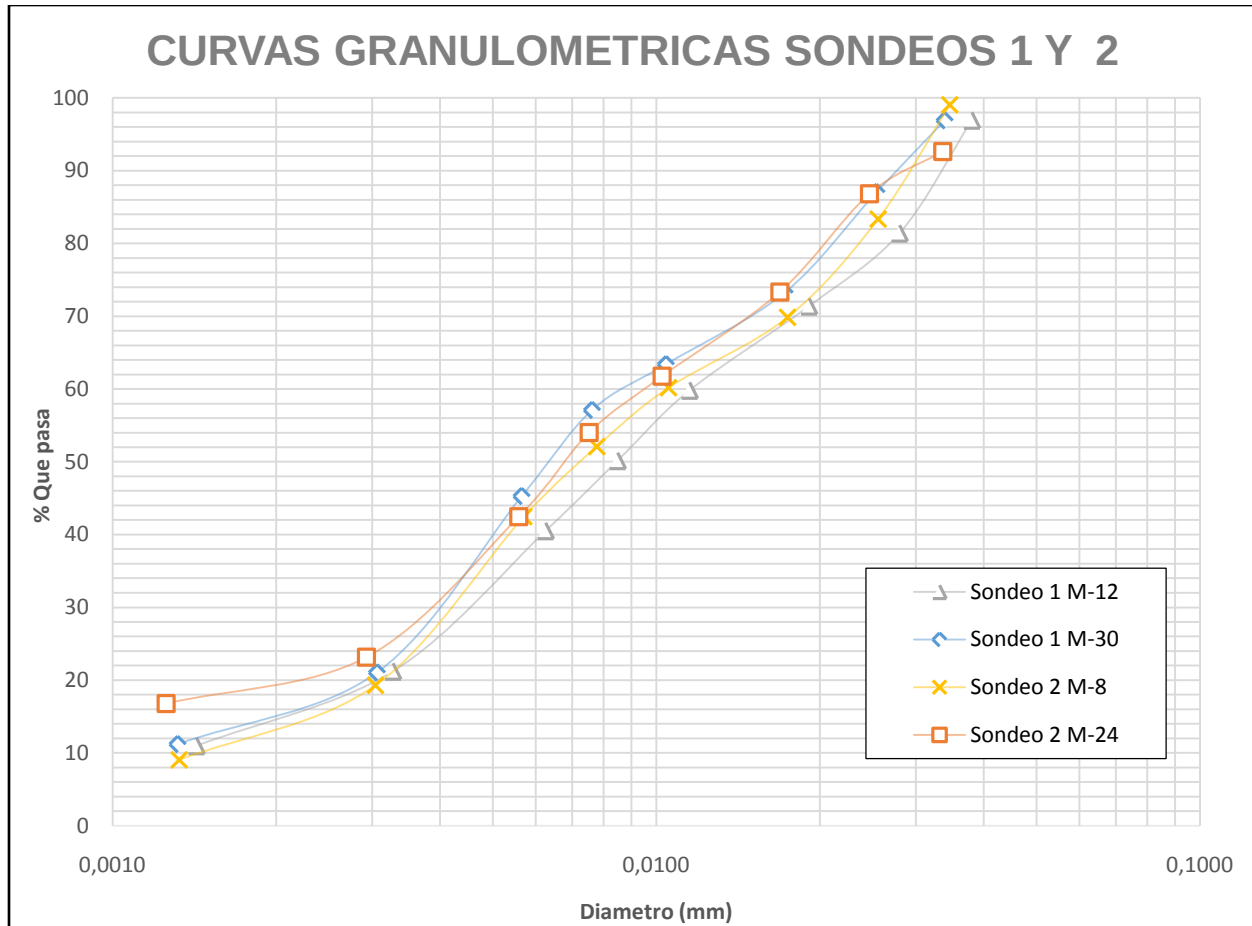


Figura 4- 14. Curvas Granulométricas para cada muestra.

4.3. COMPRESIBILIDAD EN LA ARCILLA ENCONTRADA

4.3.1. Ensayos de consolidación unidimensional

La mecánica de suelos desde sus orígenes, estableció que una masa de suelo sometida a un incremento de carga, presenta una transferencia de esfuerzos de la fase líquida a la fase sólida, acompañada de una disminución de volumen debido al drenaje; la velocidad a la cual se da este proceso depende en general, de la naturaleza del suelo y específicamente, de su permeabilidad. Este es básicamente, el principio de la teoría de la consolidación unidimensional propuesta por

Terzaghi (1943) mencionado por Braja (2001), utilizado para determinar el esfuerzo de preconsolidación (σ_p) de la masa de suelo.

En el desarrollo de esta investigación se realizaron diferentes ensayos de consolidación unidimensional rápida en muestras de suelo tomadas por encima del nivel freático. Para determinar los esfuerzos de preconsolidación se tuvo en cuenta la metodología propuesta por Becker (1987), mencionado por Bowles (1997); este procedimiento se muestra en el anexo III. La Tabla (4-9) presenta los resultados de esfuerzo de preconsolidación en relación a la compresibilidad del suelo para los sentidos vertical y horizontal de los sondeos uno (1) y dos (2).

Tabla 4- 9. Esfuerzos de preconsolidación obtenidos a partir de ensayos de consolidación unidimensional rápida.

Sondeo	Muestra	Sentido	Profundidad (m)	σ'_p (kPa)
1	M - 3	V	1,00 - 1,50	191,30
		H		181,49
	M - 6	V	2,00 - 2,50	206,01
		H		186,39
	M - 8	V	3,50 - 4,00	210,92
		H		201,11
	M - 11	V	5,00 - 5,50	206,01
		H		213,86
	M - 15	V	7,50 - 8,00	155,00
		H		152,06
	M - 19	V	10.50 - 11.00	175,60
		H		169,71
	M - 25	V	15.00 - 15.50	186,39
		H		186,39
	M - 29	V	18.00 - 18.50	175,60
		H		156,96
2	M - 4	V	1,50 - 2,00	196,20
		H		186,39
	M - 7	V	3,00 - 3,50	191,30
		H		186,39
	M - 9	V	4,00 - 4,50	205,03
		H		191,30
	M - 11	V	5,50 - 6,00	201,11
		H		206,01
	M - 19	V	14,00 - 14,50	186,39
		H		187,37
	M - 23	V	18,00 - 18,50	155,00
		H		166,77

4.3.2. Relaciones de Sobreconsolidación

La relación de sobreconsolidación (RSC) se define como la relación existente entre el esfuerzo efectivo de preconsolidación y el esfuerzo vertical efectivo *insitu*, como se describe por medio de la ecuación (4.2); y da una idea del grado de consolidación presente en la masa de suelo.

$$(4.2) RSC = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v}$$

El esfuerzo vertical efectivo *in situ* aproximado se calculó como esfuerzo vertical menos el valor de la presión de agua (u_w), generada por el nivel freático hallado en el suelo, que para este caso no fue encontrado para la época del año en la que se realizó la perforación. (Ecuación 4.3).

$$(4.3) \sigma'_v = \sigma_v - u_w$$

Tabla 4- 10.Relaciones de Sobreconsolidación para los sondeos 1 y 2.

Sondeo	Muestra	Sentido	RSC
1	M - 3	V	6,27
		H	5,95
	M - 6	V	5,36
		H	4,85
	M - 8	V	4,11
		H	3,92
	M - 11	V	2,83
		H	2,94
	M - 15	V	1,49
		H	1,47
	M - 19	V	1,42
		H	1,37
	M - 25	V	1,03
		H	1,03
2	M - 29	V	0,82
		H	0,73
	M - 4	V	6,81
		H	6,47
	M - 7	V	4,90
		H	4,78
	M - 9	V	3,33
		H	3,11
	M - 11	V	2,62
		H	2,68
	M - 19	V	1,01
		H	1,03
	M - 23	V	1,58
		H	0,76

En la tabla (4-10) se muestran los resultados obtenidos para la RSC a partir del esfuerzo de preconsolidación según el método de Becker.

Según se muestra en el perfil de la Figura (4-15), las relaciones de sobreconsolidación encontradas, presentan valores altos en las muestras superficiales, y a medida que se profundiza (después de los 6 metros) parece tener una tendencia asintótica. Las últimas muestras del perfil muestran valores que presentan este mismo comportamiento para ambos sentidos de los sondeos uno (1) y dos (2).

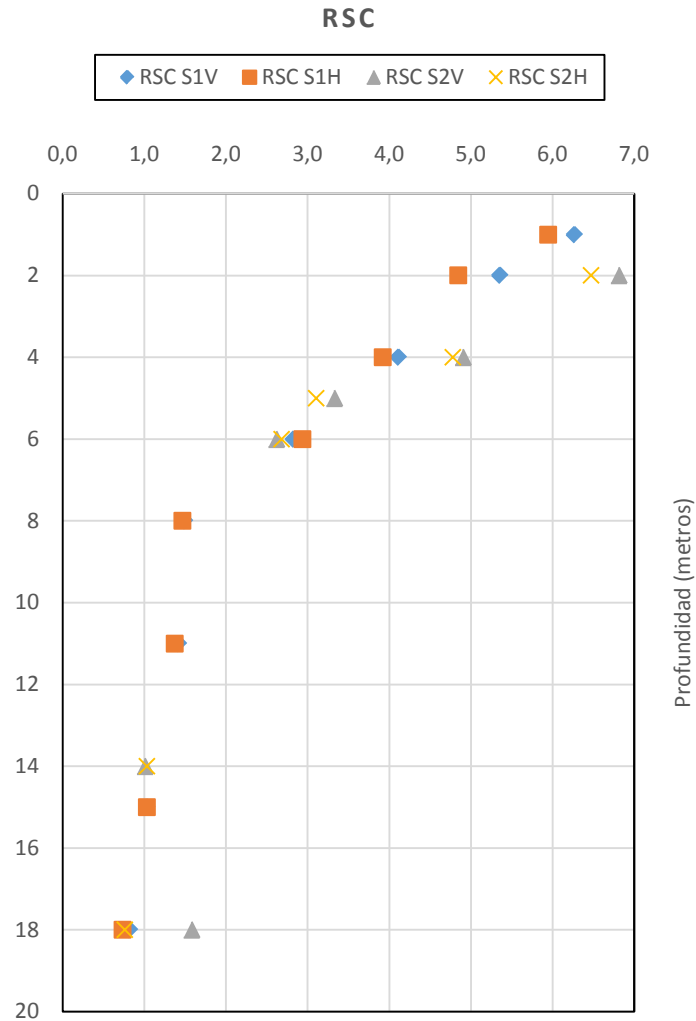


Figura 4- 15. Perfil obtenido para la RSC, Sondeos 1 y 2.

Del análisis del comportamiento que presenta la Figura (4-15) se puede inferir que en los primeros metros (hasta el estrato de 5.50 a 6,00 metros) la masa arcillosa presenta una compresibilidad moderada por efectos de sobreconsolidación mayores a la unidad (entre 1.03 y 6.27), en adelante las relaciones de sobreconsolidación a pesar de que siguen una trayectoria similar, esta no está muy definida, esto se puede presentar por variaciones en el tipo del suelo (variación ocasionada por la desecación, y efectos de succión que presenta el suelo en sus primeros metros) a su vez porque le proceso de formación del depósito puede ser diferente a los suelos ubicados en la parte

superior. Sin embargo la tendencia en general es llegar a valores menores de uno (1) donde el suelo estará normalmente consolidado (NC).

4.4. DETERMINACIÓN DE SUCCIÓN MATRICIAL

En el desarrollo del presente proyecto de investigación, se pretende implementar la medida de succión matricial para determinar el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo (K_0) según varia el contenido de agua de poros. Con base en las metodologías y recomendaciones existentes en la literatura para medir succión matricial, se aplicó la teoría de papel filtro como así se mencionó en el capítulo 3. Con este método se obtiene la variación de la succión con respecto a los cambios volumétricos, humedad y saturación presentes en la masa del suelo.

El método de papel filtro usado en la presente investigación, se utilizó sobre muestras inalteradas a diferente profundidad obtenidas a través de tubos de pared delgada (Shelby) como ya se ha descrito anteriormente en este capítulo.

En el capítulo 3 se menciona la descripción de La Curva de Retención de un Suelo. Esta curva representa la relación existente entre el contenido de humedad de un suelo y el valor de la succión matricial que presenta en dicho instante.

Las curvas de retención han sido determinadas de manera experimental para muestras naturales de arcillas superficiales y profundas tomadas de la vía que de Siberia conduce a Tenjo (Cundinamarca), y los resultados se presentan en este capítulo. Estas muestras se sometieron a fases de secado y humedecimiento, durante este proceso se determinó el valor de la succión matricial usando el método del papel de filtro, y a que es muy económico, de fácil aplicación y

trabaja en un rango de valores de succión muy amplio (desde 60 kPa hasta valores cercanos a 30000 kPa).

4.4.1. Preparación de muestras utilizadas para medición de succión matricial.

Las muestras inalteradas, recuperadas en los tubos de pared delgada (Shelby) se tallan en el laboratorio para obtener las dimensiones requeridas y garantizar una completa horizontalidad de las caras planas. Como se mencionó en el capítulo 3, el papel de filtro se coloca en contacto directo con la muestra, por esta razón las caras deben estar lo más planas y paralelas posible. Al realizar este procedimiento se obtienen muestras cilíndricas de 2 pulgadas de diámetro y aproximadamente 1 pulgada de alto. En total se tallaron diez (10) muestras de material natural inalterado, tomadas a lo largo de una profundidad perforada de veinte (20) metros, tal como se muestra en la Tabla (4-11).

Tabla 4- 11. Muestras Talladas para medir Succión Matricial.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)
1	3	1,00 - 1,50
	11	5,00 - 5,50
	15	7,50 - 8,00
	19	10,50 - 11,00
	25	15,00 - 15,50
	29	18,00 - 18,50
2	5	2,00 - 2,50
	11	6,00 - 6,50
	15	10,00 - 10,50
	23	18,00 - 18,50

4.4.2. Procedimiento para medir succión matricial en laboratorio.

Como se mencionó anteriormente, el papel filtro utilizado es Whatman 42, (Figura 4-16), con diámetro de 7.0 cm, de acuerdo a las calibraciones hechas por Chandler, Crilly y Montgomery - Smith (1991). se coloca en contacto directo con la muestra de suelo, fundamentado en el principio de equilibrio de presiones del agua de poros entre los materiales que están en contacto y de las humedades de los mismos, Fredlund *et al* (2011) establece que es necesario que las muestras se encuentren en condiciones estables de presión y temperatura, por esta razón se usó un cuarto al cual se le hizo un seguimiento de la temperatura (la cual se considera promedio 18°C) con una humedad de 84% +/- 5%.



Figura 4- 16. Papel Whatman # 42.

El proceso de calibración del papel se puede realizar usando soluciones salinas o por medio de un plato de presión, con ellas se aplica una presión conocida y luego se determina la humedad del papel de filtro a la cual se produce un equilibrio de presiones. Donde la forma de las ecuaciones de las curvas elaboradas por los autores es logarítmica, y corresponde a la curva de retención propia del papel de filtro, las cuales varían de acuerdo con el grado de humedad alcanzado por el papel de filtro durante el proceso de equilibrio; adicionalmente, difieren si las muestras están en proceso de secado o de humedecimiento (Tabla 4-12).

Tabla 4- 12. Calibración de papel filtro para la determinación de succión matricial. Tomada de Dinnen 1997).

ETAPA DEL PROCESO	HUMEDAD DEL PAPEL FILTRO (%)	Log ₁₀ DE LA SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)	REFERENCIA
Secado	+/- 47 ≥ 47	4.84 - 0.0622 (W _{pf}) 6.05 - 2.48 Log ₁₀ (W _{pf})	Chandler et al (1991)
Humedecimiento	≥ 15.47 +/- 57.2 ≥ 57.2	4.573 - 0.0449 (W _{pf}) 2.904 - 0.0158 (W _{pf})	Ridley (1995)

4.4.2.1. Equipo y Materiales Utilizados

Teniendo claro el tipo de papel filtro que se va a utilizar, junto con su respectiva calibración, las muestras completamente talladas y el respectivo control de las condiciones ambientales del laboratorio, se procede a realizar el ensayo teniendo en cuenta los siguientes materiales:

- Discos acrílicos de 10 mm de altura y diámetro de acuerdo a la muestra a utilizar. Este busca garantizar el pleno contacto entre las superficies planas del papel filtro y la muestra.

- Papel filtro Whatman # 42.
- Papel de látex transparente (vinipel)
- Recubrimiento de plástico de burbujas
- Bolsas de cierre hermético
- Cinta adhesiva
- Bandas de caucho
- Balanza digital de precisión con aproximación a 0.0001 g.
- Balanza digital con aproximación a 0.01 g
- Calibrador Pie de rey con aproximación a 0.01 mm
- Horno para secado de papel filtro, que pueda mantener temperatura constante de 110 +/- 5°C.
- Recipiente de icopor para mantener muestras a temperatura constante
- Cortador de muestras.
- Pinzas (utilizadas para manipular el papel filtro y evitar de esa manera contacto directo con la superficie y no inducir cambios en su contenido de humedad)
- Equipo misceláneo.

4.4.2.2. Desarrollo del ensay o para medir succión matricial

Con ayuda de las pinzas se toma un papel de filtro directamente de la caja y se dispone sobre una de las caras planas de la muestra cilíndrica, identificando previamente y durante todo el proceso la cara superior e inferior de la muestra (Techo y Base). Con el papel de filtro puesto se

coloca un disco (debidamente rotulado) sobre la muestra y repite este proceso para la otra cara de la muestra.

Ahora, el conjunto formado por la muestra, los papeles y discos es envuelto en 2 capas de papel vinipel, asegurando cada capa firmemente por medio de cinta adhesiva sin permitir la formación de bolsas de aire dentro del conjunto. Este arreglo se dispone al interior de una bolsa autosellante extrayendo en la medida de lo posible el aire al interior de la bolsa. Este procedimiento se repite para introducir el arreglo en una segunda bolsa autosellante y después se protege con el recubrimiento de polietileno con compartimientos de aire. Por último se asegura el arreglo final con 2 bandas de caucho y se deposita dentro del recipiente de icopor.

Todo el procedimiento realizado a la muestra se hace para garantizar condiciones estables de humedad y temperatura, y de esa manera evitar cambios de presiones que afecten los resultados.

4.4.2.3. Medición de la humedad y determinación de la succión matricial de las muestras.

La muestra de suelo al estar en contacto con el papel filtro (Figura 4-17) genera una diferencia de humedad por equilibrio de vapor, donde cierta cantidad de agua de la muestra de suelo se transfiere al papel filtro, (y a que el papel filtro se caracteriza por la homogeneidad de sus poros) permitiendo así medir succión matricial ejercida por la muestra del suelo.

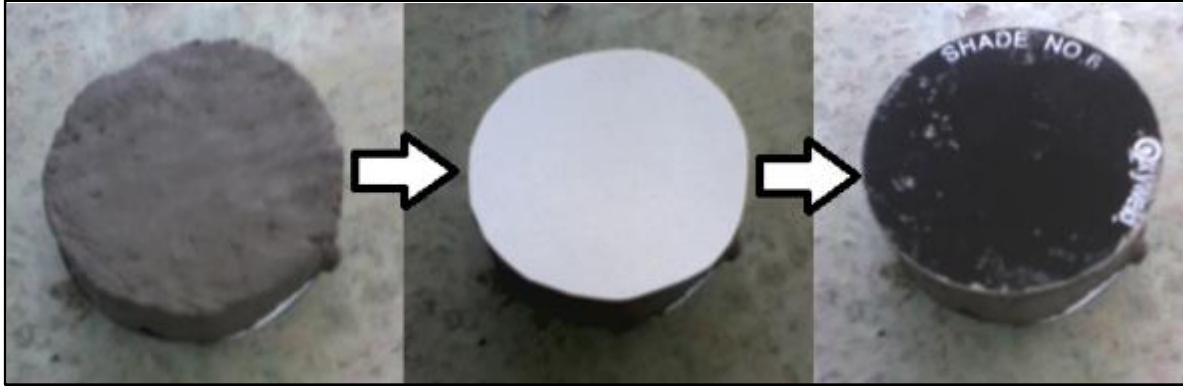


Figura 4- 17. Pasos para la colocación del papel filtro a la muestra de suelo.

Para permitir que se genere un completo equilibrio de presiones de agua entre la muestra y el papel filtro, como se mencionaba anteriormente, es necesario controlar de las condiciones de temperatura de la muestra, por ello para la presente investigación estas son envueltas en papel vinipel, con el fin de no dejar variar la humedad dentro de este sistema de equilibrio, a su vez no permitir cualquier entrada de aire que altere la muestra y por ende las mediciones de succión. Además del papel vinipel, estas también eran envueltas en bolsas herméticas y finalmente en papel de aire sellado, protegiendo así la muestra frente alguna caída o una mala manipulación. (Figura 4-18)



Figura 4- 18. Espécimen de suelo envuelto en bolsa de cierre hermético, papel vinipel, y papel de aire sellado.

Seguido de la correcta envoltura, estas muestras son almacenadas en una nevera de icopor, y finalmente esta es almacenada en una cámara hermética (Figura 4-19) para garantizar aún más su condición de equilibrio.



Figura 4- 19. Almacenamiento de muestras en nevera de icopor (Izq.) junto a medidor de temperatura y humedad de la cámara hermética.

Estas muestras se dejan en equilibrio de presión de agua aproximadamente siete(7) días, posteriormente, se extrae el papel filtro (de cada uno de las muestras) sometido a equilibrio y se determina su humedad, Este papel debe pesarse cuidadosamente en una balanza de precisión de 10^{-4} (para este caso y por practicidad se toma como recipiente una bolsa hermética) para luego sersecado a una temperatura de $60^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$, por un tiempo aproximado de 2 horas (Figura 4-20), este tipo de secado debe ser supervisado debido a la posible calcinación del papel.

En cuanto a la muestra de suelo sometida a equilibrio, igualmente debe ser extraída de su envoltura hermética y ser sometida a un proceso de secado (al aire) controlado donde se garantice la pérdida de dos (2) gramos. Al ser pesadas las muestras también se debe monitorear los cambios volumétricos sufridos por medio del calibrador digital de precisión, tomando 3 lecturas de diámetros directamente sobre las muestras, y 3 lecturas de alturas midiendo las

muestras con los discos para afectar lo menos posible la horizontalidad de las caras planas de las muestras. Posterior a ellos debe ponerse de nuevo en contacto con un nuevo papel filtro y repetirse el anterior procedimiento, con el fin de determinar una nueva humedad (7 días después) lo cual se traduce a un nuevo punto de succión de la curva de retención.



Figura 4- 20. Determinación de humedad del papel filtro.

4.4.3. Relación Muestra - Succión

Se determinaron valores de succión matricial y de otras variables que describen el contenido de agua, humedad, con el fin de encontrar la curva de retención para cada una de las muestras. Se midieron de nueve (9) a diez (10) puntos de succión por muestra para determinar su comportamiento en función a la pérdida de humedad y saturación de cada una de las muestras. Los resultados de dicha determinación se presentan a continuación (Tabla 4-13 a 4-23).

Tabla 4- 13. Valores de succión matricial por punto para S1-M3

Sondeo 1			Muestra 3	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	5,20	2,57	65,64	3682
2	5,16	2,18	63,30	3145
3	5,08	1,88	59,72	3487
4	4,97	1,83	56,76	5806
5	4,89	1,74	52,45	3852
6	4,87	1,74	51,36	5276
7	4,87	1,67	49,84	5820
8	4,79	1,69	48,26	18034
9	4,74	1,73	46,51	16158
10	4,76	1,68	45,20	43445

Tabla 4- 14. Valores de succión matricial por punto para S1-M11

Sondeo 1			Muestra 11	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,97	1,43	34,09	8
2	5,04	1,22	31,70	13
3	4,93	1,11	28,63	1452
4	4,77	1,03	26,43	1895
5	4,53	1,02	22,95	2803
6	4,51	0,97	21,91	3841
7	4,37	0,86	20,17	4321
8	4,25	0,83	18,81	13802
9	4,23	0,81	17,29	10064
10	4,23	0,81	16,31	11755

Tabla 4- 15. Valores de succión matricial por punto para S1-M15

Sondeo 1			Muestra 15	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,89	1,97	49,61	45
2	4,65	1,88	47,37	1325
3	4,59	1,70	44,40	1465
4	4,48	1,67	42,00	1665
5	4,42	1,57	39,12	1788
6	4,33	1,57	37,89	2565
7	4,31	1,50	35,86	3129
8	4,20	1,47	33,62	6012
9	4,10	1,41	30,85	11009
10	4,04	1,39	29,07	15597

Tabla 4- 16. Valores de succión matricial por punto para S1-M19

Sondeo 1			Muestra 19	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,97	1,75	40,96	26
2	4,98	1,57	38,77	145
3	4,80	1,42	36,43	92
4	4,75	1,31	33,74	1455
5	4,73	1,29	32,57	2067
6	4,58	1,24	30,34	2133
7	4,40	1,17	28,11	3476
8	4,28	1,09	25,06	23512
9	4,23	1,03	22,68	23535

Tabla 4- 17.Valores de succión matricial por punto para S1-M25

Sondeo 1			Muestra 25	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,94	1,61	33,82	5
2	5,32	1,24	31,39	9
3	4,96	1,09	28,68	1767
4	4,82	1,07	26,46	1787
5	4,69	0,97	24,02	1839
6	4,51	0,94	22,80	2887
7	4,39	0,89	20,77	3724
8	4,28	0,92	19,41	7500
9	4,33	0,89	17,36	11079
10	4,28	0,88	16,09	15106

Tabla 4- 18. Valores de succión matricial por punto para S1-M29

Sondeo 1			Muestra 29	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,93	1,45	34,27	7
2	4,80	1,45	32,33	23
3	4,75	1,35	29,65	1439
4	4,36	1,35	27,33	1783
5	4,35	1,22	24,85	1895
6	4,22	1,23	23,67	2457
7	4,12	1,16	21,82	3488
8	4,09	1,10	19,74	6015
9	3,95	0,99	17,40	9273
10	3,96	0,98	16,36	15266

Tabla 4- 19. Valores de succión matricial por punto para S2-M5

Sondeo 2			Muestra 5	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	5,05	2,26	52,77	1921
2	5,00	2,19	49,77	3527
3	4,77	2,39	45,36	4606
4	4,85	2,07	44,05	3429
5	4,78	2,10	42,00	8105
6	4,73	2,09	39,94	8694
7	4,73	2,05	39,00	25061
8	4,70	2,03	38,17	15525
9	4,68	2,02	37,18	24070

Tabla 4- 20. Valores de succión matricial por punto para S2-M11

Sondeo 2			Muestra 11	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,99	2,12	51,63	7
2	5,11	1,93	48,40	48
3	4,75	1,75	43,70	961
4	4,75	1,69	42,12	1048
5	4,63	1,63	40,11	2325
6	4,59	1,49	36,23	2481
7	4,45	1,45	34,96	1941
8	4,29	1,39	31,52	3492
9	4,24	1,34	30,04	5832
10	4,13	1,29	27,84	7039

Tabla 4- 21.Valores de succión matricial por punto para S2-M15

Sondeo 2			Muestra 15	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	4,78	2,45	40,57	6
2	5,02	1,91	37,46	22
3	4,69	1,91	33,29	275
4	4,61	1,77	31,98	2123
5	4,48	1,74	29,93	2206
6	4,45	1,72	28,69	2116
7	4,40	1,67	27,44	2580
8	4,12	1,65	24,52	4956
9	4,08	1,63	23,35	7478
10	4,05	1,60	21,75	10578

Tabla 4- 22.Valores de succión matricial por punto para S2-M23

Sondeo 2			Muestra 23	
Punto	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Succión (kPa)
1	5,18	1,95	50,16	7
2	5,14	1,83	46,12	157
3	4,75	1,72	42,11	1360
4	4,75	1,67	40,66	1636
5	4,68	1,62	38,29	2390
6	4,60	1,57	37,04	1220
7	4,52	1,51	35,61	1351
8	4,40	1,47	32,06	3572
9	4,33	1,43	30,68	5345
10	4,19	1,40	28,07	10110

Los datos presentados anteriormente son el resultado del promedio ponderado realizado a los datos obtenidos en laboratorio. En el anexo III de este documento se encuentran los formatos usados y los datos obtenidos de humedad para el papel filtro en cada una de las pruebas de laboratorio.

4.4.3.1. Succión Inicial del suelo arcilloso

La succión en el suelo varía a lo largo de la profundidad, y a que su magnitud depende del contenido de agua del suelo. Recordando lo que ya se había mencionado en el numeral (4.2.1.1) de este capítulo, la humedad inicial varía entre cinco a seis (5-6) metros de profundidad, de la misma manera sucede con la succión, y a que se encuentra bajo la misma zona de influencia (5 a 6 metros de profundidad) donde a partir de este valor la succión ejercida por el suelo es mínima, los resultados de la succión inicial del suelo se presentan en la Figura (4-21).

A profundidades de 2 y 6 metros superficiales la succión del suelo es cercana a 2.000 kPa debido a la baja humedad natural que tiene el suelo, (que es cercana a 60%) posteriormente a medida que aumenta la profundidad la succión del suelo toma valores cercanos a 10 kPa donde la humedad natural del suelo alcanza valores promedio de 110%.

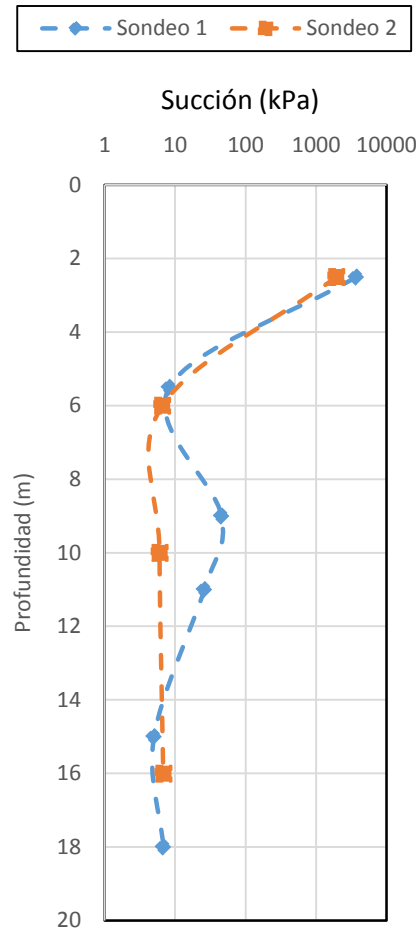


Figura 4- 21. Succión inicial Vs profundidad para los sondeos uno (1) y dos (2)

4.4.3.2. Descripción de curvas de retención de agua

Las curvas de retención de agua (SWCC por sus siglas en inglés) se determinaron por diez (10) muestras representativas a diferente profundidad de ambos sondeos, lo cual buscaba establecer de manera adecuada un análisis de la trayectoria de las curvas de retención para ambos sondeos. Las Figuras (4-22) muestran las curvas de retención de agua para las muestras de suelo del sondeo uno (1), donde haciendo un breve análisis de las muestras superficiales, se evidencia que la succión ha alcanzado valores mayores a 1.000 kPa y este valor es el punto de inflexión de

la curva, debido cambios en las propiedades de permeabilidad y régimen de succión que se hablara con mayor profundidad en el capítulo cinco (5). En la Figura (4-23) se muestran las curvas de retención de agua del sondeo dos(2), teniendo un comportamiento similar al del sondeo uno (1) las muestras superficiales han alcanzado una succión mayor de 1.000 kPa y este valor también se caracteriza por ser el punto de inflexión de la curva. Las muestras superficiales (menores a 3 m de profundidad) tienen un grado de saturación inicial aproximado del 60 %; en cambio a profundidades mayores las muestras estudiadas presentan saturaciones cercanas al 85 %, esta condiciones iniciales son producto de la desecación que ha sufrido el suelo por la presencia de vegetación como se ha mencionado anteriormente.

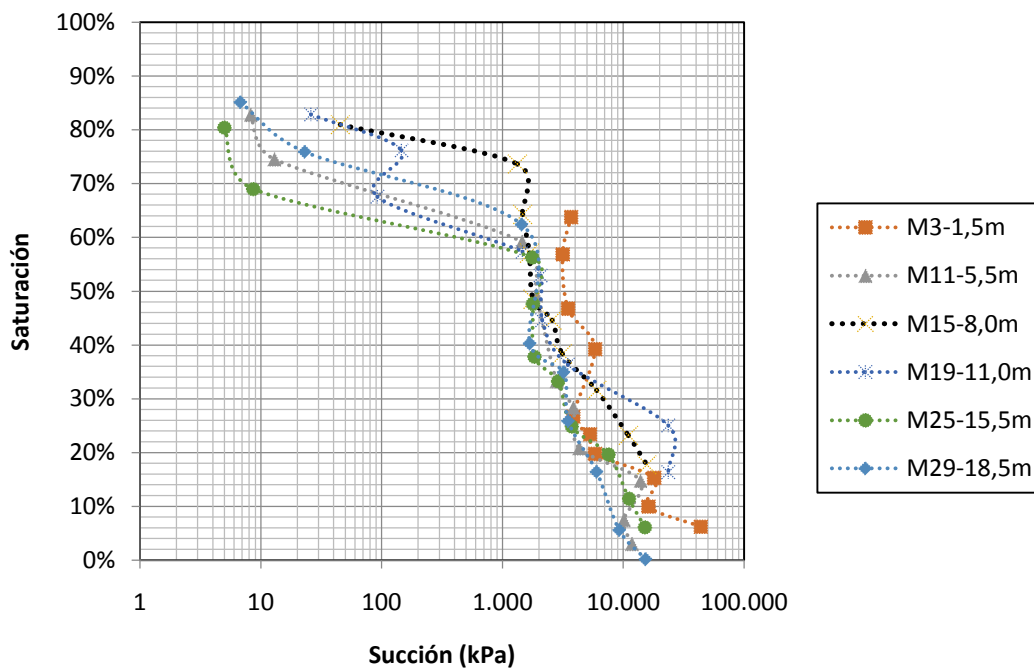


Figura 4- 22. Curvas de retención de agua para el sondeo 1 (sin ajustar).

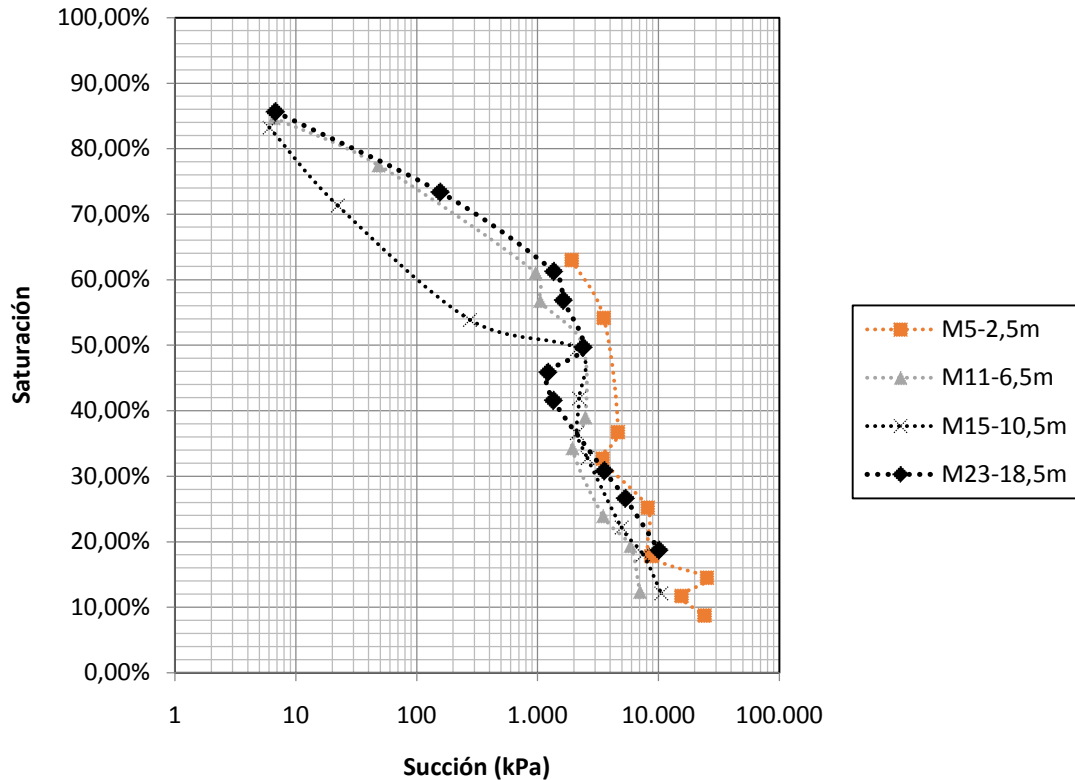


Figura 4- 23. Curvas de retención de agua para el sondeo 2 (sin ajustar).

Es necesario establecer los dos puntos de inflexión característicos de las curvas de retención, el primer punto de inflexión para los dos sondeos tiene un valor de 1.000 kPa, también conocido como Valor de Entrada de Aire (“Air Entry Value”), punto característico y a que es donde se presenta la des-saturación del suelo y sus propiedades de permeabilidad cambian, antes de que la succión alcance el AEV el suelo está trabajando bajo un régimen de succión capilar, donde la tasa de incremento de la succión es relativamente baja, en el suelo estudiado la saturación inicial es de 85 % aproximadamente ejerciendo una succión de 10 kPa y al alcanzar el AEV la saturación es de 60 % aproximadamente; al superar el AEV el suelo entra a un régimen de absorción en donde la saturación incrementa rápidamente con la disminución de la succión, alcanzando un valor aproximado de succión de 10.000 kPa con una saturación de 10 %; este

valor de succión se caracteriza por ser el segundo punto de inflexión de la SWCC, en donde nuevamente las propiedades del suelo cambian y entra a trabajar en un régimen de absorción residual con saturaciones inferiores a 10 % y succiones mayores de 10.000 kPa. Los valores anteriormente mencionados son clave para la modelación de las SWCC y estas se analizan independientemente para generar los parámetros de modelación.

Los valores anteriormente mencionados aplican para en análisis del suelo en los dos sondeos y en toda su profundidad, como se puede observar en las Figuras (4-22 y 4-23); esta similitud entre los dos sondeos se debe a la composición mineralógica del suelo, entendiendo que se estudia un suelo cuyo tamaño de partículas es inferior a 2 μm , en general las muestras profundas (mayores a 6 metros) presentan una saturación promedio del 85%, y no se evidencia diferencias en los resultados de los dos sondeos en cuanto a la presencia de vegetación, debido a que las muestras corresponden a profundidades mayores a dos (2) metros, estas muestras superficiales presentan saturaciones cercanas al 60% ejerciendo una succión de 2.000 kPa en promedio; las SWCC del sondeo dos(2) presentaron una curva más suave antes de alcanzar A.E.V, inicialmente se infiere que esto se debe a un contenido más alto de arcillas orgánicas en el sondeo 2, este análisis se verificara con el ajuste matemático de las SWCC que viene a continuación.

4.4.3.3. Modelación y Ajuste de las curvas de retención de agua

La modelación de las curvas de retención de agua para ambos sondeos, se realizó por medio del ajuste o ecuación propuesta por Fredlund y Xing (1994), mediante la cual busca ajustar los datos obtenidos experimentalmente (mostrados en el numeral anterior) teniendo en cuenta el valor de

entrada de aire (A.E.V), pendientes de la curva, valores de saturación, entre otros. Este modelo se presenta como:

$$(4.4) \quad w(\varphi) = c(\varphi) * \frac{w_s}{\ln \left(e + \left(\frac{\varphi}{a_f} \right)^{n_f} \right)^{m_f}}$$

$$(4.5) \quad c(\varphi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\varphi_r} \right) \right)}{\ln \left(1 + \left(\frac{10^6}{\varphi_r} \right) \right)}$$

- Parámetro af:

El parámetro de ajuste “af” está en de función del valor de entrada de aire del suelo (AEV), valor promedio 1500 kPa para los dos sondeos.

Este parámetro varía aproximadamente un 10 %, encontrando que el valor se torna constante en el sondeo 2, se encontró que independiente del valor del IP o σ'_v del suelo, el parámetro tiende a estar dentro del promedio, y a que el σ'_v del suelo varia dentro de 70 a 80 kPa, como se evidencia en la Figura (4-24), esta propiedad del suelo si afecta los valores de entrada de aire debido a la distribución de poros.

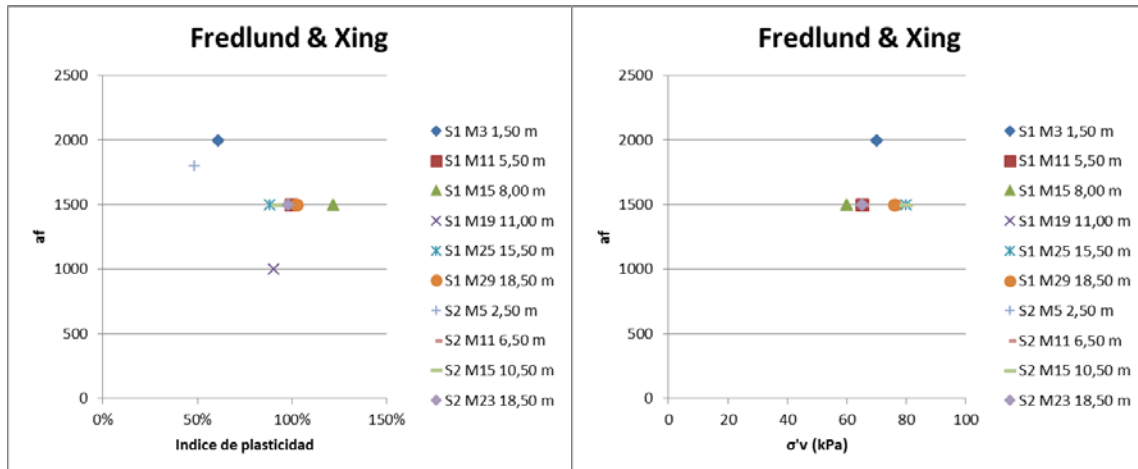


Figura 4- 24. Variación del parámetro a_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v .

- Parámetro n_f

El parámetro de ajuste “ n_f ” está en función de la tasa de crecimiento de la extracción de agua del suelo una vez que se ha superado el valor de entrada de aire, valor promedio 2,0 para los dos sondeos.

La variación de los parámetros de este modelo es alrededor de 2 %, con el IP del suelo no se encuentra relación debido a la dispersión de este pero con el σ'_v del suelo si hay relación y a que la extracción del agua del suelo depende de la distribución de poros al ser más constantes los valores del σ'_v este parámetro se torna constante como se muestra en la Figura (4-25).

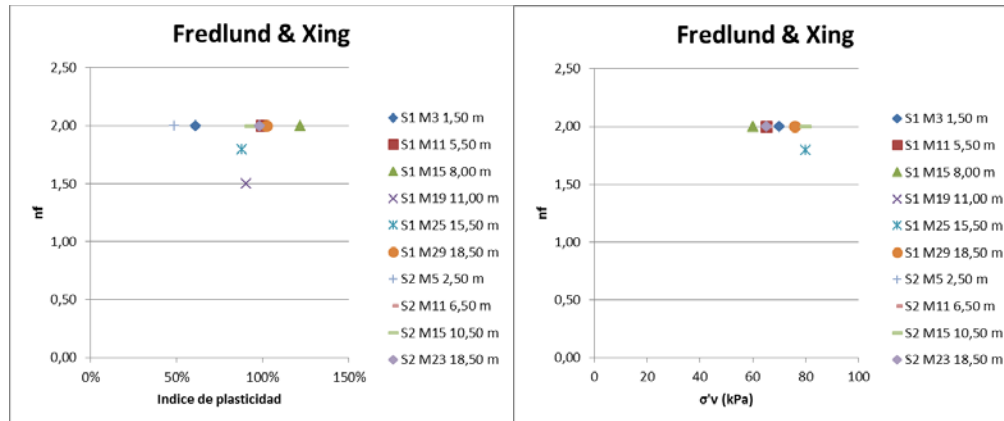


Figura 4- 25. Variación del parámetro n_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v .

- Parámetro m_f

El parámetro de ajuste “ m_f ” está en función de las condiciones del contenido de agua residual, valor promedio 1,3 para los dos sondeos.

Este parámetro varía aproximadamente un 17 %, aunque no se encontró relación con las propiedades del suelo, debido a que este parámetro está en función del contenido de agua residual, la variación del parámetro se da de acuerdo a la redistribución de los poros cuando la succión del suelo ha alcanzado el régimen de succión residual (Figura 4-26).

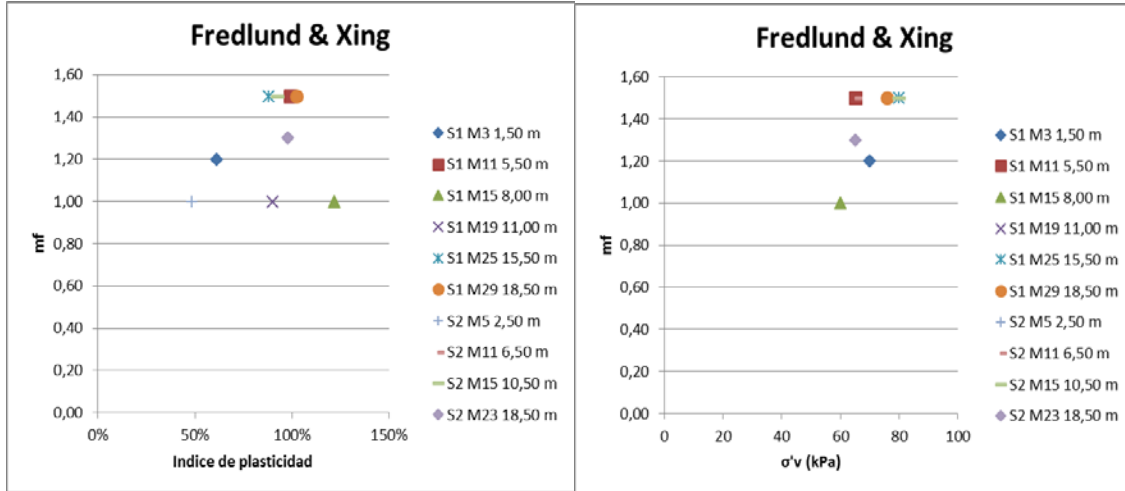


Figura 4- 26. Variación del parámetro m_f de Fredlund y Xing (1994) en función del IP y σ'_v .

Los parámetros propuestos por Fredlund y Xing (1994), mencionados anteriormente, están en función del valor de entrada de aire del suelo y la tasa de crecimiento de la succión después del A.E.V, algunos otros autores también utilizan parámetros en función de la tasa de crecimiento de la succión en el régimen de absorción residual, en la Tabla 15.1 se ilustra los parámetros de ajuste de las curvas de retención de agua experimental visualizadas anteriormente.

Tabla 4- 23. Parámetros obtenidos de la modelación de las SWCC experimentales junto a las propiedades del suelo

Sondeo 1				Fredlund & Xing (1994)		
Sondeo 1	Profundidad	IP	σ'_v (kPa)	af	nf	mf
S1 M3	1,50 m	61%	70	2000	2,00	1,20
S1 M11	5,50 m	99%	65	1500	2,00	1,50
S1 M15	8,00 m	122%	60	1500	2,00	1,00
S1 M19	11,00 m	90%		1000	1,50	1,00
S1 M25	15,50 m	88%	80	1500	1,80	1,50
S1 M29	18,50 m	102%	76	1500	2,00	1,50
Promedio		103%	70,20	1600,00	1,96	1,34
Desv. Estándar		0,13	8,07	223,61	0,09	0,23
Variación		13,1%	11,5%	14,0%	4,6%	17,2%

Sondeo 2				Fredlund & Xing (1994)		
Sondeo 2	Profundidad	IP	σ'_v (kPa)	af	nf	mf
S2 M5	2,50 m	48%		1800	2,00	1,00
S2 M11	6,50 m	92%	65	1500	2,00	1,50
S2 M15	10,50 m	92%	80	1500	2,00	1,50
S2 M23	18,50 m	98%	65	1500	2,00	1,30
Promedio		94%	70,00	1575,00	2,00	1,33
Desv. Estándar		0,03	8,66	150	0,00	0,24
Variación		3,6%	12,4%	9,5%	0,0%	17,8%

Los resultados obtenidos de la modelación para las muestras del sondeo uno y dos se muestran de la Figura (4-27) y los resultados del sondeo 2 se muestran en la Figura y (4-38).

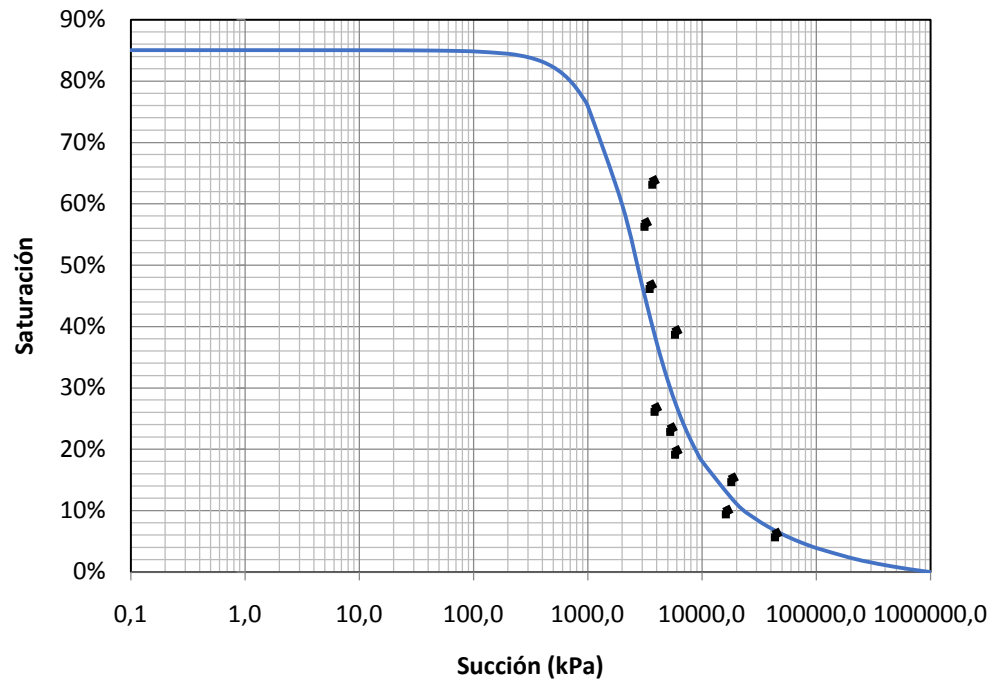


Figura 4- 27. Modelación de la SWCC experimental S1-M3.

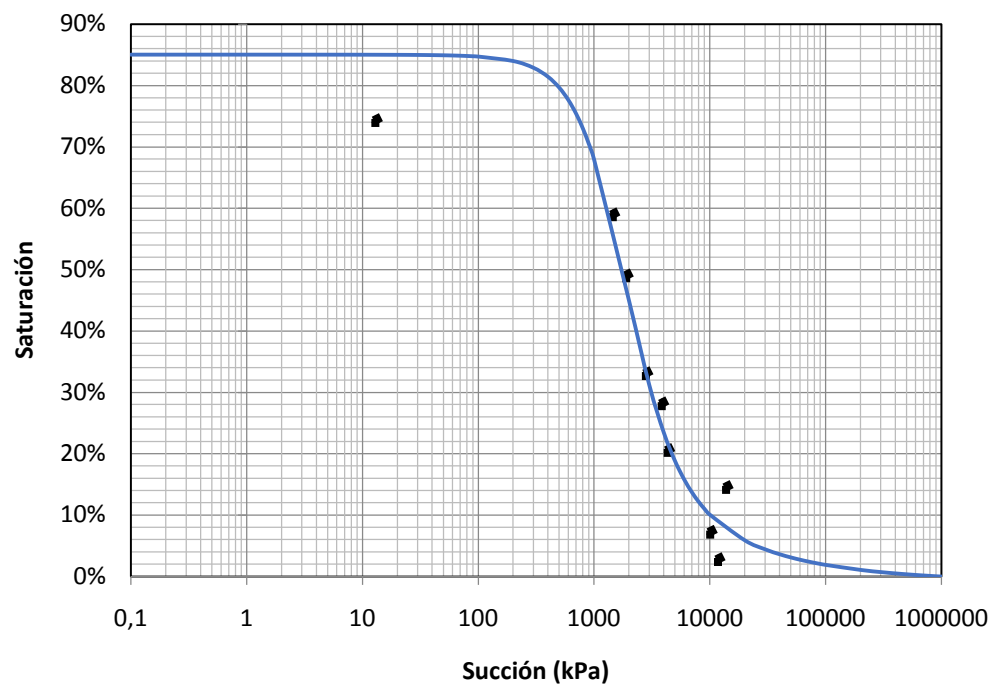


Figura 4- 28. Modelación de la SWCC experimental S1-M11.

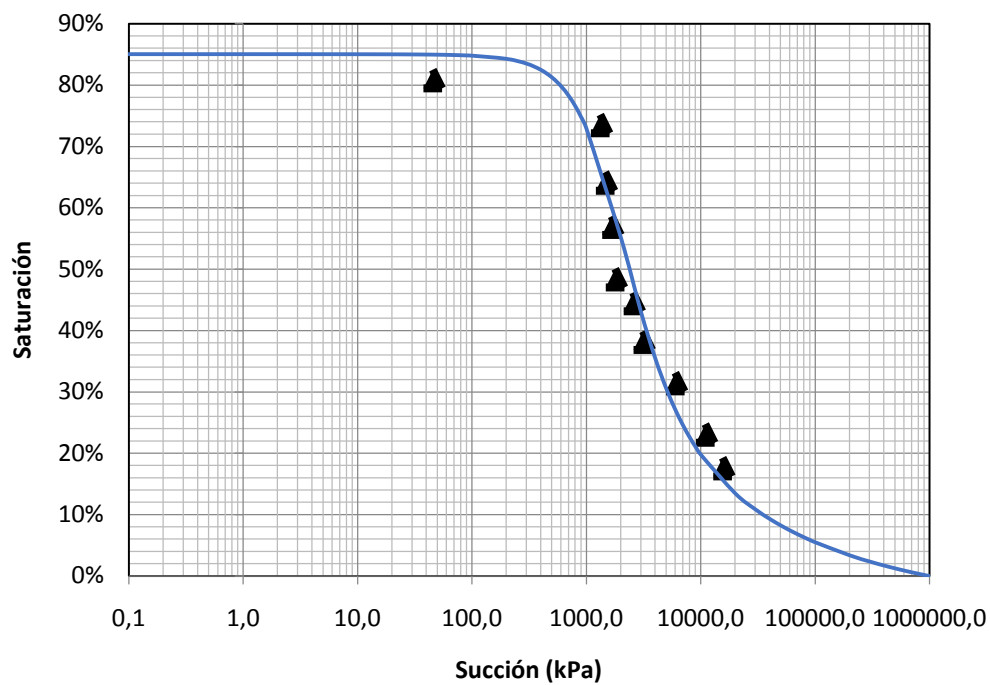


Figura 4- 29. Modelación de la SWCC experimental S1-M15.

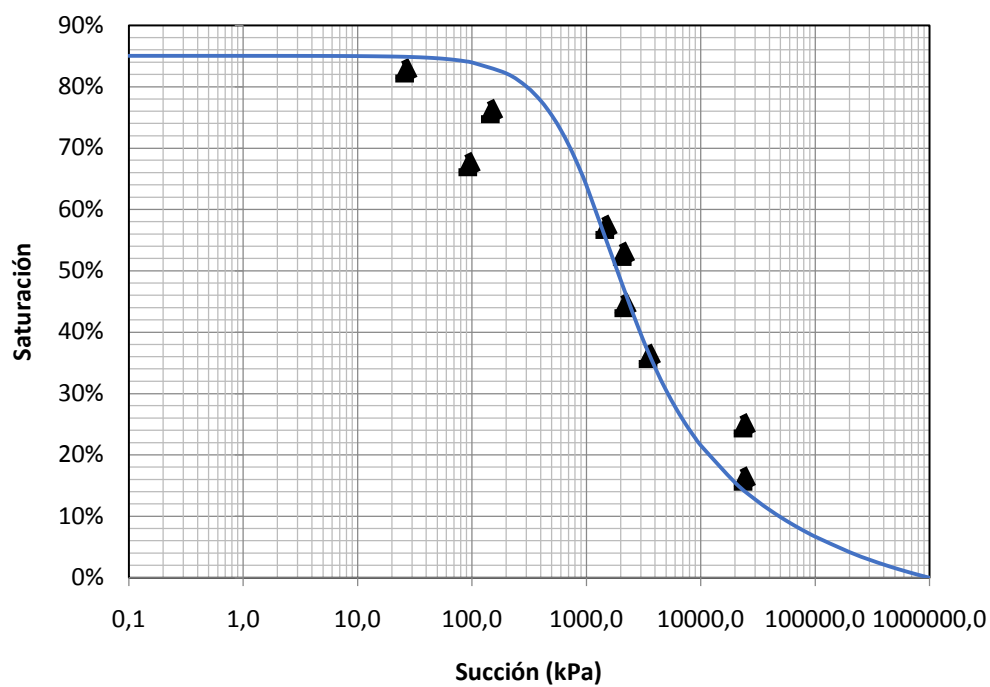


Figura 4- 30. Modelación de la SWCC experimental S1-M19.

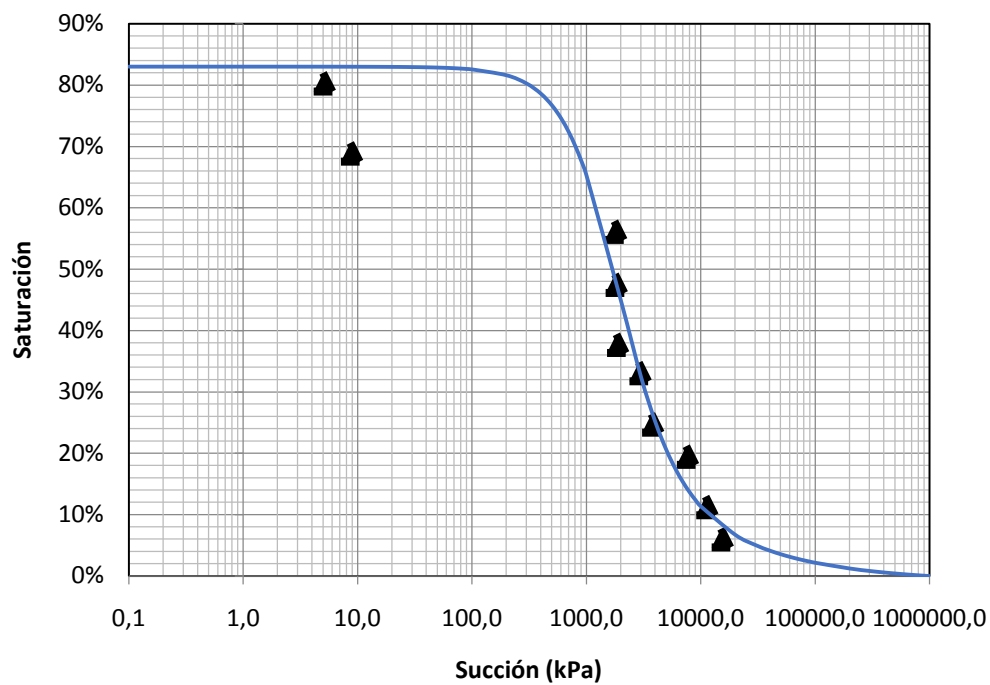


Figura 4- 31.Modelación de la SWCC experimental S1-M25.

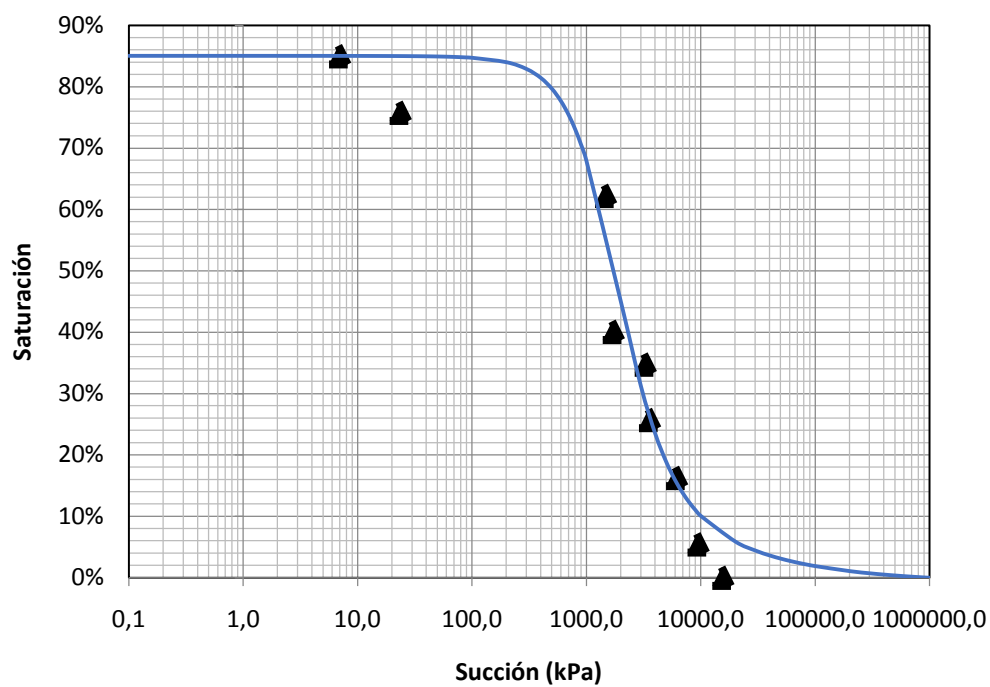


Figura 4- 32. Modelación de la SWCC experimental S1-M29.

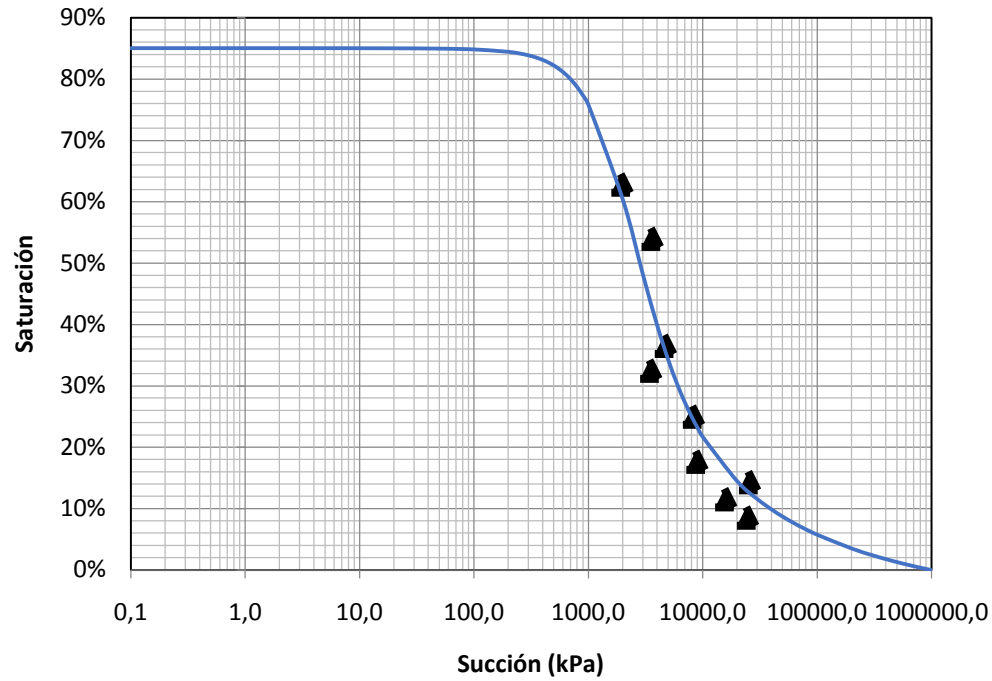


Figura 4- 33. Modelación de la SWCC experimental S2-M5.

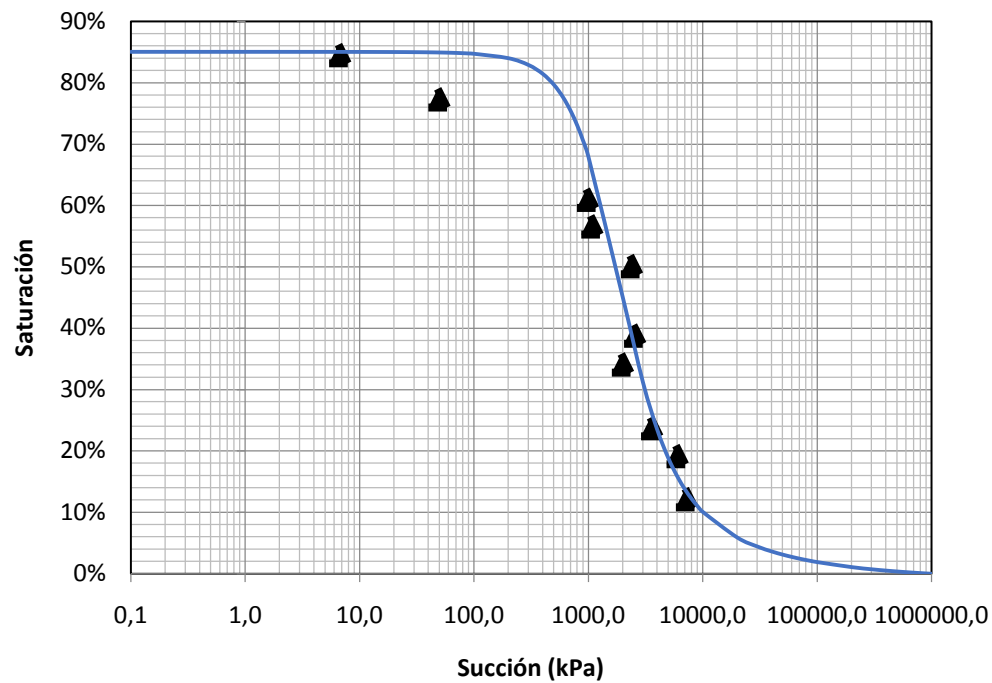


Figura 4- 34. Modelación de la SWCC experimental S2-M11.

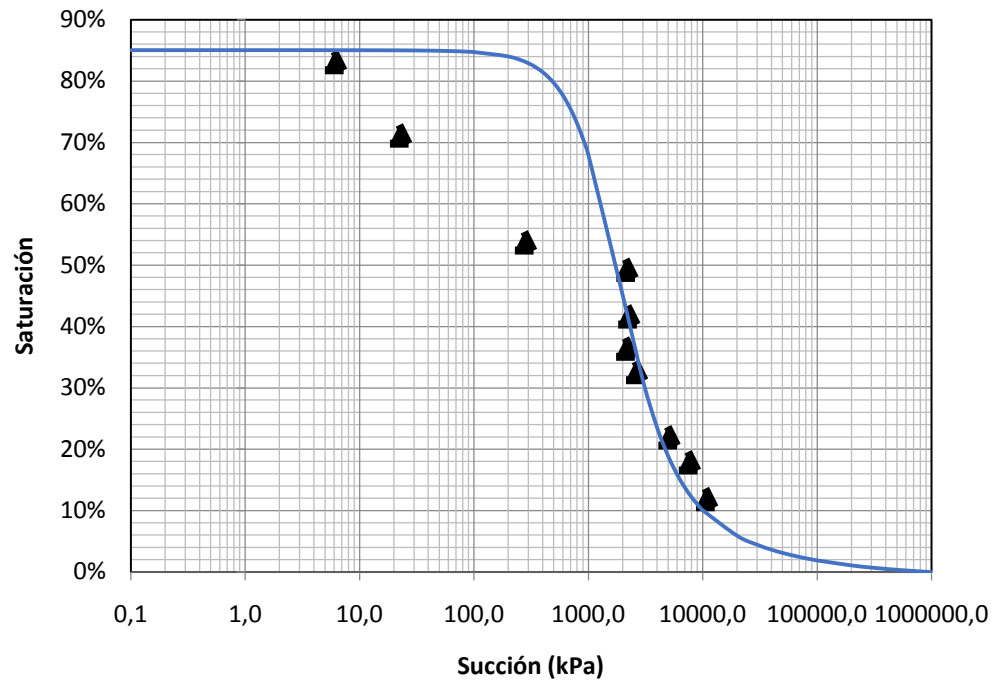


Figura 4- 35. Modelación de la SWCC experimental S2-M15.

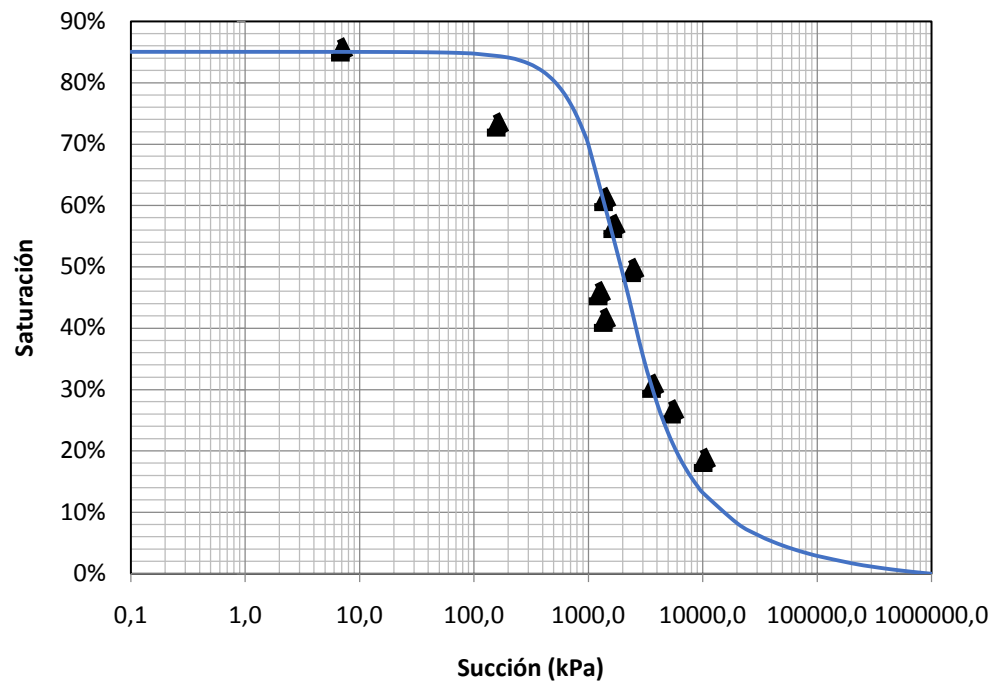


Figura 4- 36. Modelación de la SWCC experimental S2-M29.

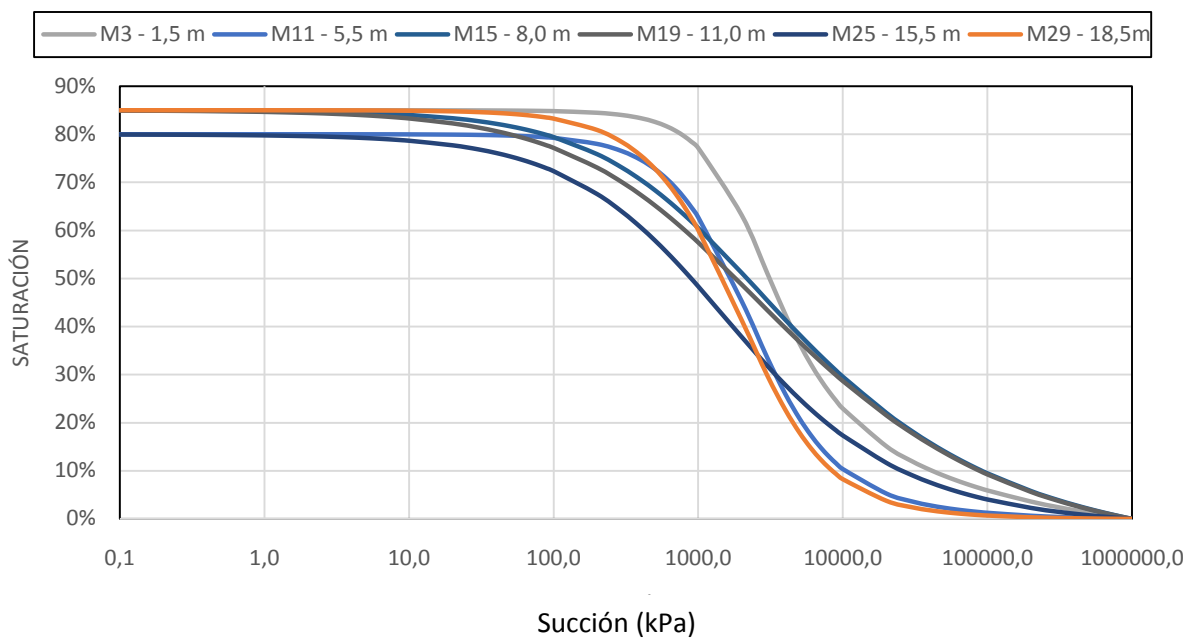


Figura 4- 37. Modelación de la SWCC experimental Sondage uno (1).

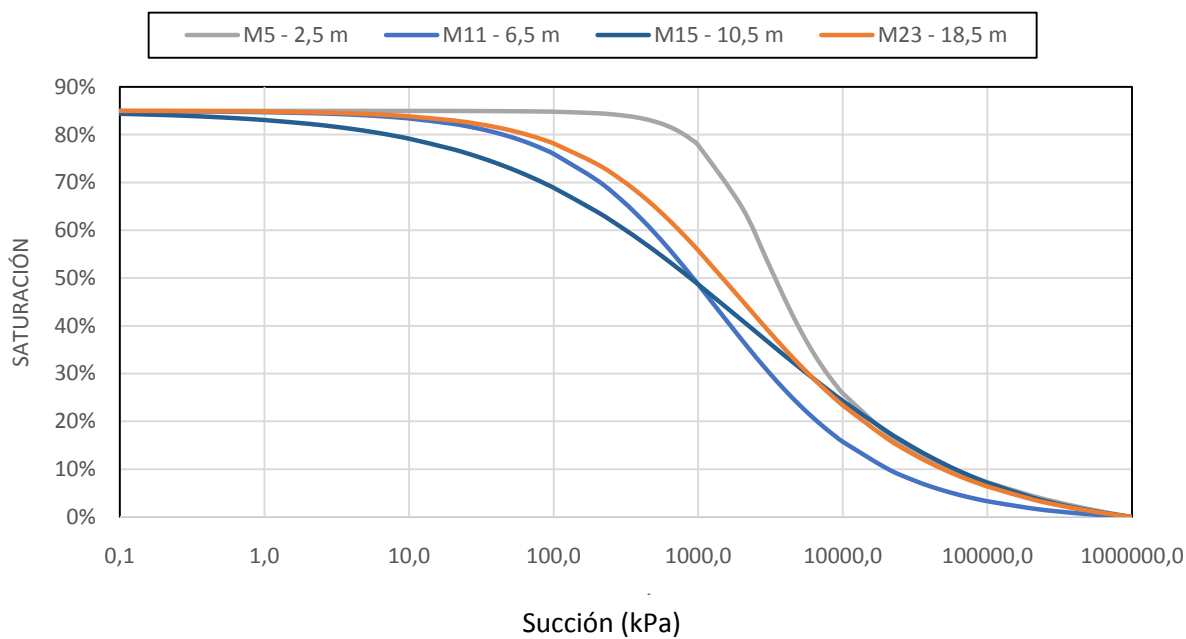


Figura 4- 38. Modelación de la SWCC experimental Sondage dos (2).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objeto de identificar claramente el material utilizado, se realizaron ensayos de clasificación y caracterización, determinando propiedades como límites de consistencia, distribución de tamaño de granos, peso específico y se establecieron las características de compresibilidad a través de ensayos de consolidación rápida. Por otra parte se establecieron las presiones de agua de poros mediante la medición de succión matricial en muestras inalteradas; así, apartir de sus propiedades físicas y mecánicas, y de las condiciones del agua de poros, se analizó el comportamiento de la arcilla superficial de la sabana de Bogotá y se obtuvo valores de K_0 que dependen de la historia de esfuerzos del terreno.

5.1. PROPIEDADES ÍNDICE

Las pruebas de laboratorio cuyo objetivo es caracterizar inicialmente el suelo, se llevaron a cabo sobre todas las muestras naturales, y a partir de los resultados se presentan los análisis correspondientes relacionando las propiedades entre sí.

- Los valores obtenidos para la Gravedad específica de los sólidos (G_s) se comparó con los valores obtenidos en investigaciones sobre arcillas en la ciudad de Bogotá D.C hechas por autores como Martínez y Rodríguez (2003), Pineda (2003), Suarez y Suarez (2005), encontrando que los valores se encuentran dentro del intervalo esperado, pero ubicados en un rango de valores altos; esto puede justificarse por posibles fallas en la ejecución del ensayo.

- Según los perfiles del límite de consistencia mostrados en las Figura (5-1), en el mes de noviembre de 2013 (mes de la extracción de las muestras) la humedad está muy cercana al valor del límite de contracción y al del límite plástico en los primeros cinco (5) metros del suelo, (más para el sondeo 2, que para el sondeo 1), lo cual puede deberse a las condiciones climáticas e historia de esfuerzo a la cual ha estado sometido el suelo. La cercanía de la humedad en los primeros metros al límite de contracción y al límite plástico del suelo, implica que el suelo puede dejar de comportarse como un material plástico y aumente la probabilidad de formación de grietas, (y a que su contenido de agua es muy bajo) evidenciándose el sondeo 2 como el más afectado por este comportamiento; debido a la alta presencia de árboles (pinos) cerca al lugar perforado, que perjudica la estabilidad de la estructura de soporte sobre la cual actúan todas las cargas; para este caso se entiende como estructura de soporte la vía en asfalto ubicada a un metro lineal de la perforación.
- Para el perfil de humedad natural con respecto a la profundidad (Figura 5-1), se evidencia un progresivo aumento de esta con la profundidad para ambos sondeos, (cerca de los valores de límite líquido del material), mostrando un comportamiento asintótico a partir de los cinco metros, sin embargo presenta para el sondeo uno su valor máximo a los 10 y 14 metros, mientras para el sondeo dos entre los 15 y 20 metros; esto puede deberse a la mayor presencia de finos ($\% < 2\mu$) en dichas profundidades (Figura 4-14) los cuales tienden a retener mayor cantidad de agua que la demás arcilla encontrada en el suelo.

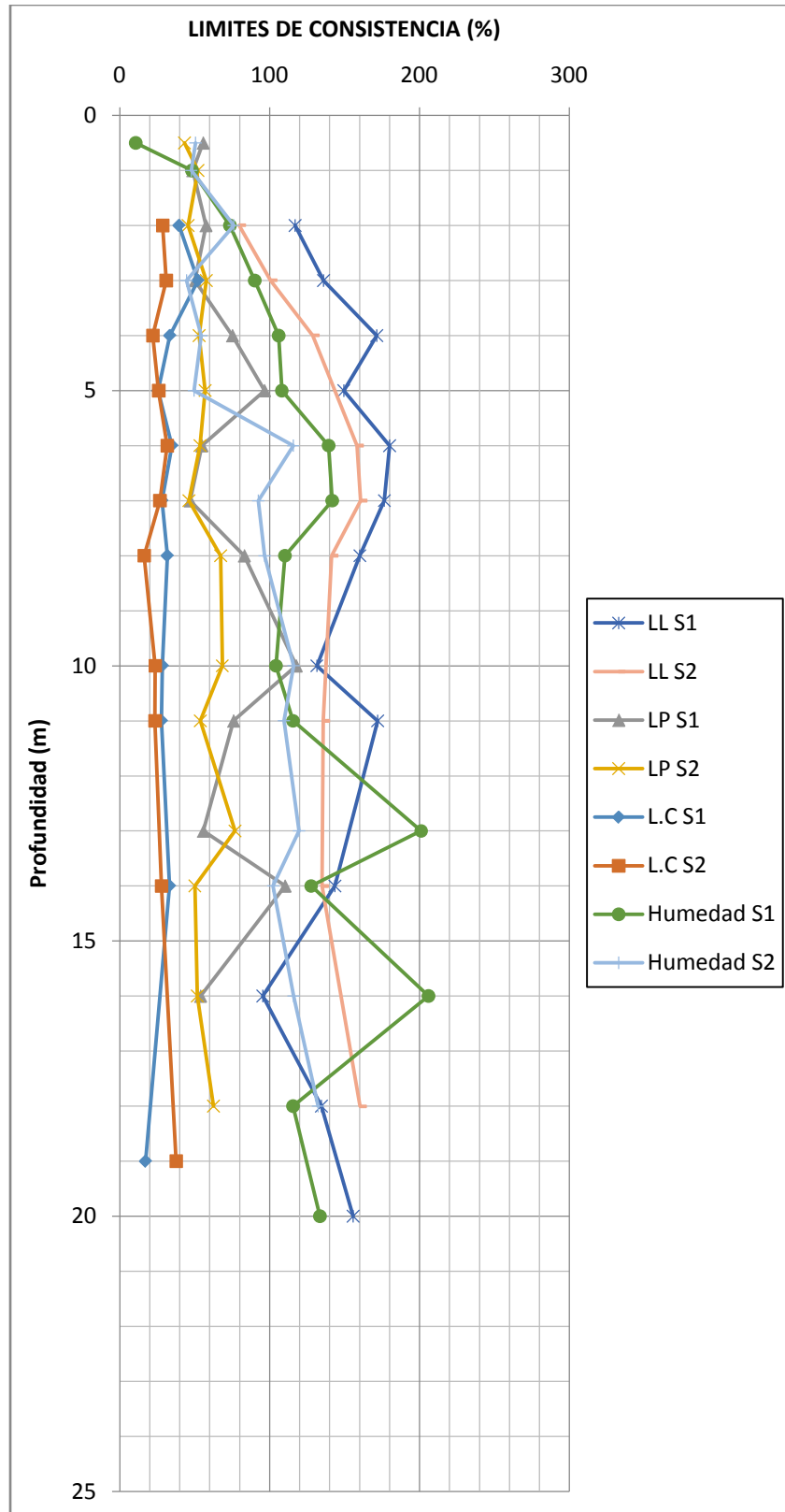


Figura 5- 1.Límites de consistencia del suelo para Sondeos uno (1) y dos (2).

A partir de las propiedades índice del material se clasificó el suelo encontrado en la zona, dando como resultado una clasificación muy cercana a la línea A de la carta de plasticidad para ambos sondeos (Figura 4-13); donde predominan materiales denominados MH, sin embargo algunas muestras se clasificaron como OH; la denominación H implica que el material encontrado es de alta plasticidad, lo cual se evidencia en los altos valores del límite líquido del suelo (Figura 5-1). Este tipo de suelo encontrado (de clasificación MH) presenta índices de plasticidad entre el 21 y 105 % (Figura 4-10). Para Lambe (1995) estos suelos de alta plasticidad, presentan permeabilidad muy baja y son difíciles de compactar.

5.2. COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA

Las curvas de retención de agua son una excelente herramienta para analizar el comportamiento de las arcillas blandas y a que muestran la interrelación de la magnitud de la succión matricial con el contenido de humedad de la masa de suelo y de esta manera se puede inferir el estado de esfuerzos presentes en el terreno y en las muestras en el laboratorio.

Para cada una de las muestras naturales se generó un conjunto de gráficas que permitió visualizar adecuadamente los puntos y las relaciones más interesantes, con respecto al valor de la succión matricial, la cual se hace variar cuando el material se somete, de manera controlada, a proceso de secado y humedecimiento.

Al desarrollarse el proceso de secado en la muestra se llega a un punto donde se presenta pérdida de saturación, este punto se ha denominado “valor de entrada de aire” (“Air Entry Value”,

AEV), donde el suelo empieza a tener poros con agua y aire simultáneamente. Este punto es de gran interés para el estudio de la mecánica de suelos, y a que este punto es el límite donde se pasa de la condición saturada a la parcialmente saturada.

Cada uno de los especímenes ensayados presenta valores de AEV diferentes, para el sondeo uno, dichos rangos de AEV estuvieron desde 500 kPa hasta 1000 kPa, en cuanto al sondeo dos sus valores fueron mucho más altos, presentándose AEV desde 500 kPa hasta aproximadamente 2000 kPa. Este comportamiento se justifica y a que el suelo cambia su composición mineralógica a medida que aumenta la profundidad, a su vez con la variación de las propiedades índice, que de esta manera confirmaría la presencia de diferentes tipos de suelo. Adicionalmente hay influencia de la gradación o granulometría de cada muestra, y a que el porcentaje de arcilla varía de forma clara en las diferentes profundidades a las cuales se hizo la exploración.

Los valores más altos de succión en el punto de entrada de aire, se presentaron en muestras localizadas entre 1.00 y 200 metros para ambos sondeos, profundidades a las cuales se prevé existe un mejor acomodamiento y una mayor variedad en el tamaño de los poros que se pueden formar, lo cual implicaría la necesidad de usar una mayor energía para extraer agua a dicha profundidad.

Identificados estos valores de entrada de aire, y comparados con algunas referencias bibliográficas, se puede notar que este valor de entrada de aire en suelos arcillosos de tipo sedimentario como los de la sabana de Bogotá corresponde a valores aproximados a los hallados por Martínez y Rodríguez (2003) de 1200 y 1500 kPa o por Pineda (2003) del orden de los 2900 kPa.

Existen referencias sobre el valor de succión en el punto de entrada de aire, en diferentes suelos arcillosos como los mencionados por Fleureau *et al*, (1993), y mostrados en la Tabla (5-1).

Al comparar dichos resultados con los obtenidos sobre las muestras de suelos del occidente de la sabana de Bogotá D.C (Tabla 5-2) se asemejan a valores de tipos de suelos que van desde arcilla blanca (900 kPa) hasta arcilla Gault (300 kPa), para el sondeo 1, mientras que para el sondeo dos dichos valores se asemejan a arcilla de Escocia (2000 kPa). Sin embargo las diferencias son radicales respecto a los altos porcentajes de límites líquidos hallados para el occidente de Bogotá, por lo cual no se puede generalizar el análisis teniendo en cuenta esta propiedad índice.

Tabla 5- 1. Relación entre el límite líquido y el valor de entrada de aire para diferentes tipos de suelo. Tomada de Fleureau *et al*, (1993).

Material Nº	Tipode suelo	L.L. (%)	AEV (kPa)	L.C. (%)	Referencia
1	Suelos de Sterrebeek	27	26	22	Zerhouni 1991
2	Arcilla de Vieuxpré	32	800	19	Indarto 1991
3	Red Mari	36	500	16	Biarez. <i>et al</i> . 1988
4	Suelos de Jossigny	37	800	15	Indarto 1991
5	Arcilla Amarilla	40	700	22	Indarto 1991
6	Arcilla Gault	42	300	18	Croney and Coleman 1954
7	Arcilla del St. Rosalie	48	700	24	Yong <i>et al</i> . 1970
8	Arcilla de Escocia	49	2000	16	Blight 1966
9	Limos	55	800	25	Fredlund 1967
10	Arcilla Blanca	61	900	32	Zerhouni 1991
11	Arcilla O.F.S.	61	3000	12	Blight 1966
12	Arcilla de Londres	78	2500	25	Croney and Coleman 1954
13	Caolin	80	2000	50	Yong <i>et al</i> . 1970
14	Allophane	140	4500	45	Haguwara <i>et al</i> . 1985
15	Montmorillonita	170	4500	25	Fleureau <i>et al</i> . 1992

Tabla 5- 2. Valores de AEV y Límite líquido hallados para la arcilla del occidente de la sabana de Bogotá.

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	LL %	AEV (kPa)
1	3	1.00-1.50	116,95%	1100
	11	5.00 - 5.50	135,98%	1000
	15	7.50 - 8.00	176,53%	600
	19	10.50 - 11.00	172,11%	800
	25	15.00 -15.50	143,55%	300
	29	18.00 - 18.50	134,49%	800
2	5	2.00-2.50	79,56%	2000
	11	6.00 - 6.50	254,69%	700
	15	10.00 - 10.50	160,62%	300
	23	18.00 - 18.50	152,01%	200

5.2.1. Comparación de las curvas de retención de agua

5.2.1.1. Grado de Saturación

Para la presente investigación se hace un análisis de la variación de la succión matricial de las muestras tomadas a diferentes profundidades en función del grado de saturación del suelo; de donde es posible referenciar un comportamiento de la masa arcillosa estudiada dependiendo de las variaciones en la succión matricial.

Inicialmente y de manera clara, se puede ver que el suelo estudiado a lo largo de todo el perfil presenta valores iniciales para el grado de saturación en promedio del 88%, lo cual indica que los espacios intergranulares de la masa arcillosa, en su gran mayoría están llenos de agua. Esta condición se presenta gracias a que el suelo se encuentra por encima del nivel freático donde debido a la presencia de fuerzas iónicas (de origen electroquímico) entre las partículas arcillosas que generan la permanencia de agua en la superficie circundante.

En la gran mayoría de las muestras analizadas (tanto para el sondeo uno como para el dos) el AEV se presenta para saturaciones por encima del 80% (Figura 4-27 y 4-28). De la misma manera como se mencionaba anteriormente en función de una variable como la saturación, los

valores de AEV toman valores diferentes, presentándose para muestras superficiales del sondeo uno valores del orden de los 1100 kPa y para muestras más profundas 800 kPa. Para el sondeo dos, superficialmente se presentan valores de AEV de 2000 kPa y en muestras mucho más profundas valores muchos más bajos de 200 kPa. En general se observa la capacidad del material para mantenerse saturado hasta succiones cercanas a 1000 kPa, luego de alcanzar dicha succión matricial, el grado de saturación de cada una de las muestras empieza a decrecer rápidamente.

A partir de una succión matricial aproximada de 13000 kPa para el sondeo uno y de 12000 kPa para el sondeo dos, los incrementos en la succión necesarios para disminuir el grado de saturación son más significativos. Este comportamiento puede asociarse a la presencia de poros muy pequeños en la matriz del suelo, aun llenos de agua libre.

En el final del proceso de secado el grado de saturación es de aproximadamente de 10% y 8% con valores de succión matricial cercanos a 50.000 kPa y 60.000 kPa respectivamente para los sondeos uno y dos. En este punto se puede considerar que el valor de agua libre existente en los poros del material ha sido removida. Las muestras analizadas no se sometieron a un reproceso de humedecimiento, por lo cual no se evidencian fenómenos de histéresis del material ocasionado cuando la muestra no alcanza el grado de saturación inicial.

5.3. APLICACIÓN DE EXPRESIONES QUE DEFINEN EL COEFICIENTE LATERAL DE PRESIÓN DE TIERRAS EN REPOSO K_o.

A partir de las expresiones que hasta el momento han sido planteadas por varios autores para definir valores de K_o, como así fueron mencionadas en el capítulo 2 del presente trabajo de investigación, es posible determinar el estado de esfuerzos de un suelo.

La Tabla (5-3) muestra las expresiones que fueron utilizadas y analizadas para determinar K_o. Todas ellas se aplicaron sobre muestras de suelo tomado para ambos sondeos, es importante mencionar que de la Tabla (5-3) no se toma en cuenta la Ecuación (2.11) por referirse a arcillas Normalmente consolidadas (NC), clasificación para la cual ninguna RSC aplico directamente (Figura 4-15). De igual manera la Ecuación (2.20).

Tabla 5- 3. Algunas Expresiones para el coeficiente de presión de tierras en reposo.

TIPO DE SUELO	No	ECUACIÓN	AUTOR
Material elástico	(2.11)	$K_o = \frac{\mu}{1 - \mu}$	Teoría Elástica
Arcillas o Arenas Normalmente Consolidadas	(2.20)	$K_o = (1 - \text{sen } \varphi')$	Jaky (1944)
Arcillas Sobreconsolidadas (SC)	(2.23)	$K_o = \frac{\sigma_{ph}}{\sigma_{pv}}$	Tavenas (1975)
	(2.24)	$K_{o(sc)} = (1 - \text{sen } \varphi') * RSC^{\text{sen } \varphi'}$	NSR - Título H - 2010
Arcillas según $U_a - U_w$	(2.29)	$K_o = \frac{\left(\frac{u_a - u_w}{\sigma'_v}\right) + A - 1}{A}$	Skempton (1961) (ver anexo I)

Teniendo en cuenta las ecuaciones que definen el valor de K_o para suelos sobreconsolidados (SC) en función del ángulo de resistencia al corte (φ') (determinado a partir de dos ensayos de tipo

triaxial CU para cada uno de los sondeos, ver anexo III) se determinaron los valores de K_o para una arcilla del occidente de la sabana de Bogotá D.C.

5.3.1. Determinación del coeficiente K_o para arcillas sobreconsolidadas (SC)

El perfil de variación de la relación de sobreconsolidación (RSC) es otro de los aspectos importantes que se deben establecer para el suelo. Éste se determinó de manera experimental a través de la prueba de consolidación unidimensional en la cual se determina el esfuerzo de preconsolidación para cada una de las muestras naturales.

Es importante mencionar que la mecánica de suelos establece una clasificación de los suelos de acuerdo con el valor que toma RSC; donde un suelo con RSC menor igual a uno (≤ 1) es un suelo Normalmente consolidado (NC), cuando RSC es mayor que uno (≥ 1) el suelo esta sobreconsolidado. (Lambe, 1995).

Comparado lo anterior con los valores obtenidos para RSC (Figura 4-15) para ambos sondeos, se puede clasificar el suelo de todo el perfil como suelos sobreconsolidados, donde el valor RSC presenta siempre valores mayores a uno (1). Sin embargo a una profundidad de veinte metros (20 m) los valores de RSC tienden a ser menores que uno (1); es decir un suelo normalmente consolidado (NC).

Las expresiones (2.13) y (2.15) (Tabla 5-4) permiten general un perfil de variación de K_o y a que RSC varía con la profundidad, dicho perfil se muestra en la Figura (5-2). Adicionalmente se muestran otros perfiles que se comparan entre sí como esfuerzo efectivo, y esfuerzo de

preconsolidación para ambos sondeos teniendo en cuenta que se hicieron consolidaciones en sentido vertical y horizontal para determina K_o (Figura 5-3).

La utilización de RSC (Figura 5-2 a) en la definición de K_o implica la utilización de la ecuación publicada por la NSR -10, la cual involucra el ángulo de resistencia al corte (ϕ'), que para este caso se tomó de constante para cada uno de los sondeos de acuerdo a los resultados obtenidos de dos ensayos de tipo triaxial CU para ambos sondeos (anexo III). De esta forma lo que hace variar el K_o es solamente RSC según la expresión (2.15).

Analizando la información de la Figura (5-3) se describe la variación del esfuerzo efectivo vertical con la profundidad, la cual toma una tendencia lineal a medida que aumenta la profundidad. También se presenta la variación del esfuerzo de preconsolidación (σ_p), comparado con el esfuerzo efectivo actuante que en el momento del muestreo solo se asemejan para una profundidad de 14.50 metros; es decir que a esta profundidad el valor de RSC debe ser muy cercano a la unidad o corresponde a una unidad como así se evidencia en la Figura (5-2a), mientras que en la parte inicial del perfil descrito por esta variable de esfuerzos, la tendencia es decreciente y sus valores son muy lejanos comparados con el esfuerzo efectivo actuante alcanzando sus valores máximos en los primeros seis metros de profundidad para ambos sondeos, que puede explicarse dada la gran afectación que sufre por agrietamientos y pérdida constante de humedad.

Tabla 5- 4. Valores de K_o para las ecuaciones 2-13 y 2-15

Sondeo	Muestra	Sentido	Profundidad (m)	σ´p (kPa)	RSC	Cc	Cs	Ko Tavenas	φ´	Ko NSR-10
1	M - 3	V	1,00	191,30	6,27	0,197	0,009	0,95	19,14	1,20
		H		181,49	5,95	0,281	0,013			
	M - 6	V	2,00	206,01	5,36	0,435	0,012	0,90		1,14
		H		186,39	4,85	0,323	0,012			
	M - 8	V	4,00	210,92	4,11	0,729	0,006	0,95		1,06
		H		201,11	3,92	0,628	0,005			
	M - 11	V	6,00	206,01	2,83	0,694	0,011	1,04		0,97
		H		213,86	2,94	1,214	0,023			
	M - 15	V	8,00	155,00	1,49	1,734	0,317	0,98		0,80
		H		152,06	1,47	1,405	0,493			
	M - 19	V	11,00	175,60	1,42	1,680	0,234	0,97		0,79
		H		169,71	1,37	2,007	0,295			
	M - 25	V	15,00	186,39	1,03	1,700	0,255	1,00		0,72
		H		186,39	1,03	1,463	0,139			
	M - 29	V	18,00	175,60	0,82	1,619	0,191	0,89		0,66
		H		156,96	0,73	1,304	0,216			
2	M - 4	V	2,00	196,20	6,81	0,356	0,005	0,95	13,60	1,23
		H		186,39	6,47	0,487	0,005			
	M - 7	V	4,00	191,30	4,90	0,409	0,003	0,97		1,12
		H		186,39	4,78	0,591	0,005			
	M - 9	V	5,00	205,03	3,33	0,477	0,012	0,93		1,00
		H		191,30	3,11	0,631	0,011			
	M - 11	V	6,00	201,11	2,62	0,534	0,006	1,02		0,94
		H		206,01	2,68	0,543	0,007			
	M - 19	V	14,00	186,39	1,01	1,899	0,288	1,01		0,72
		H		187,37	1,03	2,086	0,266			
	M - 23	V	18,00	155,00	1,58	1,734	0,317	1,08		0,75
		H		166,77	0,76	2,441	0,223			

Los perfiles de K_o mostrados en la Figura (5-2 c) muestra que la expresión de la Tavenas (1975) (ecuación 2.23) y la expresión de NSR-10 (ecuación 2.24) presentan valores de K_o para el sondeo número uno cercanos en los primeros metros con valores entre 1.04 y 1.2, pero a medida que aumenta la profundidad estos valores se van alejando, tanto así que hacia los 18 metros hay valores de K_o iterando entre 0.89 y 0.66 respectivamente. Para el sondeo número dos, la expresión de la Tavenas (1975) (ecuación 2.23) y la expresión de NSR-10 (ecuación 2.24) muestran un comportamiento en los primeros metros donde los valores de K_o están alrededor de 0.9 y 1.23 respectivamente, a medida que aumenta la profundidad, dichos valores se van alejando mostrando un comportamiento similar al del sondeo uno, tanto así que a los 18 metros

hay valores de K_o iterando entre 1.08 y 0.75. Si se comparan las dos expresiones matemáticas usadas en el presente análisis se puede notar que el valor de K_o propuesto por la NSR-10 está en función dos variables como lo son en ángulo de resistencia al corte (ϕ') y RSC; mientras que la de Tavenas (1975) está en función del esfuerzo de preconsolidación vertical y horizontal de cada una de las muestras naturales ensayadas bajo la norma del ensayo o de consolidación unidimensional. Esto hace obtener valores de K_o mayores para ambos sondeos a partir de la expresión de la ecuación (2.23) propuesta por Tavenas (1975), de esta forma se obtendrían valores de esfuerzos horizontales mayores.

Se debe tener en cuenta que la mayoría de estas expresiones han sido determinadas de manera empírica y pueden ser útiles en suelos del mismo tipo o similares que los usados por sus autores en los diferentes trabajos de investigación, más sin embargo la NSR-10 recomienda una expresión como la de la ecuación (2.24) para este tipo de suelos Sobreconsolidados (SC).

Estos perfiles muestran la variación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_o en las cuales se tiene en cuenta variables que son más fáciles y rápidas de conocer en laboratorio, de igual manera permite una aproximación al conocimiento del estado de esfuerzos en un suelo.

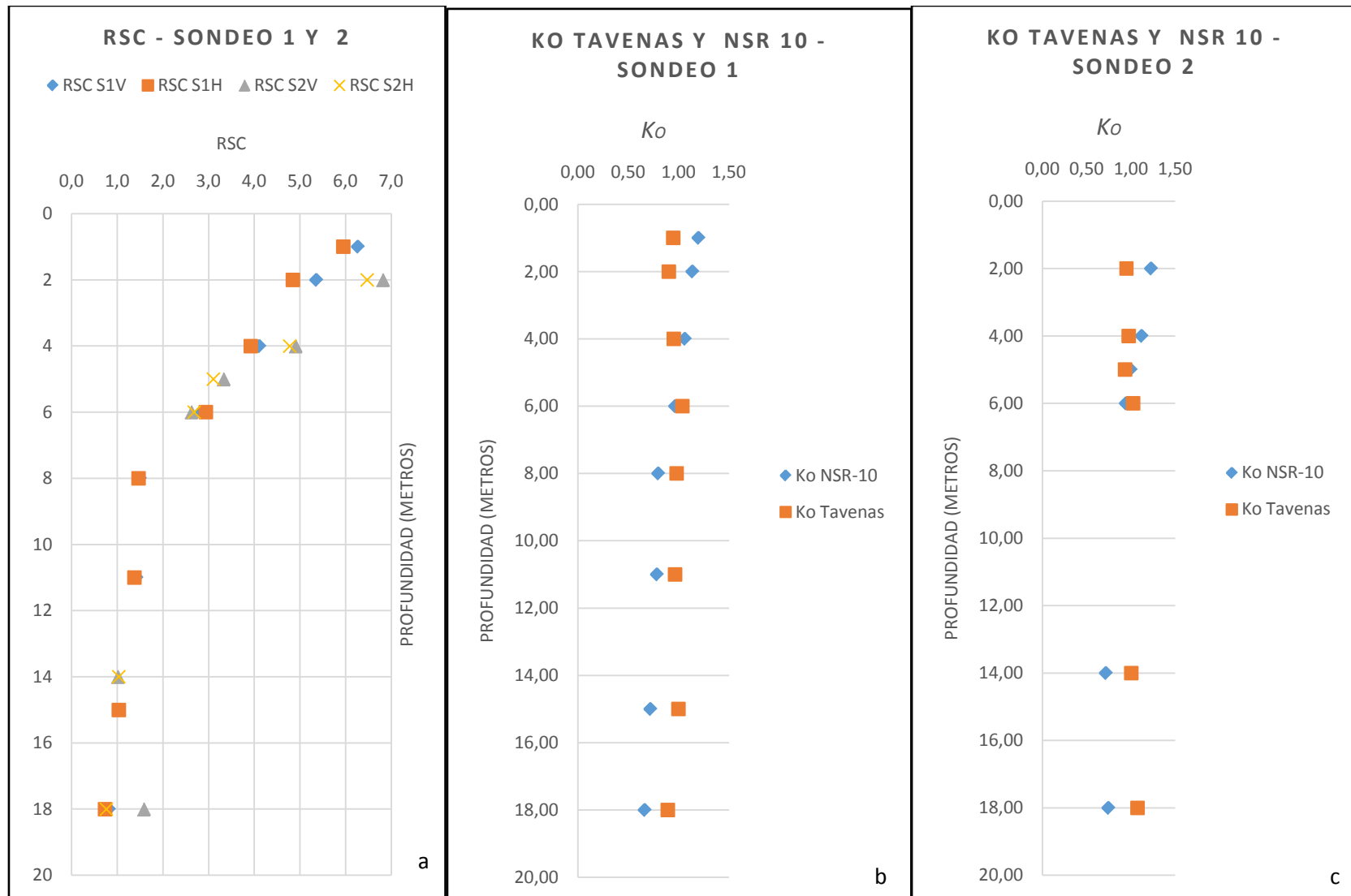


Figura 5- 2. Perfiles de K_o para los sondeos 1 y 2 según ecuaciones (2.13) Tavenasy (2.15) NSR-10.



Figura 5- 3. Esfuerzo vertical efectivo y esfuerzo de preconsolidación Vs profundidad para los sondeos uno y dos en ambos sentidos (vertical y horizontal).

5.3.2. Determinación del coeficiente K_o para las arcillas del occidente de la sabana de Bogotá D.C teniendo en cuenta la succión matricial ($U_a - U_w$)

Para generar un perfil con la ecuación (2-29), fue preciso determinar de manera experimental el valor de succión matricial y el valor del esfuerzo efectivo vertical presentados por el suelo cuando éste se extrajo del sitio, en condiciones naturales. Es importante mencionar que se tomó la magnitud de la presión de poros como la medida de succión matricial; a partir del peso unitario total del suelo (γ_t), y conociendo el valor de la succión matricial ($U_a - U_w$) se estableció el valor del esfuerzo efectivo vertical, teniendo en cuenta el coeficiente (X) en función del grado de saturación para suelos parcialmente saturados Bishop (1952) (mencionado por Fredlund, 1994) (Figura 5-4).

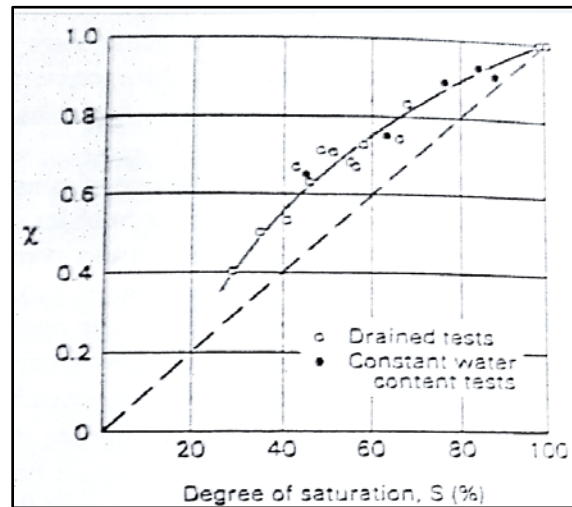


Figura 5-4. Coeficiente X en función del grado de saturación para hallar esfuerzo efectivo vertical teniendo en cuenta la succión matricial. Tomado de Fredlund (1994).

Todas las variables anteriormente nombradas se determinaron y a que involucran la expresión (2.20) (Tabla 5-5). El parámetro A se tomó con un valor igual a $2/3$ como así se describe en el

anexo I; el cual se define como parámetro de presión de poros del muestreo, asumido constante a lo largo de todo el perfil explorado (Skempton 1961). Es posible encontrar una segunda expresión de K_o en donde se tome un parámetro de presión de poros A igual $1/3$ (Ecuación 2.28), esto simulando un caso de compresión axial; donde se asume que el mayor esfuerzo *in situ* está dado por el esfuerzo horizontal. Sin embargo comparando los resultados de ambas expresiones (2.28 y 2.29) la tendencia de puntos obtenidos es la misma, Tabla (5-5). Pero como se asume que el mayor esfuerzo *in situ* generado por el esfuerzo vertical, se toma la expresión (2.29) como la que muestra una situación más cercana a lo que ocurre en la masa de suelo arcillosa del occidente de la sabana de Bogotá D.C.

Es importante mencionar que durante el muestreo se pueden generar alteraciones de la muestra y por ende sobre algunas de sus propiedades, una de estas alteraciones corresponde a la generada en el valor de la succión matricial.

El perfil mostrado en la Figura (5-5) muestra los valores de K_o calculados en la Tabla (5-5), cuyo comportamiento para el sondeo número uno evidencia que en los primeros cinco metros (profundidad afectada por agrietamientos) K_o toma valores de 1.31 hasta 1.13, posteriormente su reducción se hace mayor tomando un valor de 0.85 hasta 0.81 hasta los siete metros, para tomar valores de 0.54 a los ocho metros hasta disminuir a 0,37 para los 11 metros, a esta profundidad se presenta una leve alza del valor de K_o a 0.53 para disminuir progresivamente hasta alcanzar un valor de 0.37 a los 20.00 metros de profundidad. Para el sondeo número dos presenta un comportamiento similar, tomando los valores de K_o en los primeros cinco metros (zona igualmente afectada por agrietamientos en el suelo más succión impartida por arboles) donde K_o toma valores de 1.31 a 1.02, posteriormente su reducción se hace mayor tomando un valor de 0.98 hasta 0.64 hasta los siete metros, para tomar valores de 0.51 a los ocho metros hasta

disminuir a 0,47 para los 11 metros, a esta profundidad se presenta el mismo comportamiento (a diferencia del sondeo 1 a 11 metros) donde el valor de K_o disminuye a 0.31 a 15 metros, para disminuir progresivamente hasta alcanzar un valor de 0.36 a los 20.00 metros de profundidad. El sondeo numero dos presenta un comportamiento asintótico de K_o con respecto a la profundidad más definido con respecto al sondeo número uno, ya que los valores iniciales de succión inicial hallados presentan una disminución en su magnitud a lo largo del perfil de estudio (esto puede deberse a la presencia de árboles sobre ese costado de la vía que imparten una succión más significativa) que a comparación con el sondeo número uno, este presenta un “brinco” en el valor de succión a los 11 metros. (Ver Figura 5-5).

Tabla 5- 5. Datos para K_o Teniendo en cuenta la succión matricial inicial del suelo.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	γ _t (kN/m ³)	σ'v (kPa)	ua (kPa)	ÉPOCA INICIAL DEL AÑO					
					PARCIALMENTE SATURADO (S<100%)					
					ua-uw(kPa)	So (%)	X	σ'v (kPa)	K _o	
									A=2/3	A=1/3
1	1	15,26	15,26	0,0	400,00	64%	0,79	331,26	1,31	1,31
	2	15,26	30,51	0,0	400,00	64%	0,79	346,51	1,23	1,23
	3	12,82	38,46	0,0	400,00	64%	0,79	354,46	1,19	1,19
	4	12,82	51,28	0,0	400,00	64%	0,79	367,28	1,13	1,13
	5	14,57	72,83	0,0	400,00	83%	0,93	444,83	0,85	0,85
	6	12,14	72,84	0,0	400,00	83%	0,93	444,84	0,85	0,85
	7	12,14	84,98	0,0	400,00	83%	0,93	456,98	0,81	0,81
	8	13,22	105,80	0,0	200,00	81%	0,91	287,80	0,54	0,54
	9	13,22	119,02	0,0	200,00	81%	0,91	301,02	0,50	0,50
	10	13,22	132,25	0,0	200,00	81%	0,91	314,25	0,45	0,45
	11	11,50	126,50	0,0	200,00	83%	0,93	312,50	0,46	0,46
	12	11,50	138,00	0,0	200,00	83%	0,93	324,00	0,43	0,43
	13	11,50	149,50	0,0	200,00	83%	0,93	335,50	0,39	0,39
	14	11,50	161,00	0,0	200,00	83%	0,92	345,00	0,37	0,37
	15	11,13	166,98	0,0	300,00	80%	0,9	436,98	0,53	0,53
	16	11,13	178,11	0,0	300,00	80%	0,9	448,11	0,50	0,50
	17	11,13	189,24	0,0	300,00	80%	0,9	459,24	0,48	0,48
	18	11,13	200,38	0,0	300,00	85%	0,95	485,38	0,43	0,43
	19	11,13	211,51	0,0	300,00	85%	0,95	496,51	0,41	0,41
	20	11,13	222,64	0,0	300,00	85%	0,95	507,64	0,39	0,39
2	1	14,35	14,35	0,0	300,00	63%	0,78	248,35	1,31	1,31
	2	14,35	28,70	0,0	300,00	63%	0,78	262,70	1,21	1,21
	3	13,00	39,01	0,0	300,00	63%	0,78	273,01	1,15	1,15
	4	15,44	61,74	0,0	300,00	63%	0,78	295,74	1,02	1,02
	5	14,07	70,37	0,0	300,00	63%	0,78	304,37	0,98	0,98
	6	12,80	76,77	0,0	200,00	77%	0,87	250,77	0,70	0,70
	7	12,80	89,57	0,0	200,00	77%	0,87	263,57	0,64	0,64
	8	15,44	123,48	0,0	200,00	77%	0,87	297,48	0,51	0,51
	9	15,44	138,96	0,0	200,00	77%	0,87	312,96	0,46	0,46
	10	12,33	123,25	0,0	200,00	83%	0,93	309,25	0,47	0,47
	11	12,33	135,58	0,0	200,00	83%	0,93	321,58	0,43	0,43
	12	12,33	147,90	0,0	200,00	83%	0,93	333,90	0,40	0,40
	13	12,33	160,23	0,0	200,00	83%	0,93	346,23	0,37	0,37
	14	12,33	172,55	0,0	200,00	83%	0,93	358,55	0,34	0,34
	15	12,33	184,88	0,0	200,00	83%	0,93	370,88	0,31	0,31
	16	11,30	180,74	0,0	200,00	83%	0,93	366,74	0,32	0,32
	17	11,30	192,04	0,0	200,00	83%	0,93	378,04	0,29	0,29
	18	11,77	211,79	0,0	300,00	86%	0,95	496,79	0,41	0,41
	19	11,77	223,56	0,0	300,00	86%	0,95	508,56	0,38	0,38
	20	11,77	235,32	0,0	300,00	86%	0,95	520,32	0,36	0,36

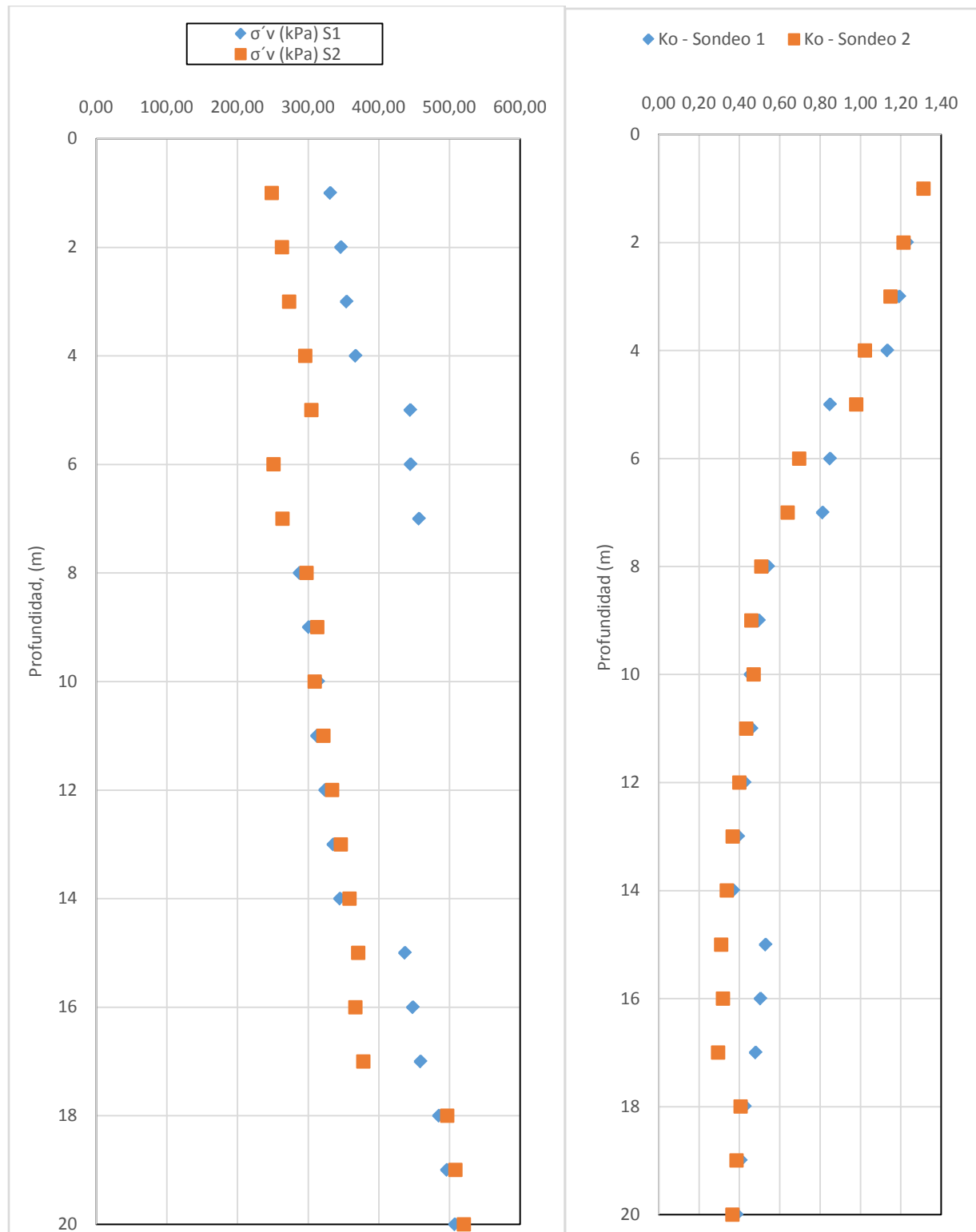


Figura 5- 5. Perfiles de esfuerzos efectivos verticales efectivos (a) y valores de K_o (b) para los sondeos 1 y 2

5.3.2.1. Variación de K_o según la época del año a partir de las curvas de retención.

En el sitio el sitio, el suelo superficial está sometido a condiciones ambientales, variables que se ven reflejadas en los procesos de secado y humedecimiento. Estos procesos no siempre son de la misma duración y no presentan las mismas condiciones para el suelo cada vez que se presentan; lo cual genera cambios en la estructura o fabrica del suelo. Mediante las curvas de retención, es posible describir el comportamiento de algunas variables con respecto a la succión matricial, variables que se ven afectadas por las condiciones ambientales a las que se ve expuestas el suelo en el transcurso del año.

Si se tiene en cuenta que el suelo presenta variaciones en los perfiles de humedad o saturación según la intensidad con que es afectada por los factores ambientales, con la ayuda de las curvas de retención es posible determinar un rango de humedad para el cual el suelo se comporta como un material saturado.

Teniendo una curva de retención donde se relaciones humedad o saturación con la succión matricial basta con conocer el valor de la humedad en el instante deseado para conocer el valor de succión matricial al cual se ve sometido en dicho instante, para que con esta magnitud de succión matricial y aplicando la ecuación (2.20) sea posible definir un valor como K_o para esta condición.

Con base en los valores tomados sobre cada una de las curvas de retención y conociendo el valor del esfuerzo efectivo vertical se puede determinar el valor de K_o para diversas épocas del año. Propiedades como la succión matricial varían de acuerdo al grado de saturación que se presente en el suelo para el periodo de tiempo estimado.

Es importante mencionar que las curvas de retención no siempre me van a mostrar una succión matricial de interés; y a que no cobijan bien sea todo el rango de saturaciones a las que se puede encontrar la muestra, en especial si la saturación supera el valor inicial presente al comienzo de secado.

La capacidad de un suelo para mantener su estado de humedad natural depende en gran parte del tipo de elementos que lo cubren o que lo protegen de los factores ambientales. Para la presente investigación la mayoría del suelos registra estar cubierto por una capa vegetal 2.00 metros conformada básicamente por césped para el sondeo uno y dos. El césped genera una capa aislante entre el suelo y la atmósfera, evitando de esta manera la evaporación excesiva y manteniendo unas condiciones de humedad más estables. Sin embargo para el tipo de suelo encontrado en el occidente de la sabana de Bogotá D.C la capa que cubre este suelo es insuficiente, y a que en los primeros 5.00 a 6.00 metros se registran grandes alteraciones físicas ocasionadas por la desecación a esto se le suma que hay que tener en cuenta que los árboles grandes (ubicados al costado del sondeo dos) generan fenómenos de desecación importantes, especialmente si estos árboles pertenecen a especies que requieren mucha agua (NSR-10).

Teniendo en cuenta que los valores determinados para K_o en la Tabla (5-5) están en función de la relación entre el grado de saturación inicial de cada una de las muestras y la succión matricial, estos valores corresponden al valor de K_o inicial, (teniendo en cuenta que las muestras fueron extraídas a finales del mes de noviembre, época invernal).

La Tabla (5-6) muestra los valores de K_o para el mes de noviembre de 2013; que para efectos prácticos se denominara inicio del año (temporada de invierno) y una aproximación para condiciones del suelo en las cuales disminuye notablemente el grado de saturación (temporada

de verano); es decir para el próximo año, que para efectos prácticos se denominará final de año. Los valores de K_o para el final del año fueron estimados a partir de los valores de succión matricial tomados de la curva de retención para una saturación menor al 18%, los cuales fueron reemplazados en la ecuación (2.29) junto con el valor del esfuerzo vertical efectivo.

En la Figura (5-6) se muestra los perfiles de succión matricial que corresponderían al inicio y final de año a lo largo de 20 metros de profundidad para ambos sondeos, valores que presentan un comportamiento de succión mucho mayor para el periodo comprendido al final del año para los primeros 4 metros de profundidad con respecto al inicio del mismo, ambos sondeos presentan este mismo comportamiento, alcanzando el sondeo valores de succión al final de año en los primeros 4 metros de 500000 kPa con respecto a 400 kPa que alcanzaría al inicio del mismo. En cuanto al sondeo número dos, presenta valores de 400000 kPa en los primeros 5 metros de profundidad al final del año con respecto a los 300 kPa que presentaría al inicio del mismo.

Luego de estos primeros metros de profundidad, la succión matricial toma un comportamiento decreciente a medida que aumenta la profundidad, llegando a valores entre 300 kPa y 400 kPa al inicio del año y 100000 kPa a 200000 kPa para el final del año para ambos sondeos. Evidenciando que la mayor succión a la cual está sometido el suelo se presenta a final de año, lo cual va generar valores de K_o mucho menores de los medidos al inicio del mismo.

Como se mencionaba anteriormente este comportamiento genera que los valores de K_o en los primeros seis metros del sondeo uno cambien de manera significativa para el sondeo uno de 1.31 a 1.40 entre el inicio y final del año respectivamente, mientras para el sondeo dos este cambio itere de 1.31 a 1.42. Si nos enfocamos ahora en el comportamiento de K_o esperado para el final de año su comportamiento no es tan decreciente año como si lo fue para el inicio del mismo; ya

que sus valores no disminuyen de la unidad (1.00) que comparado con la variaciones de K_o al inicio del año es significativa ya que alcanza valores de 0.37 y 0.36 a 20 metros de profundidad para ambo sondeos. (Ver Figura 5-6).

Tabla 5- 6. Valores de K_o estimados para épocas iniciales y finales del año para ambos sondeos.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	Yt (kN/m ³)	σ'v (kPa)	ua (kPa)	ÉPOCA INICIAL DEL AÑO						ÉPOCA FINAL DEL AÑO					
					PARCIALMENTE SATURADO (S<100%)						PARCIALMENTE SATURADO (S<100%)					
					ua-uw(kPa)	So (%)	X	σ'v (kPa)	K _o		ua-uw(kPa)	Sf (%)	X	σ'v (kPa)	K _o	
									A=2/3	A=1/3					A=2/3	A=1/3
1	1	15,26	15,26	0,0	400,00	64%	0,79	331,26	1,31	1,31	500000	6%	0,79	395015	1,40	1,40
	2	15,26	30,51	0,0	400,00	64%	0,79	346,51	1,23	1,23	500000	6%	0,79	395031	1,40	1,40
	3	12,82	38,46	0,0	400,00	64%	0,79	354,46	1,19	1,19	500000	6%	0,79	395038	1,40	1,40
	4	12,82	51,28	0,0	400,00	64%	0,79	367,28	1,13	1,13	500000	6%	0,79	395051	1,40	1,40
	5	14,57	72,83	0,0	400,00	83%	0,93	444,83	0,85	0,85	400000	3%	0,93	372073	1,11	1,11
	6	12,14	72,84	0,0	400,00	83%	0,93	444,84	0,85	0,85	400000	3%	0,93	372073	1,11	1,11
	7	12,14	84,98	0,0	400,00	83%	0,93	456,98	0,81	0,81	400000	3%	0,93	372085	1,11	1,11
	8	13,22	105,80	0,0	200,00	81%	0,91	287,80	0,54	0,54	300000	18%	0,91	273106	1,15	1,15
	9	13,22	119,02	0,0	200,00	81%	0,91	301,02	0,50	0,50	300000	18%	0,91	273119	1,15	1,15
	10	13,22	132,25	0,0	200,00	81%	0,91	314,25	0,45	0,45	300000	18%	0,91	273132	1,15	1,15
	11	11,50	126,50	0,0	200,00	83%	0,93	312,50	0,46	0,46	300000	16%	0,93	279127	1,11	1,11
	12	11,50	138,00	0,0	200,00	83%	0,93	324,00	0,43	0,43	300000	16%	0,93	279138	1,11	1,11
	13	11,50	149,50	0,0	200,00	83%	0,93	335,50	0,39	0,39	300000	16%	0,93	279150	1,11	1,11
	14	11,50	161,00	0,0	200,00	83%	0,92	345,00	0,37	0,37	300000	16%	0,92	276161	1,13	1,13
	15	11,13	166,98	0,0	300,00	80%	0,9	436,98	0,53	0,53	200000	6%	0,9	180167	1,17	1,17
	16	11,13	178,11	0,0	300,00	80%	0,9	448,11	0,50	0,50	200000	6%	0,9	180178	1,17	1,17
	17	11,13	189,24	0,0	300,00	80%	0,9	459,24	0,48	0,48	200000	6%	0,9	180189	1,16	1,16
	18	11,13	200,38	0,0	300,00	85%	0,95	485,38	0,43	0,43	100000	0,2%	0,95	95200	1,08	1,08
	19	11,13	211,51	0,0	300,00	85%	0,95	496,51	0,41	0,41	100000	0,2%	0,95	95212	1,08	1,08
	20	11,13	222,64	0,0	300,00	85%	0,95	507,64	0,39	0,39	100000	0,2%	0,95	95223	1,08	1,08
2	1	14,35	14,35	0,0	300,00	63%	0,78	248,35	1,31	1,31	400000	9%	0,78	312014	1,42	1,42
	2	14,35	28,70	0,0	300,00	63%	0,78	262,70	1,21	1,21	400000	9%	0,78	312029	1,42	1,42
	3	13,00	39,01	0,0	300,00	63%	0,78	273,01	1,15	1,15	400000	9%	0,78	312039	1,42	1,42
	4	15,44	61,74	0,0	300,00	63%	0,78	295,74	1,02	1,02	400000	9%	0,78	312062	1,42	1,42
	5	14,07	70,37	0,0	300,00	63%	0,78	304,37	0,98	0,98	400000	9%	0,78	312070	1,42	1,42
	6	12,80	76,77	0,0	200,00	77%	0,87	250,77	0,70	0,70	300000	12%	0,87	261077	1,22	1,22
	7	12,80	89,57	0,0	200,00	77%	0,87	263,57	0,64	0,64	300000	12%	0,87	261090	1,22	1,22
	8	15,44	123,48	0,0	200,00	77%	0,87	297,48	0,51	0,51	300000	12%	0,87	261123	1,22	1,22
	9	15,44	138,96	0,0	200,00	77%	0,87	312,96	0,46	0,46	300000	12%	0,87	261139	1,22	1,22
	10	12,33	123,25	0,0	200,00	83%	0,93	309,25	0,47	0,47	200000	12%	0,93	186123	1,11	1,11
	11	12,33	135,58	0,0	200,00	83%	0,93	321,58	0,43	0,43	200000	12%	0,93	186136	1,11	1,11
	12	12,33	147,90	0,0	200,00	83%	0,93	333,90	0,40	0,40	200000	12%	0,93	186148	1,11	1,11
	13	12,33	160,23	0,0	200,00	83%	0,93	346,23	0,37	0,37	200000	12%	0,93	186160	1,11	1,11
	14	12,33	172,55	0,0	200,00	83%	0,93	358,55	0,34	0,34	200000	12%	0,93	186173	1,11	1,11
	15	12,33	184,88	0,0	200,00	83%	0,93	370,88	0,31	0,31	200000	12%	0,93	186185	1,11	1,11
	16	11,30	180,74	0,0	200,00	83%	0,93	366,74	0,32	0,32	200000	12%	0,93	186181	1,11	1,11
	17	11,30	192,04	0,0	200,00	83%	0,93	378,04	0,29	0,29	200000	12%	0,93	186192	1,11	1,11
	18	11,77	211,79	0,0	300,00	86%	0,95	496,79	0,41	0,41	100000	18,7%	0,95	95212	1,08	1,08
	19	11,77	223,56	0,0	300,00	86%	0,95	508,56	0,38	0,38	100000	18,7%	0,95	95224	1,08	1,08
	20	11,77	235,32	0,0	300,00	86%	0,95	520,32	0,36	0,36	100000	18,7%	0,95	95235	1,08	1,08

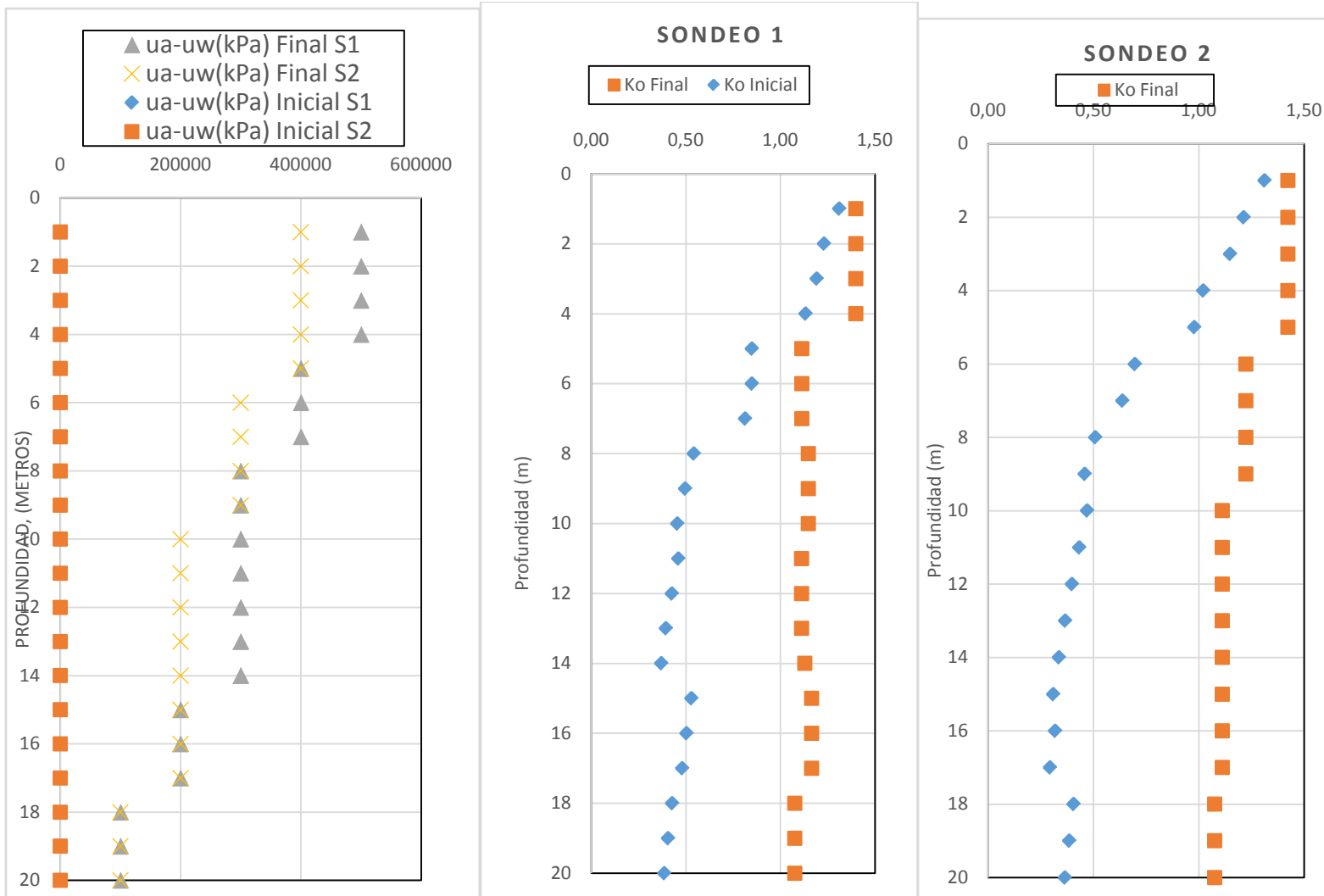


Figura 5- 6. Perfiles de Succión matricial y Valores para K_o para épocas inicial y final del año para ambos sondeos.

5.3.3. Comparación de los valores obtenidos del coeficiente K_o

Luego de describir de manera particular los resultados obtenidos para K_o de acuerdo con las expresiones escogidas, a continuación se hace una comparación entre todos ellos, para poder generar un análisis completo. La Figura (5-7) presenta todos los perfiles que describen las ecuaciones para determinar K_o con las diferentes expresiones.

A pesar que tanto la expresión presentada por Tavenas como la propuesta por la NSR-10 están en función de los ensayos de consolidación y de las expresiones que de este se desencadenan la expresión propuesta por la NSR 10 tiene un comportamiento más asintótico con la profundidad que la presentada y aplicada a la presente investigación de Tavenas. La expresión dada por la NSR 10 está en función de RSC y su comportamiento tiene un comportamiento similar a dicha relación de sobreconsolidación; para la cual K_o disminuye con la profundidad y tiene un valor promedio entre los valores obtenidos a través de K_o medido a partir de curvas de retención. Por otro lado la expresión que presenta mayores valores para ambos sondeos de K_o son las estimadas para el final de año en función de la succión matricial obtenida a través de las curvas de retención y obtención de variables fáciles de medir como lo es la humedad y la saturación, esto a su vez como consecuencia de la suposición de que el esfuerzo principal mayor está compuesto por el esfuerzo vertical y el esfuerzo principal menor por el esfuerzo horizontal (anexo I).

Por otro lado los K_o medidos a través de ensayos de consolidación propuestos por Tavenas (1975) arrojan valores de K_o constantes y sin mucha variación (a diferencia de las demás expresiones) a lo largo del perfil de la Figura (5-7), sin embargo se encuentra dentro del rango de los valores de K_o hallados para una arcilla superficial del occidente de la sabana de Bogotá D.C.

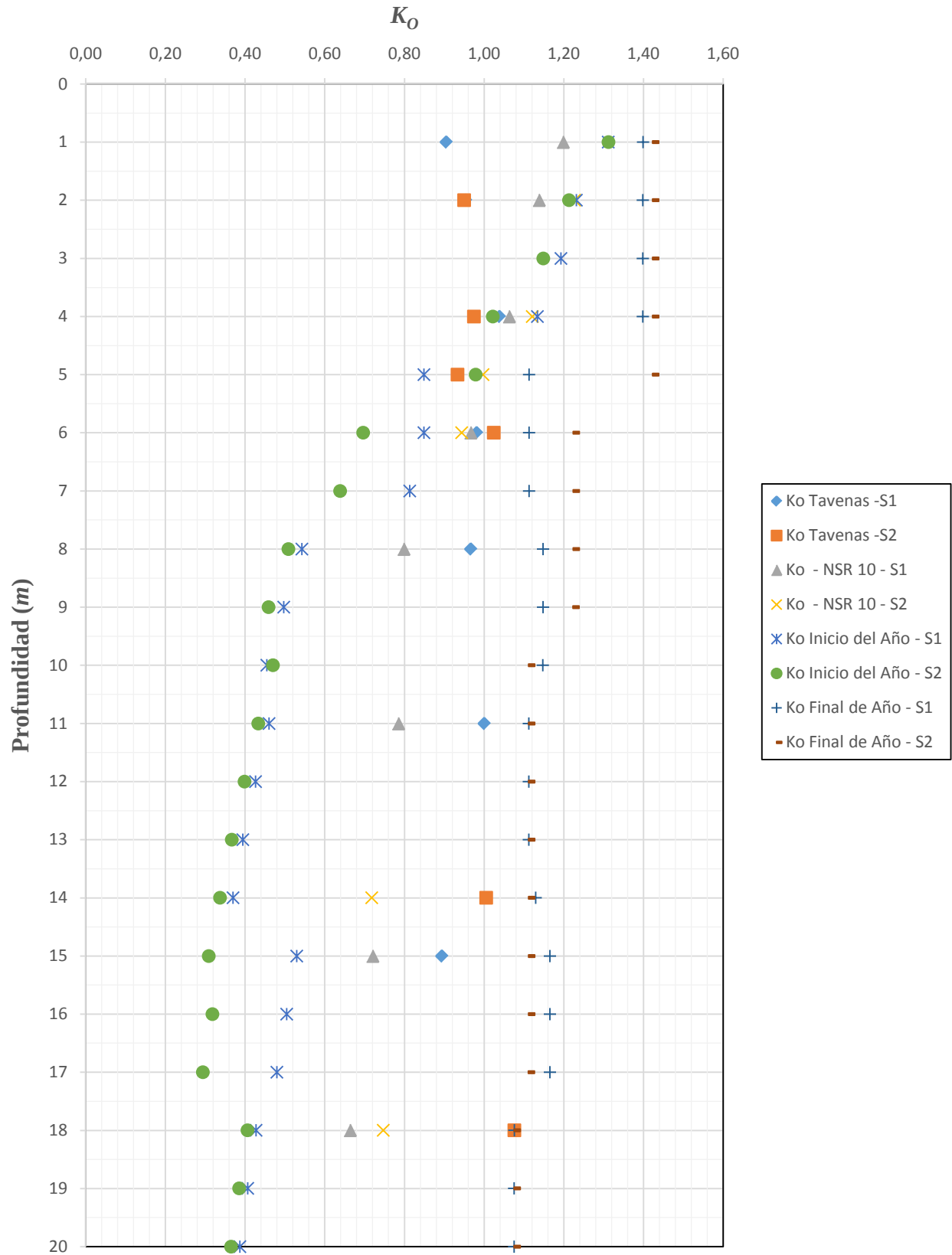


Figura 5- 7. Perfiles de K_o para una arcilla superficial del occidente de la sabana de Bogotá D.C.

6. CONCLUSIONES

Se determinó experimentalmente el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_o para una arcilla del occidente de la sabana de Bogotá en función de otras variables medidas como esfuerzos de preconsolidación efectivos a través de ensayos de consolidación unidimensional y succión matricial a partir de las curvas de retención de agua.

Los esfuerzos de preconsolidación hallados dejan entrever un suelo que se comporta de manera sobreconsolidada a lo largo del perfil de estudio, esto era de esperarse, dadas las condiciones de depósito lacustre, y las cargas que ha soportado el suelo a lo largo de su historia geológica. Sin embargo luego de los 20.00 metros de profundidad el suelo empieza a comportarse de la forma Normalmente consolidado.

Conocer magnitudes como las de succión matricial en una masa de suelo a determinada profundidad permitió definir el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_o de una manera más acertada a comparación de las otras expresiones aplicadas durante la investigación, ya que involucra variables físicas y geomecánicas determinantes en la masa de suelo, obteniendo así valores de K_o para el occidente de la sabana de Bogotá de 1.31 a 1.02 en los primeros metros del perfil de suelo estudiado. Lo cual hace entre ver que el esfuerzo horizontal en las primeras capas superficiales es mayor al vertical, esto se debe a que el suelo está afectado seriamente por el fenómeno de la desecación y por la succión a la que se ve sometida constantemente, bajo los cambios de temperatura y condiciones ambientales a las que se ve expuesto el suelo, entre otros factores como exploración del subsuelo para la explotación de

pozos de agua. Posteriormente K_o toma un comportamiento como el descrito en la bibliografía consultada en el cual su valor se reduce significativamente a lo largo del perfil explorado; esto como consecuencia de la disminución de la succión presente en el suelo y de la profundidad de agrietamiento que experimenta el mismo, alcanzando valores al final de la exploración de 0.39 y 0.36 para el sondeo uno y dos respectivamente. Valores que hasta la fecha habían sido desconocidos.

La succión matricial en función de las curvas de retención de agua, me permiten de manera adicional calcular un K_o teniendo en cuenta dos periodos del año asumiendo condiciones estacionarias de invierno (inicial) y verano (final). Mostrando que para las condiciones finales K_o aumenta hasta 1.42 en los primeros metros y se mantiene sobre la unidad hasta 1.08 para ambos sondeos a 20 metros de profundidad; lo cual implica que a tasas de succión mayor a 100000 kPa el esfuerzo horizontal primaria sobre el vertical, lo que ocasionaría serios daños en el pavimento de la vía existente y de sus transeúntes

Se han determinado a la fecha gran cantidad de modelos y expresiones para definir K_o a lo largo de un perfil estratigráfico de suelo, durante la presente investigación se han dado a conocer varios de ellos, sin embargo con base a la información bibliográfica recopilada es posible que varios de estos modelos puedan ser más versátiles, por ejemplo el de NSR (10), donde a partir de solo dos ángulos de resistencia al corte (o fricción interna) (ϕ') se determinaron valores de K_o para todo el perfil del suelo, a pesar del uso de otra variable en juego como lo fue la RSC. Sin embargo esta fue una aproximación que se quiso mostrar a las ya mencionadas en el marco teórico, y que lo deja en desventaja frente a la expresión que involucra succión matricial. No

obstante deja abierta la posibilidad para futuras investigaciones de hallar el ángulo de resistencia al corte (o fricción interna) bien sea a partir de ensayos de corte directo o ensayos triaxiales, para así determinar K_o usando la expresión de la NSR 10 en función de las RSC halladas en la presente investigación.

Con base a los resultados experimentales se puede decir que K_o disminuye con la profundidad para todas las expresiones aplicadas, excepto para la aplicada por Tavenas la cual muestra un comportamiento de K_o a lo largo del perfil entre 0.89y 1.04 para el sondeo 1 y de 0.93 a 1.08 para el sondeo 2. Resultados que comparados por los hallados por Suarez y Suarez (2005) bajo este mismo método muestran un comportamiento similar, donde los valores de K_o toman valores adimensionales entre 0.7 y 1.11 y no comprenden una trayectoria definida; es decir no definen un comportamiento como si lo presenta la expresión en función de la succión matricial. La influencia de factores como la humedad es determinante; ya que es una de las propiedades del suelo más afectadasPor las condiciones climáticas de la zona, a las cuales se ve sometido el suelo a lo largo del año.

Los cambios drásticos que sufre el suelo en los primeros cinco metros de profundidad, afectado por las condiciones climáticas de la zona son determinantes en el comportamiento físico mecánico del material, generando agrietamientos (anexo IV) que afectan directamente la fábrica del suelo, a su vez generando cambios volumétricos y desconocimiento de su verdadero comportamiento ante determinadas situaciones.

En depósitos superficiales de arcilla como el encontrado en el occidente de la sabana de Bogotá las variaciones del contenido de humedad y de esfuerzos dependen del tipo de cubrimiento que posean, para el presente caso de estudio, su recubrimiento (césped) era insuficiente (menor a dos metros) a eso se le suma la presencia a un costado de la vía de árboles (pinos) y una pobre capa de asfalto (anexo IV) que junto a otros elementos pueden acelerar o disminuir la influencia del clima sobre el contenido de humedad presente en el terreno; por ende sobre la condición de esfuerzos.

Los valores de K_o obtenidos experimentalmente para el suelo del occidente de la sabana de Bogotá quedan como una gran base para el desarrollo de futuras investigaciones como modelaciones a partir de métodos finitos, así como el estudio del comportamiento de otras variables que pueden ser de gran importancia para la mecánica de suelos parcialmente saturada.

La aplicación de modelos en función de fenómenos cuantificables como la succión y a su vez la generación de expresiones a partir de esta que permitan hallar propiedades importantes del suelo, consolidan una nueva forma de interpretación del comportamiento de los suelos parcialmente saturados, que requiere otro tipo de análisis a diferencia del ofrecido por la mecánica de suelos tradicional, en donde se deben buscar formas válidas y aplicables para explicar fenómenos interesantes de abordar para la nueva ingeniería civil.

7. REFERENCIAS

- Abdelhamid, M. S. and Krizek, R. J. (1976). At-rest lateral earth pressure of consolidating clay .
J. Geotech. Engrg. Div, (102) (7), 721-738.
- Alpan, I. (1967). The empirical evaluation of the coefficient K_o and K_oR . *Soils and Foundations*,
(7) (1), 31-40.
- Andrawes, K.Z., and El-Sohby , M.A. (1973). Factors Affecting K_o . *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, (99) (7), 527-539.
- Bishop, A.W. (1958). Test Requirements for Measuring the Coefficient of Earth Pressure at rest,
Proceedings. Brussels Conference on Earth Pressure Problems. Brussels, (1), 2-14.
- Bowles, J.E. (1997). *Foundation Analysis And Design*, 5ed. EE.UU. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Brooker, E. W. and Ireland, H. O. (1965). Earth pressure at rest related to stress history , Can.
Geotech. J, (2)(1), 1-15.
- Braja, M. D.(2001). *Fundamentos de ingenieria geotécnica*. California, Estados Unidos: Thomson Editores, S.A.
- Buckingham E. (1907). *Studies of movement of soil moisture*. 1907, USDA Bureau of soils, Bulletin 38.
- Casagrande, A. (1936). The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proc. Ist. Int. Conf. Soil.Mech.Found.Eng*, (60).

- Coulomb, C. A. (1776). Essais sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. *Memoires de l'Academie Roy ale pres Divers Savants*, (7).
- Dineen, K. (2000). *The role of suction in the assessment of in-situ stress and desiccation*. London. Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial College. Pp 45.
- Dineen, K. (1997). *Ph. D. thesis The influence of soil suction on compressibility and swelling*. London Imperial College. London, England.
- Federico, A. Elia, G. and Germano, V. (2008). A short note on the earth pressure and mobilized angle of internal friction in one-dimensional compression of soil. *Journal of GeoEngineering*, (3) (1), 41-46.
- Fredlund, D. (1994). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey, United States: John Wiley y Sons.
- Fredlund, D. G. Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey, United States: John Wiley y Sons.
- Fleureau, J.M. et al. *Behavior of clayed soils on drying-wetting paths*. 1992. *Can. Geotech. J.* Vol 30. pp 287-296.
- Hans, G. (2006). *Excavations and Foundations in Soft Soils*. Berlin, Germany : Krips bv, Meppel.
- Instituto Colombiano de Geología y minería Ingeominas (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá D.C.* Bogotá Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras- I.N.V.E 151-07*. Bogotá, Colombia.
- Jaky, J. (1948). State of stress at rest. *J. society of Hungarian Architects and Engineers*, 355-358.

- Kalman, E. (2012), Determination of the coefficient of earth pressure at rest *in situ* in overconsolidated clay . *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 59(1), 71-83.
- Kenney , T. C. (1959). Discussion on Proc. Paper 1732 (Wu, 1958), Proc. ASCE, (85) (3), 67-79.
- Lambe, T and Whitman, R. *Mecánica de suelos*. 2 ed. México D.F: Limusa. 582 pp.
- Lu, N. and Likos, J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. New Jersey , United States: Jhon Wiley y Sons.
- Martínez, J. W. y Rodríguez, J. A. (2003). *Evaluación Del Coeficiente De Presión De Tierras En Reposo K_o , Para Una Arcilla Superficial De La Sabana De Bogotá*. Universidad Nacional, Bogotá Colombia.
- Massarsch, K. R. (1979). Lateral earth pressure in normally consolidated clay s. *ICSMFE*, (7) (2), 245-249.
- May ne, P. W. and Kulhawy , F. H. (1982). K_o -OCR realtionships in soil. *J. Geotecj*, (108) (6), 851-872.
- Mitchell, J. K. (1992). *Fundamentals of Soils Behaviour*. Jhon Wiley and Sons.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo-Resistente NSR-10, Título H*, Bogotá, Colombia: Panamerican Editorial Ltda.
- Nieto, C. (2007). Medición del coeficiente de presión de tierras en reposo " K_o ", por medio del consolidómetro de Rowe modificado. *Revista Épsilon*, (8), 45-55.
- Pineda, J. A. (2003). *Investigación experimental sobre el comportamiento volumétrico en una arcilla de sabana de Bogotá en proceso de secado*. Departamento Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

- Pineda, J. A (2004). *Influencia de la succión sobre la resistencia al corte de un suelo compactado*. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Radoslaw, L. and Michalowski, F. (2005), Coefficient of Earth pressure at Rest, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (131) (11), 1429-1433.
- Rankine, W. J. (1857). On the stability of loose earth philos. *Trans. R. Soc. London*, (147), 9-27.
- Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) (2010), *Título H – Estudios Geotécnicos. H-6.4.3*.
- Ridley, A. M. and Wray, W. K. (1996). Suction Measurement. *A review of Current Theory and practices*, (3), 1293-1322.
- Rivera, S.A y Rojas L.M. (2014). *Caracterización avanzada de arcillas*. Universidad Santo Tomás. Colombia.
- Rowe, P. W. (1957). hypothesis for normally loaded clays at equilibrium. *Proc. 4th ICSMFE, London*, 189-192.
- Schmidt, B. (1967). Discussion on Earth Pressure. *Can. Geotech. J.*, (3), 239-242.
- Skempton. A. W., *The Colloidal "Activity" of clays*. 1953. Universidad de Londres. Inglaterra
- Skempton. A. (1954) *The pore pressure coefficients A and B. Geotechnique*, Vol. 4. p. 143 147.
- Skempton, A. W. *Horizontal stresses in an over-consolidated Eocene clay*. Paris. 1961. Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. p. 351-357.
- Suarez, D. y Suarez, F. A. (2005). *Determinación Del Valor Del Coeficiente De Presión De Tierras En Reposo K_o , Para Una Arcilla Superficial De La Sabana De Bogotá, Mediante Ensayos De Consolidación Unidimensional*. Uniagraria, Bogotá. Colombia.

- Swarbrick., G. E. (1995). *Measurement of Soil Suction Using the Filter Paper Method*. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils. Paper 246, pp 1-6.
- Teerachaikulpanich, N. Satoshi, O. Kazuaki, M and Hideki, O.(2007). Estimation of coefficient of earth pressure at rest using modified oedometer test. *Japanese Geotechnical Society* , (47) (2), 349-360.
- Terzaghi, K. (1925). Old Earth Pressure Theories and New Test Results.*Engineering New Record*, (85), 632.
- Tavenas, F. A. (1975). In-situ measurement of initial stresses and deformation characteristics.*Proc, In-Situ Measurement of soil properties, ASCE*, (2), 263-270.
- Vaca, N. Jy Martínez, J. F. (2005). *Determinación del Coeficiente K_o , Para Una Arcilla Superficial De Uniagraria Utilizando Succión Matricial*. Uniagraria, Bogotá, Colombia.
- Suarez, D. y Suarez, F. A. (2005). *Determinación Del Valor Del Coeficiente De Presión De Tierras En Reposo K_o , Para Una Arcilla Superficial De La Sabana De Bogotá, Mediante Ensayos De Consolidación Unidimensional*. Uniagraria, Bogotá. Colombia.
- Teerachaikulpanich, N. Satoshi, O. Kazuaki, M and Hideki, O.(2007). Estimation of coefficient of earth pressure at rest using modified oedometer test. *Japanese Geotechnical Society* , (47) (2), 349-360.
- Terzaghi, K. (1925). Old Earth Pressure Theories and New Test Results.*Engineering New Record*, (85), 632.
- Tavenas, F. A. (1975). In-situ measurement of initial stresses and deformation characteristics.*Proc, In-Situ Measurement of soil properties, ASCE*, (2), 263-270.
- Vaca, N. Jy Martínez, J. F. (2005). *Determinación del Coeficiente K_o , Para Una Arcilla Superficial De Uniagraria Utilizando Succión Matricial*. Uniagraria, Bogotá, Colombia.

8. ANEXO I

DESARROLLO MATEMÁTICO DE ECUACIONES

APÉNDICE A

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DE POROS DEBIDO A LA APLICACIÓN DE CARGAS

INCREMENTOS EN LA PRESIÓN DE POROS

Para Martínez y Rodríguez (2003), si se tiene un elemento diferencial de suelo bajo una condición no drenada, los esfuerzos efectivos son los que controlan la resistencia y el cambio volumétrico de la masa arcillosa como se muestra en la Figura A.I.1.a. En el momento en que se aplican cargas externas sobre la masa de suelo, se presentan unos incrementos en las condiciones iniciales de esfuerzos actuantes (Figura A.I.1.b), generando deformaciones en la muestra.

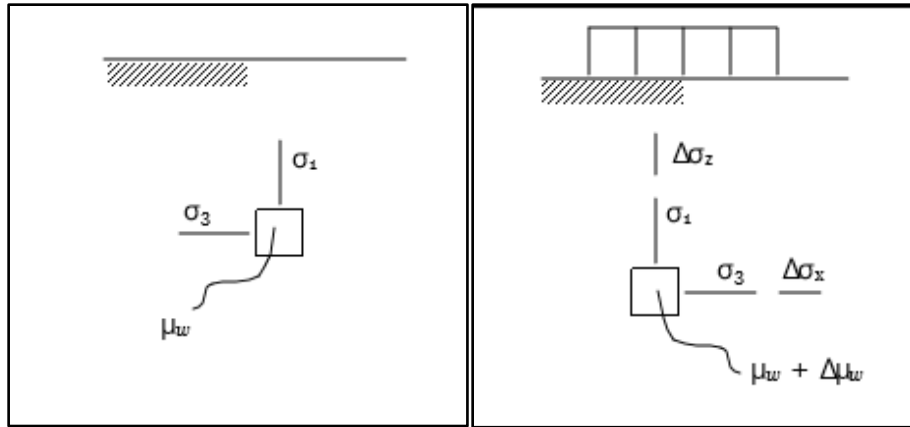


Figura A.I.1.a.y A.I.1.b. Comportamiento del Esfuerzo “in.situ” al aplicar cargas externas. Fuente: Martínez y Rodríguez. (2003).

Al referenciar un elemento infinitesimal del suelo en unos ejes coordenados, obtenemos los incrementos de los esfuerzos en los planos principales como lo indica la (Figura A.I.2).

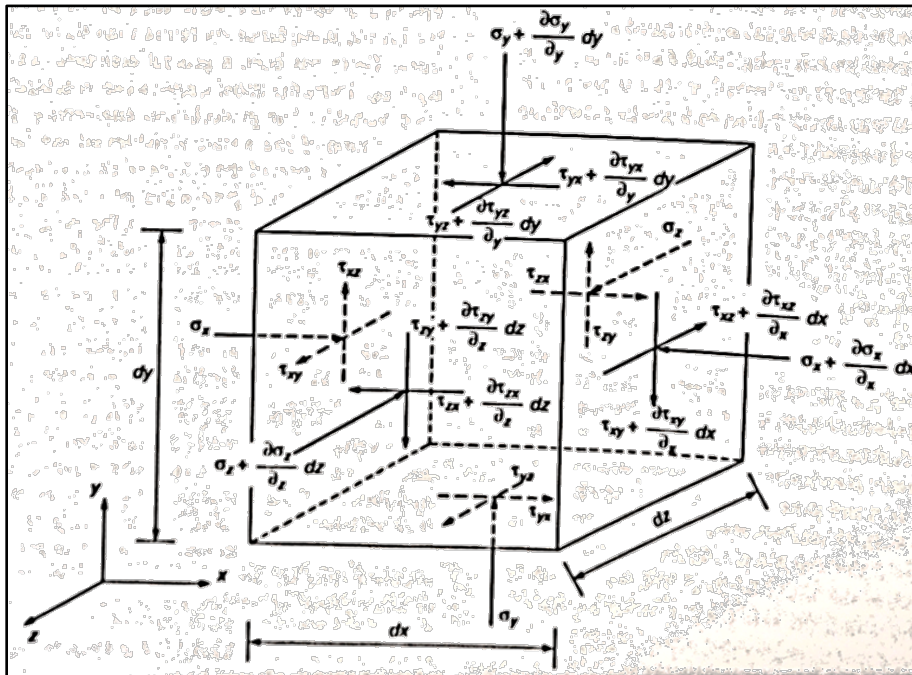


Figura A.I.2. Incrementos de los esfuerzos en los planos principales. (Tomado de Fredlund *et al.* 2011).

Estos Incrementos de esfuerzo, trae consigo una variación del volumen con respecto al volumen inicial, denominado cambio volumétrico; que es producido por deformaciones unitarias en dirección de los planos principales. (Martínez y Rodríguez 2003) (Ecuación A.I.1).

$$(A.I.1) \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Teniendo en cuenta la ecuación (A.I.1), a través de la teoría elástica, se pueden expresar las deformaciones unitarias (ecuaciones A.I.2a, A.I.2b, A.I.2c) en términos del módulo de Young (E), módulo de poisson, y los incrementos de los esfuerzos efectivos en los planos principales.

$$(A.I.2a) \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma'_1 - \nu(\Delta\sigma'_2 + \Delta\sigma'_3)]$$

$$(A.I.2b) \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma'_2 - \nu(\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_3)]$$

$$(A.I.2c) \varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma'_3 - \nu(\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_2)]$$

Reemplazando las definiciones de deformaciones unitarias en los planos principales, en la definición de cambio volumétrico, da como resultado la ecuación (A.I – 3) que define la variación de volumen en términos de los esfuerzos principales.

$$(A.I.3) \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1 - 2\nu}{E} [\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_2 + \Delta\sigma'_3]$$

Que reorganizando puede representarse,

$$(A.I.4) \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{3(1 - 2\nu)}{E} \left[\frac{\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_2 + \Delta\sigma'_3}{3} \right]$$

Simplificando la expresión mediante el coeficiente de compresibilidad del esqueleto mineral (C_{sk}),

$$C_{sk} = \frac{3(1 - 2\nu)}{E}$$

Obteniendo como resultado la ecuación (A.I.5):

$$(A.I.5) \frac{\Delta V}{V_o} = C_{sk} \left[\frac{\Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3}{3} \right]$$

Si consideramos un suelos saturado (S=100%) tenemos que $\Delta V = \Delta V_w$. A su vez basándonos en las definiciones de porosidad inicial (η_o) y la variación del volumen de agua presente en la muestra, y con base en el coeficiente de compresibilidad del agua (ecuación A.I.6) se obtiene:

$$\eta_o = \frac{V_v}{V_w} = \frac{V_w}{V_v} = V_o = \frac{V_w}{\eta_o}$$

$$(A.I.6) \frac{\Delta V_w}{\eta_o} = C_w * \Delta u_w$$

Podemos afirmar que:

$$(A.I.7) \frac{\Delta V}{V_w} = \frac{\Delta V_w}{V_w} * \eta_o$$

Reemplazando la ecuación (A.I.6) en la (A.I.7), se obtiene una expresión para el cambio volumétrico en función del coeficiente de compresibilidad del agua y la variación de presión de poros (ecuación A.I.8).

$$(A.I.8) \frac{\Delta V}{V_o} = C_w * \Delta u_w * \eta_o$$

Teniendo la anterior expresión y conociendo la definición de los esfuerzos efectivos;

$$\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u_w$$

$$\Delta\sigma'_2 = \Delta\sigma_2 - \Delta u_w$$

$$\Delta\sigma'_3 = \Delta\sigma_3 - \Delta u_w$$

Reemplazando las anteriores definiciones en la ecuación (A.1.5), e igualando con (A.I.8). Se obtiene la ecuación (A.1.9) que se desarrolla matemáticamente así:

$$C_w * \Delta u_w * \eta_o = C_{sk} \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} - u_w \right]$$

$$C_w * \Delta u_w * \eta_o + u_w * C_{sk} = C_{sk} \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u_w (C_w * \eta_o * C_{sk}) = C_{sk} \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u_w = \frac{C_{sk}}{C_{sk} * \eta_o * C_{sk}} \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

$$(A.I.9) \Delta u_w = \frac{1}{\eta_o \frac{C_w}{C_{sk}} + 1} \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

De nuevo se simplifica la ecuación (A.I.9) por medio del parámetro B, obteniendo una ecuación (A.I.10) la cual describe la variación de la presión de poros con respecto a los incrementos sucedidos en los esfuerzos totales de planos principales.

$$(A.I.10) \Delta u_w = B \left[\frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} \right]$$

Es de esta manera como queda indicado o descrito el incremento en la presión de poros que se presenta inmediatamente después de colocar cargas externas, es decir; antes de que se inicie el proceso de expulsión de agua.

COMPRESIÓN AXIAL

En primera medida se supone el caso en el que el suelo gana humedad, de esta manera se considera que la variación de esfuerzos principales menores (planos 2 y 3) son iguales, por lo tanto se genera una compresión axial (Figura A.I.3).

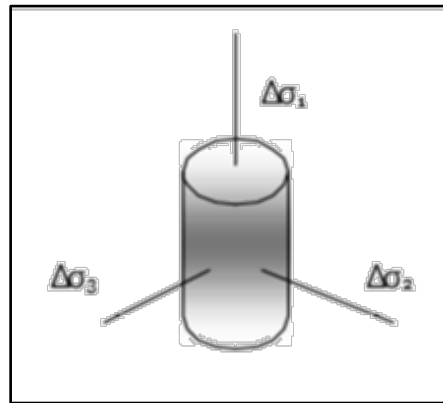


Figura A.I.3. Diferencial de masa arcillosa sometido a compresión axial. Tomado de (Martínez y Rodríguez, 2003).

Reemplazamos en la ecuación (A.I.10) obtenemos la ecuación (A.I.11):

$$\Delta u_w = B \left[\frac{\Delta \sigma_1 + 2\Delta \sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u_w = B \left[\frac{\Delta \sigma_1 + 3\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_3}{3} \right]$$

$$(A.I.11) \Delta u_w = B \left[\Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right]$$

A partir de la ecuación (A.I.11) se obtiene la expresión (teniendo en cuenta el caso de compresión axial) que determina la variación en la presión de poros mediante un parámetro de presión de poros en la compresión de Skempton $A_c = 1/3$, de la siguiente manera:

$$(A.I.12) \Delta u_w = B [\Delta \sigma_3 + A_c (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

EXTENSIÓN AXIAL

Por otro lado, si se considera que el diferencial del suelo pierde humedad, se tiene que la variación de los planos principales mayores es igual ($\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_2$), generando una extensión axial. (Figura A.I.4).

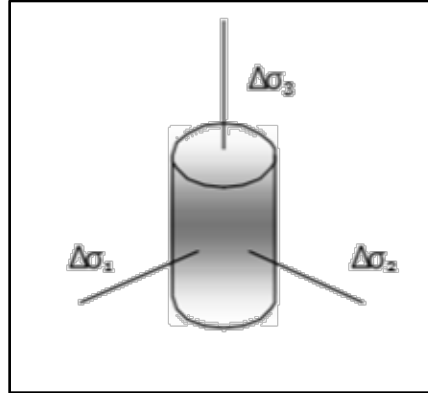


Figura A.I.4. Diferencial de la masa arcillosa sometido a extensión axial. Tomado de (Martínez y Rodríguez, 2003)

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se realiza el respectivo desarrollo matemático así:

$$\Delta u_w = B \left[\frac{2\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u_w = B \left[\frac{2\Delta\sigma_1 + 3\Delta\sigma_3 - 2\Delta\sigma_3}{3} \right]$$

$$(A.I.13) \Delta u_w = B \left[\Delta\sigma_3 + \frac{2}{3}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right]$$

De la misma manera como que en el desarrollo realizado para la compresión axial, se llega a la ecuación (A.I.13) que define la variación de la presión de poros, pero con un parámetro de presión de poros en extensión $A_{ext} = 2/3$, así:

$$(A.I.14) \Delta u_w = B[\Delta\sigma_3 + A_{ext}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

APÉNDICE B

SUCCIÓN MATRICIAL Y SU IMPORTANCIA AL DETERMINAR EL ESTADO DE ESFUERZOS “*IN SITU*”.

En la mecánica de suelos, procesos como el de consolidación sobre un horizonte o estratificación de un suelo, pueden arrojar como resultado que los esfuerzos verticales sean mucho mayores que los horizontales, esto traería como consecuencia un valor de K_o menor que uno (1). Más sin embargo la naturaleza a través de sus diferentes tiempos geológicos hacen que el suelo pase por varias clases de fenómenos de humedecimiento y erosión del depósito con el cual se pueden reducir significativamente los esfuerzos verticales. Dichos excesos en los esfuerzos efectivos horizontales, pueden ser almacenados en la masa de suelo y dependiendo de la magnitud de la descargas de los esfuerzos verticales, es posible llegar a tener valor de K_o mayores a uno (1). Esta clase de incrementos pueden llegar a ser medidos en suelos sobreconsolidados y tiene una alta importancia en Ingeniería (Suarez y Suarez, 2005).

Para Martínez y Rodríguez (2003) el estado de esfuerzos “*in – situ*”, puede ser afectado por varios factores como:

- El humedecimiento; que tiende a generar descensos en los esfuerzos horizontales debido a la degradación del material del depósito.
- Las fluctuaciones del nivel freático
- La desecación y la expansión en suelos como los arcillosos son de gran impacto en depósitos de poca profundidad, y a que traen como consecuencia la generación de gran cantidad de agrietamientos en los cuales el esfuerzo efectivo horizontal puede ser reducido a cero (0). Si estos agrietamientos o fisuras se llenan con material derrumbado a su alrededor, una continua expansión del material en estudio puede generar mayores esfuerzos horizontales que provocan una masiva falla del material más cercano.

A su vez plantean que una de las alternativas para determinar los esfuerzos horizontales (usada ampliamente en la ingeniería), es realizar medidas de la variación de la presión de poros en la muestra, simulando situaciones “*in-situ*”. Esto es posible aplicarlo para suelos arcillosos que estén completamente saturados y fácilmente aplicable para arcillas duras sobreconsolidadas.

Para Skempton (1954), los materiales que presenten un comportamiento de acuerdo a la teoría elástica, el cambio en la presión de poros se puede definir como:

$$(B.I. 15) \Delta u_w = B \left[\frac{1}{3} \Delta \sigma_v + 2 \Delta \sigma_h - \Delta \sigma_v \right]$$

Teniendo en cuenta que para Skempton (1954) para suelos saturados, se da un valor de uno (1) para el parámetro de presión de poros B, y el valor del coeficiente A depende en la presente investigación principalmente del proceso que se esté analizando (compresión o extensión axial).

Para desarrollar una expresión que permita obtener el valor de K_o en términos de la succión matricial se tiene en cuenta la situación que puede presentar el terreno como se menciona a continuación:

COMPRESIÓN AXIAL

En primera instancia podemos pensar que el suelo presenta un estado de esfuerzos “in – situ” para el cual K_o > 1, de donde se presentaría la siguiente condición del terreno:

$$\Delta\sigma_h > \Delta\sigma_v$$

Donde después del muestreo se obtendrá:

$$\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_h = -(\Delta\sigma'_v * K_o + u_o)$$

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_v = -(\Delta\sigma'_v + u_o)$$

El presente desarrollo corresponde a compresión axial, donde al existir grandes liberación de esfuerzos horizontales, se producen mayores variaciones en sentido vertical, por lo cual el siguiente desarrollo de la ecuación de Skempton, con un parámetro A_c = 1/3 si nos basamos en las definiciones dadas anteriormente:

$$\Delta u = B \left[\frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A * (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A * (\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h)]$$

$$u_f - u_o = [-(K_o * \Delta\sigma'_v + u_o) + A(-(\Delta\sigma'_v + u_o) + (K_o * \Delta\sigma'_v + u_o))]$$

$$u_f = -K_o * \sigma'_v + A(-\sigma'_v + K_o * \sigma'_v)$$

$$u_f = -K_o * \sigma'_v + A * \sigma'_v (K_o - 1)$$

$$u_f = -\sigma'_v [K_o - A(K_o - 1)]$$

$$K_o = \frac{\frac{(u_f)}{\sigma'_v} - A}{1 - A}$$

$$(B.I. 16) K_o = \frac{\frac{(u_a - u_w)}{\sigma'_v} - A}{1 - A}$$

EXTENSIÓN AXIAL

En un caso contrario, suponiendo un valor de $K_o < 1$, para una situación “*in-situ*” se tendría que

$$\sigma_v > \sigma_h$$

Posteriormente luego del muestreo se obtendría:

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_h = -(K_o * \sigma'_v + u_o)$$

$$\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_v = -(\sigma'_v + u_o)$$

Esto quiere decir; que para este caso, se estaría desarrollando una situación de extensión axial, para la cual se presenta un parámetro de Skempton $A_{ext} = 2/3$ presentado como sigue:

$$\Delta u = B \left[\frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} \right]$$

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A * (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A * (\Delta \sigma_h - \Delta \sigma_v)]$$

$$u_f - u_o = [-(\sigma'_v + u_o) + A(-(K_o * \sigma'_v + u_o) + (\sigma'_v + u_o))]$$

$$u_f = -\sigma'_v + A(-K_o * \sigma'_v + \sigma'_v)$$

$$u_f = -\sigma'_v - A * \sigma'_v (K_o - 1)$$

$$u_f = -\sigma'_v [1 + A (K_o - 1)]$$

$$K_o = \frac{\frac{-(u_f)}{\sigma'_v} - 1}{A} + 1$$

$$(B.I. 17) K_o = \frac{\frac{(u_a - u_w)}{\sigma'_v} + A - 1}{A}$$

Lo anterior muestra que el coeficiente de presión de tierras en reposo puede ser expresado o definido en términos de la succión matricial medida en una muestra de suelo.

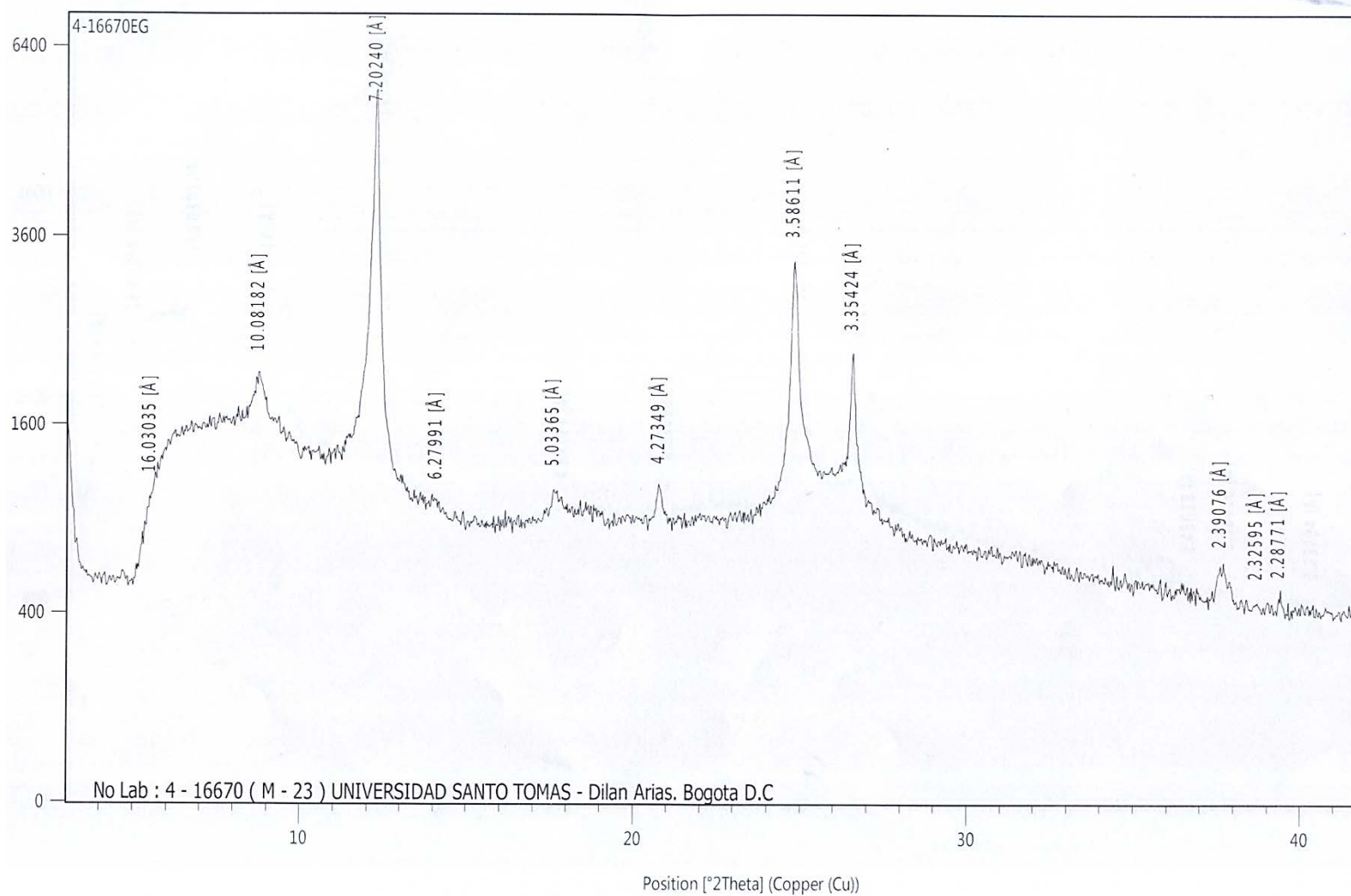
9. ANEXO II

RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN COMPOSICIONAL

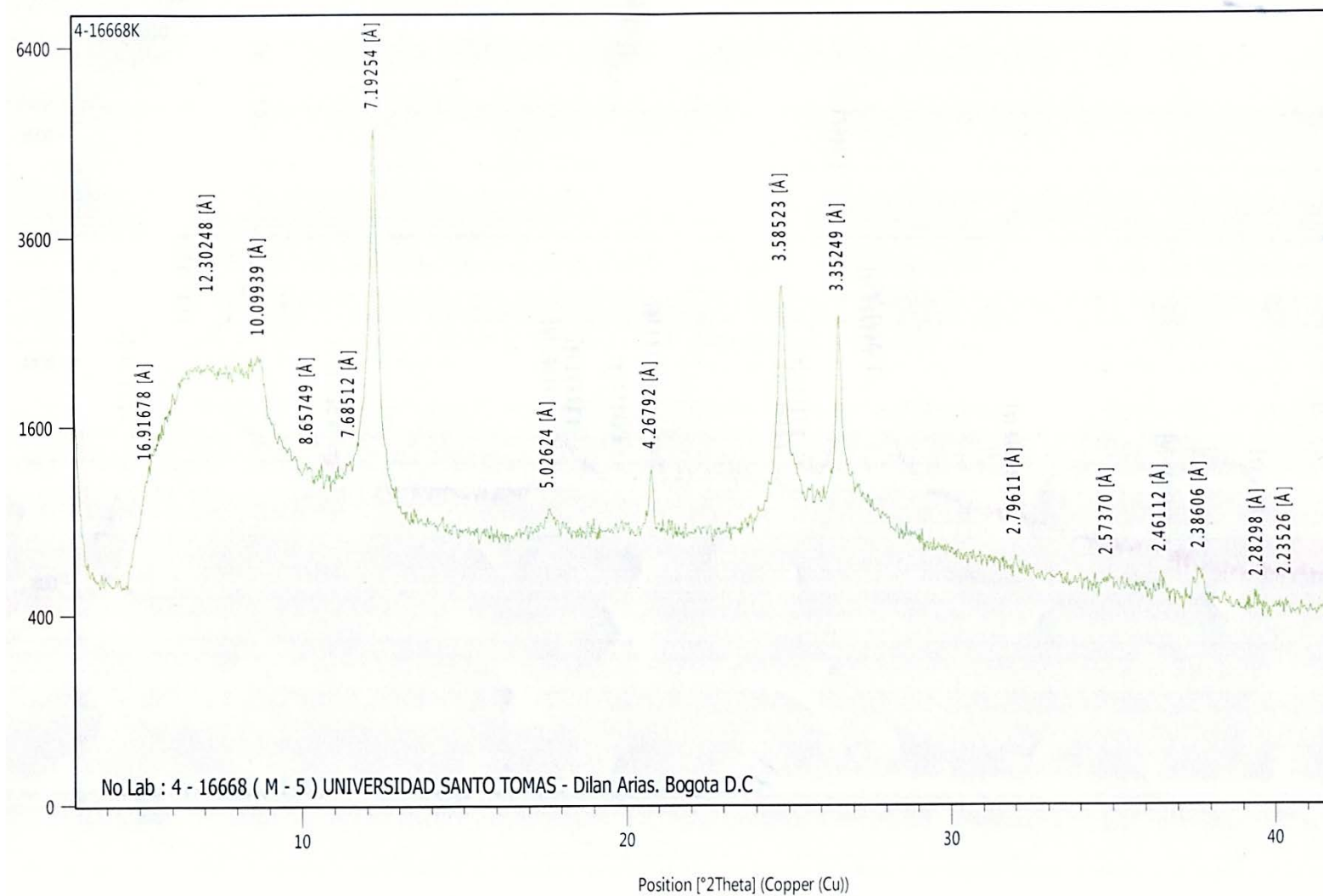
DIFRÁCTOMETRIA DE RAY OS X CON DIFRACTOGRAMAS

03/12/2016

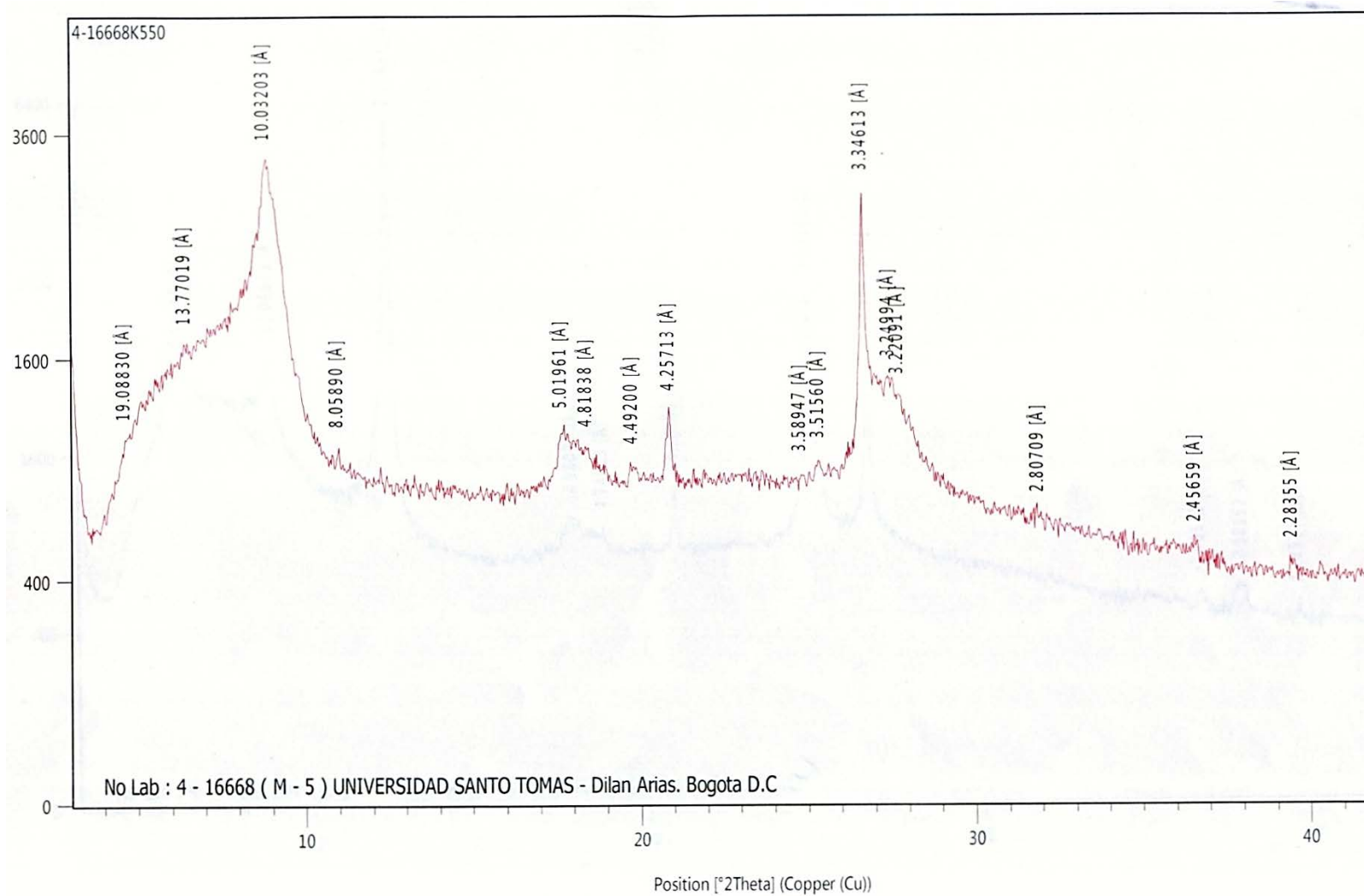
M-5 SONDEO 2



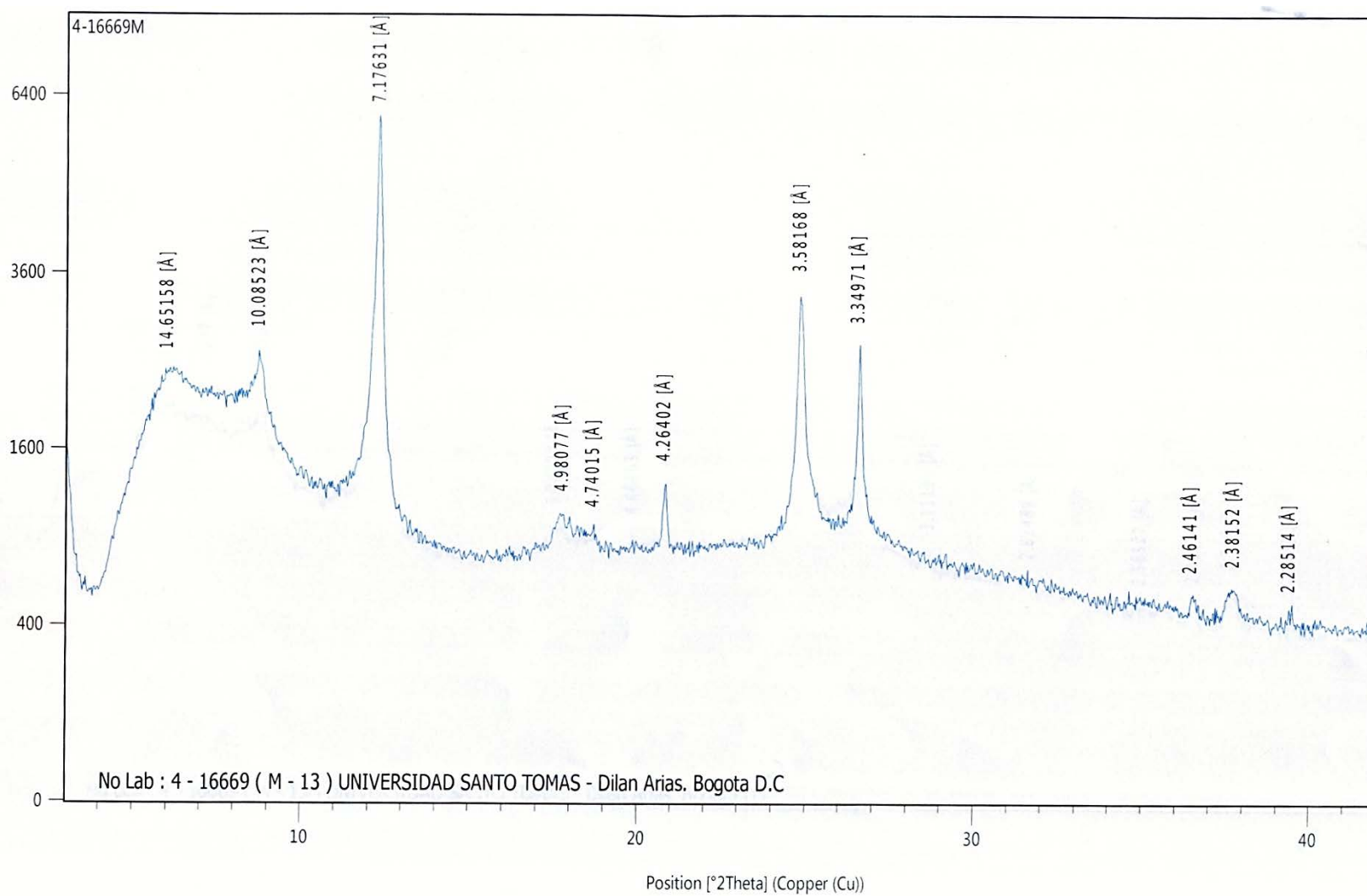
M-5 SONDEO 2



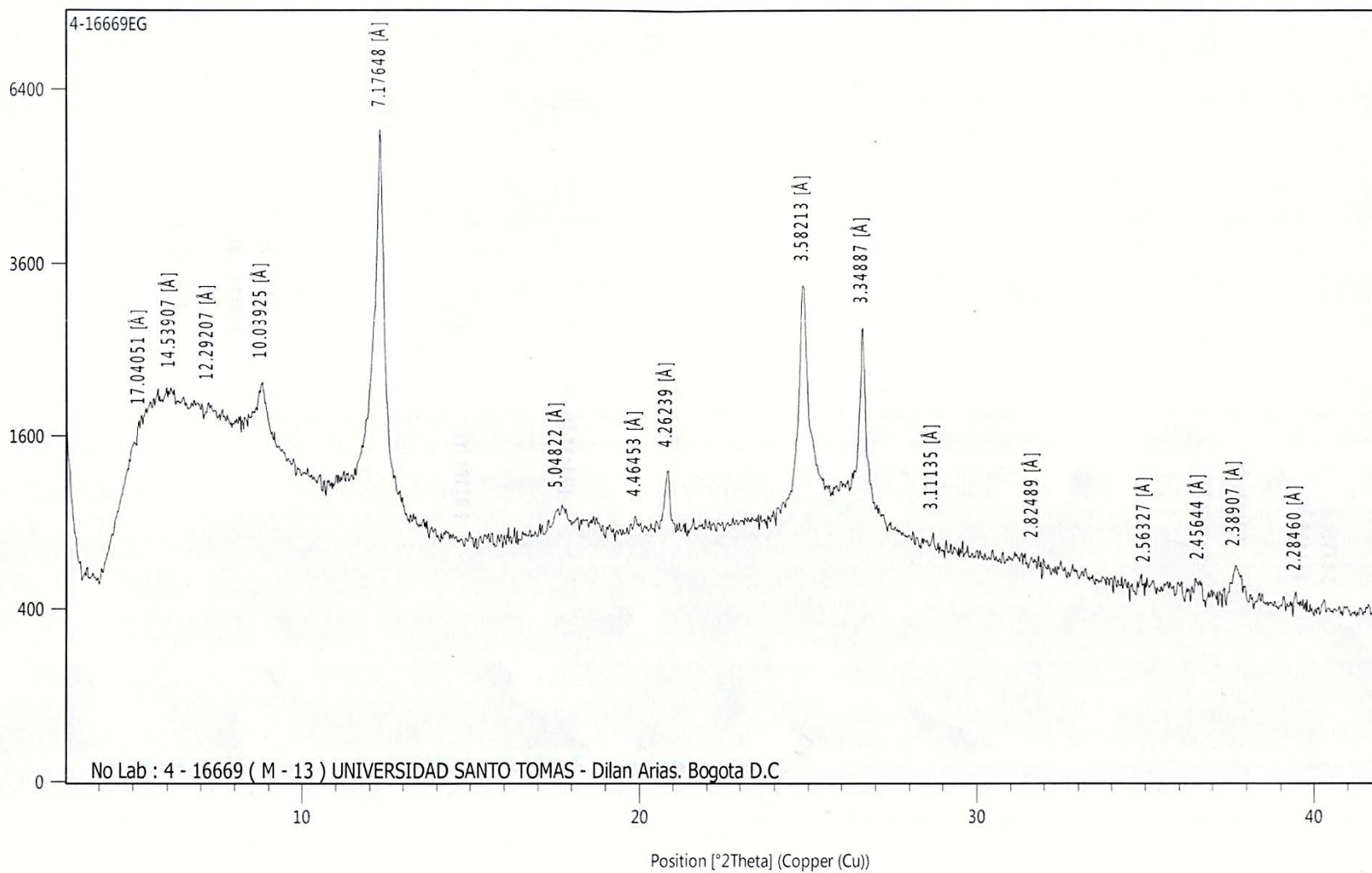
M-5 SONDEO 2



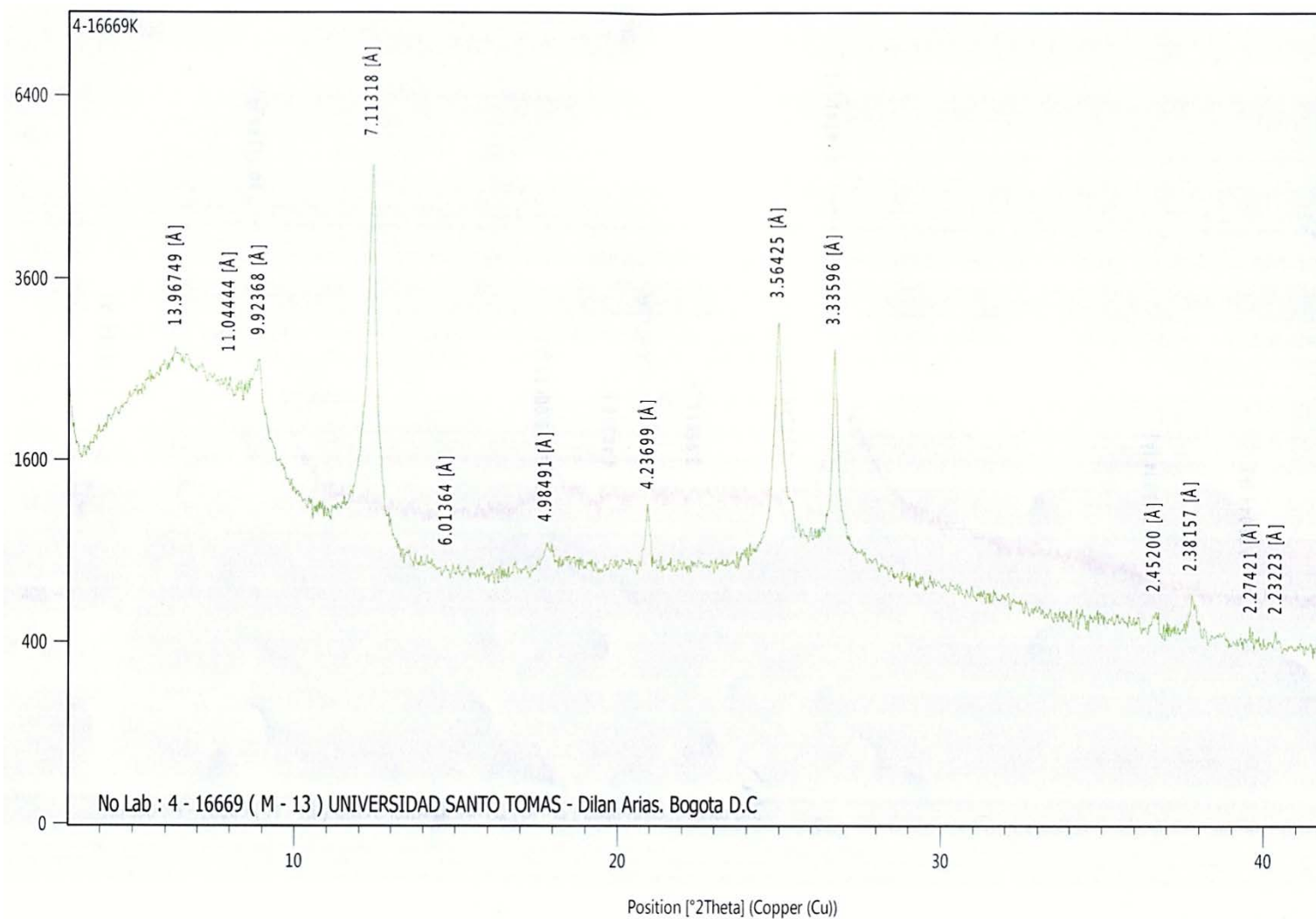
M-13 SONDEO 2



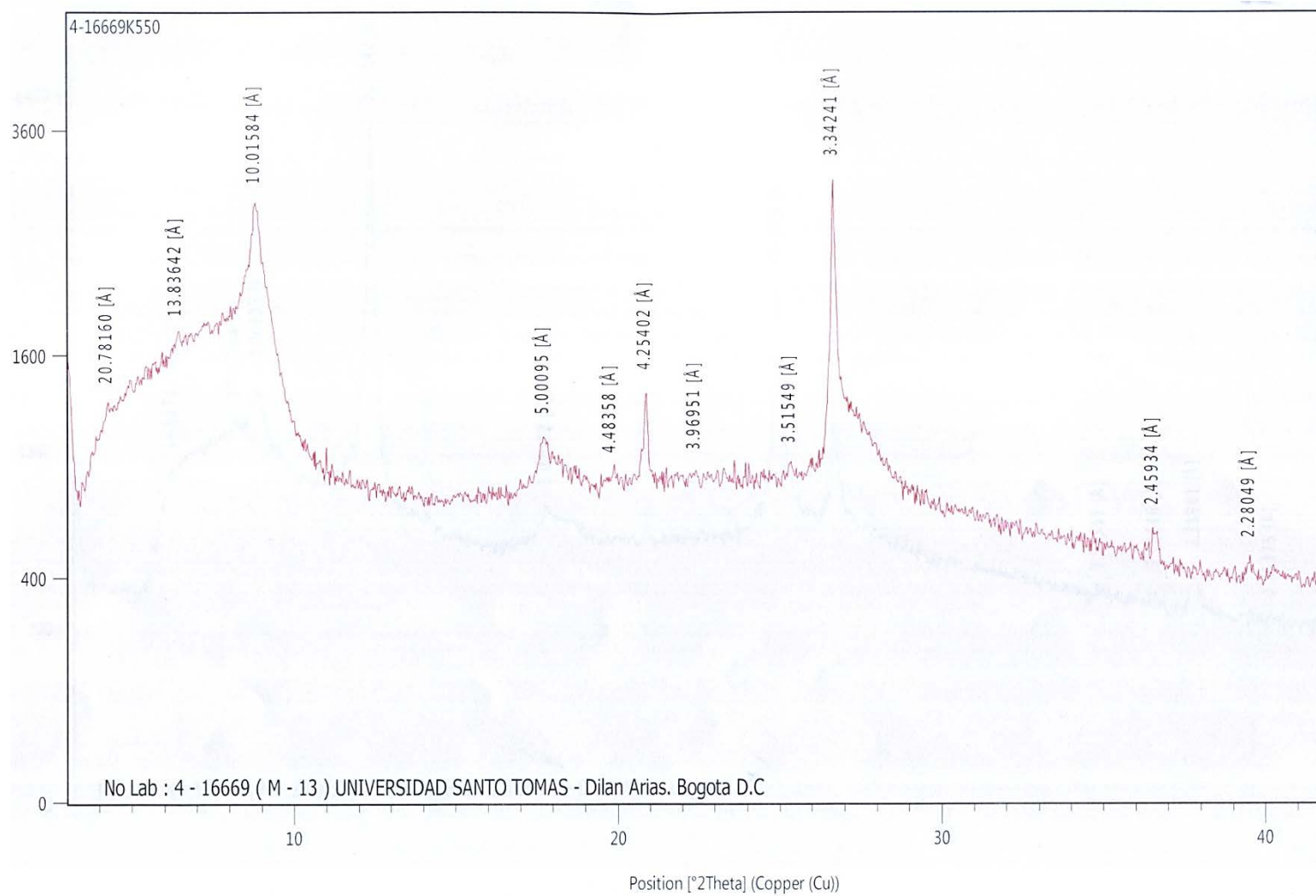
M-13 SONDEO 2

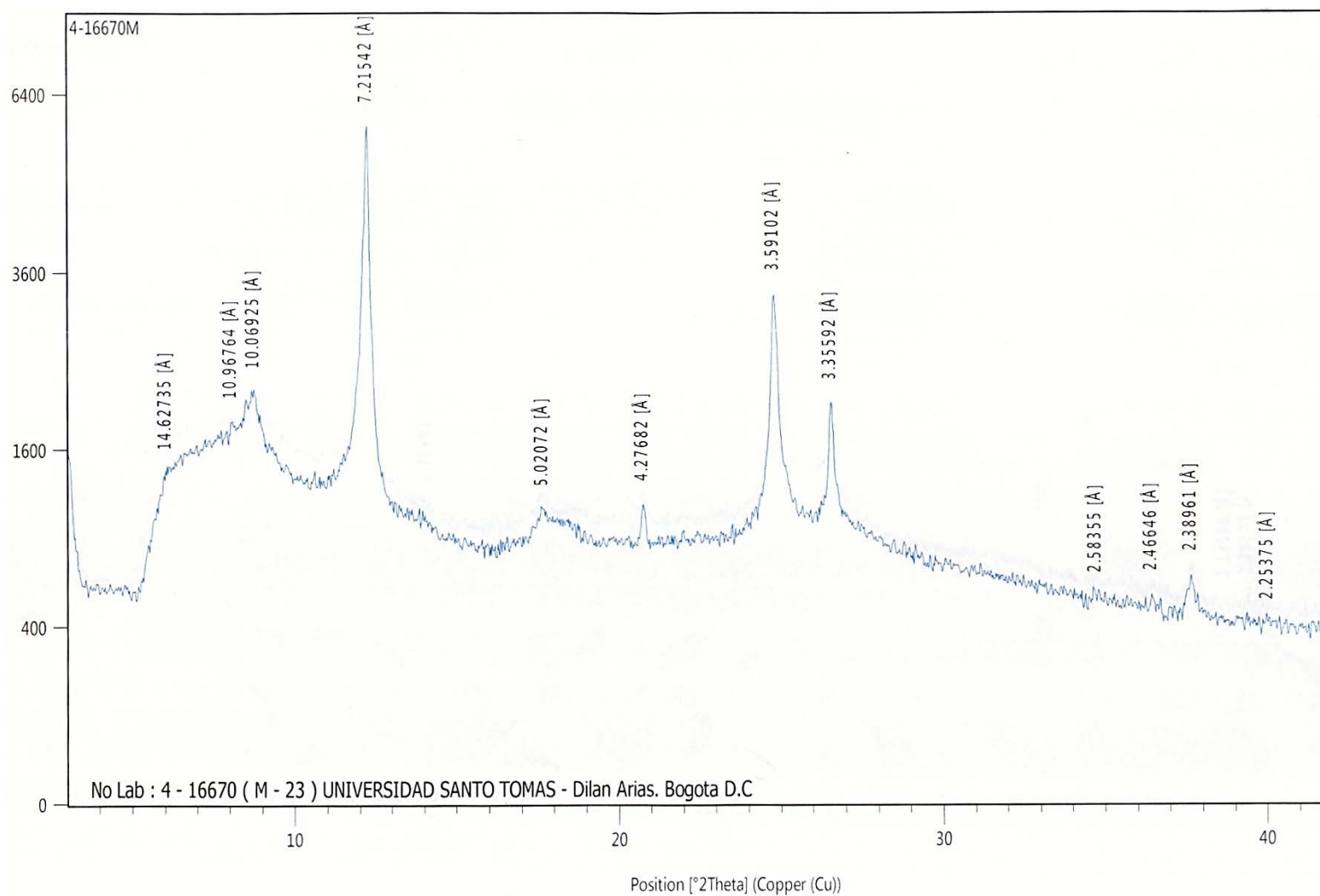


M-13 SONDEO 2

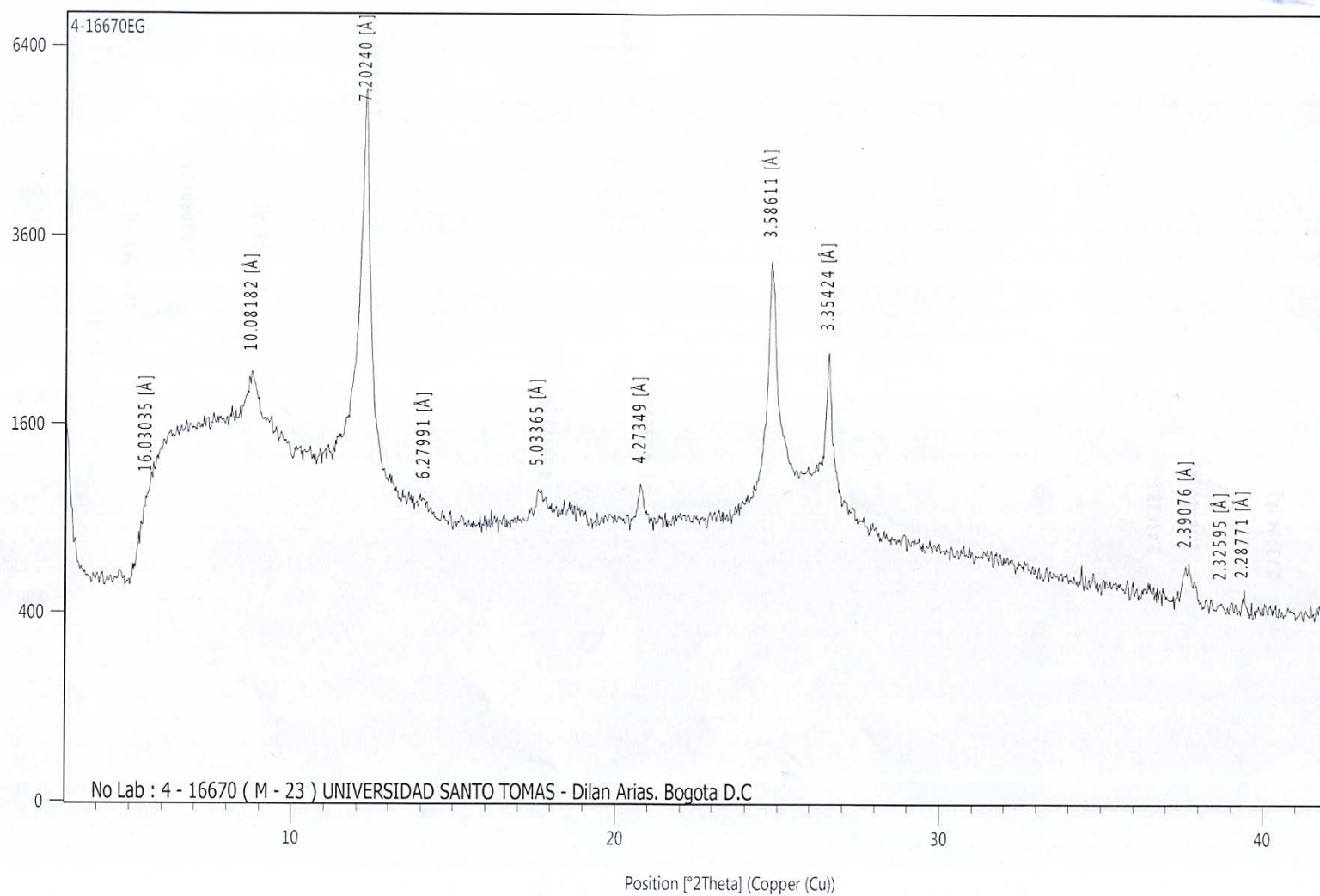


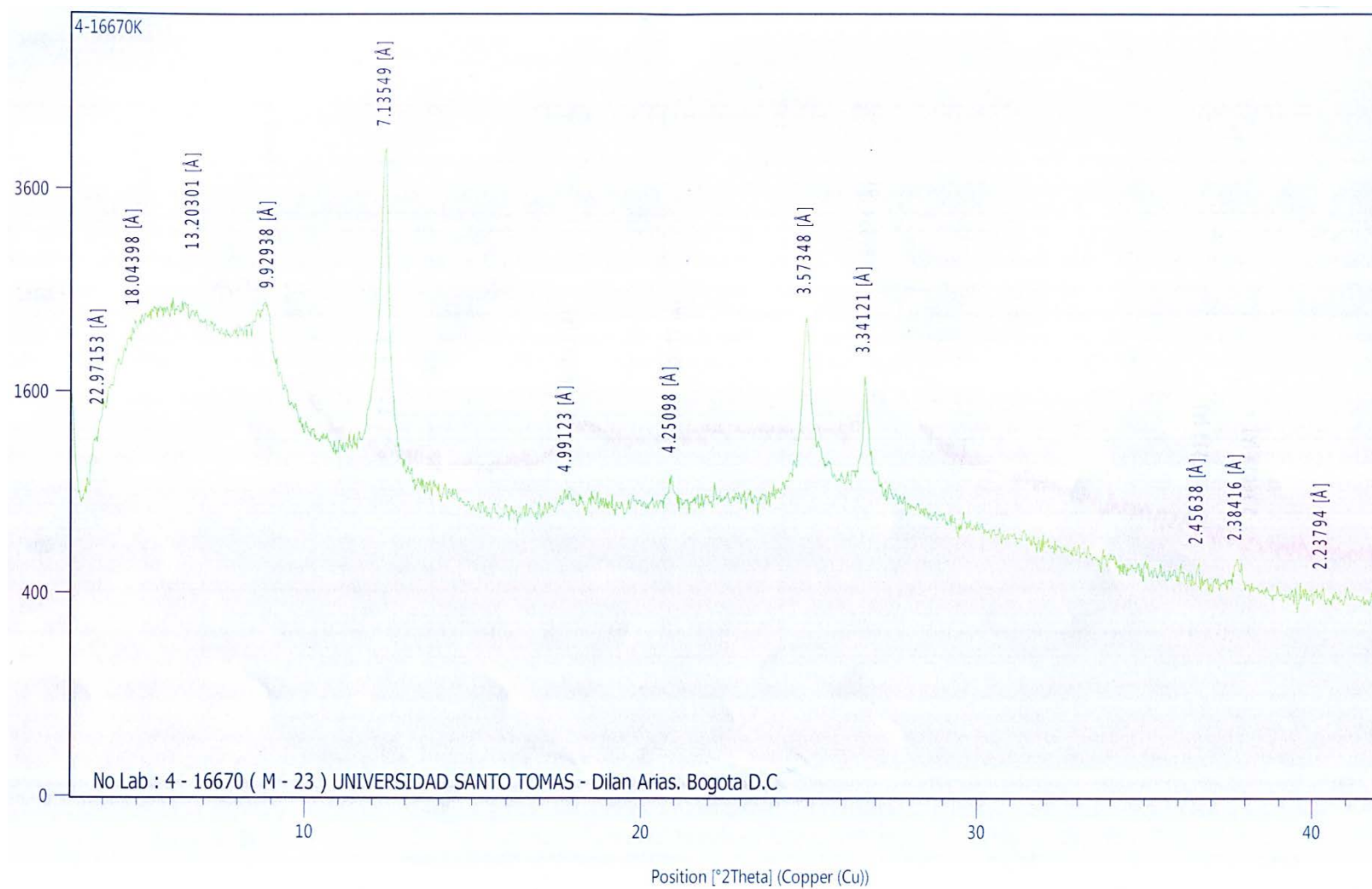
M-13 SONDEO 2



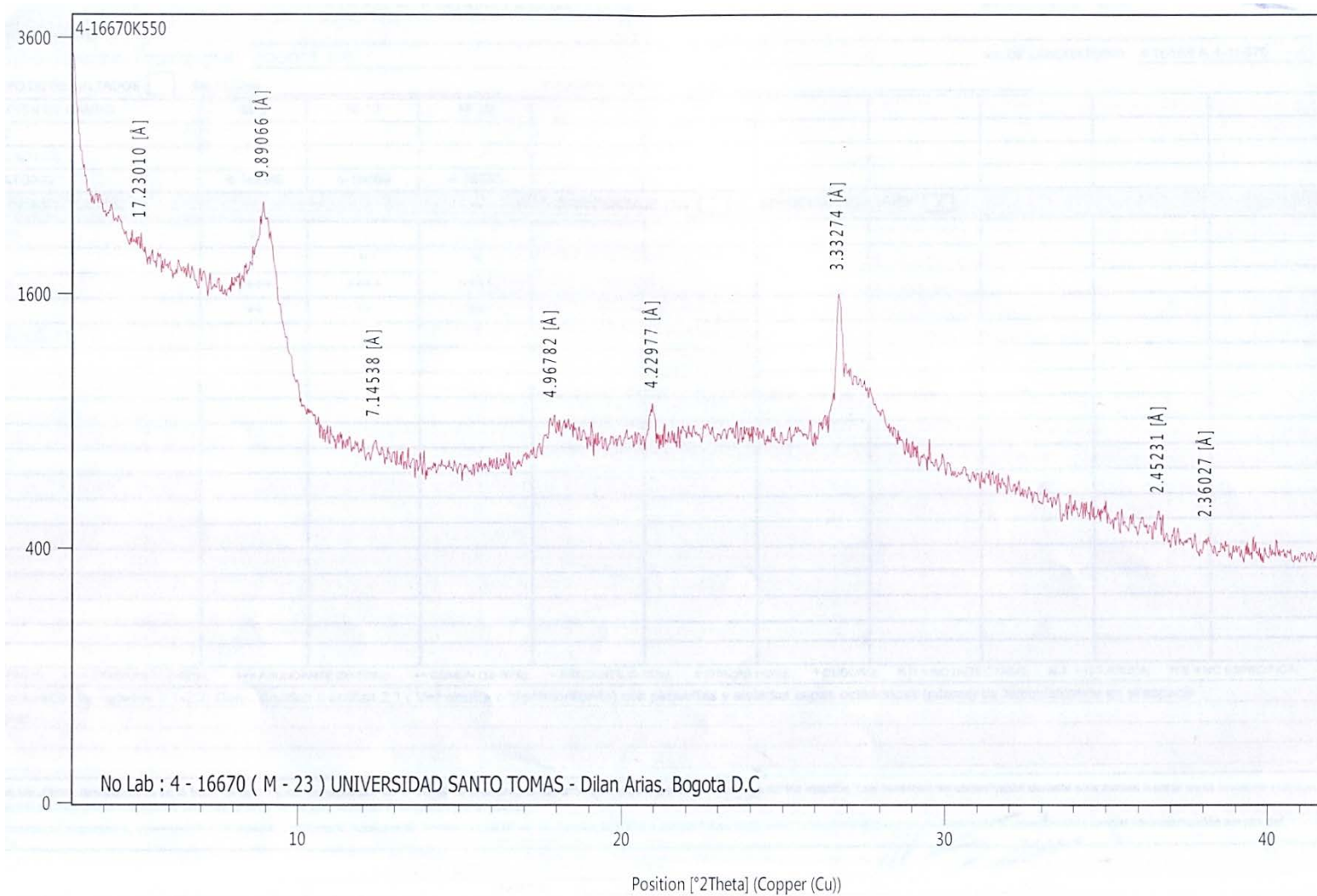
M-23 SONDEO 2

M-23 SONDEO 2



M-23 SONDEO 2

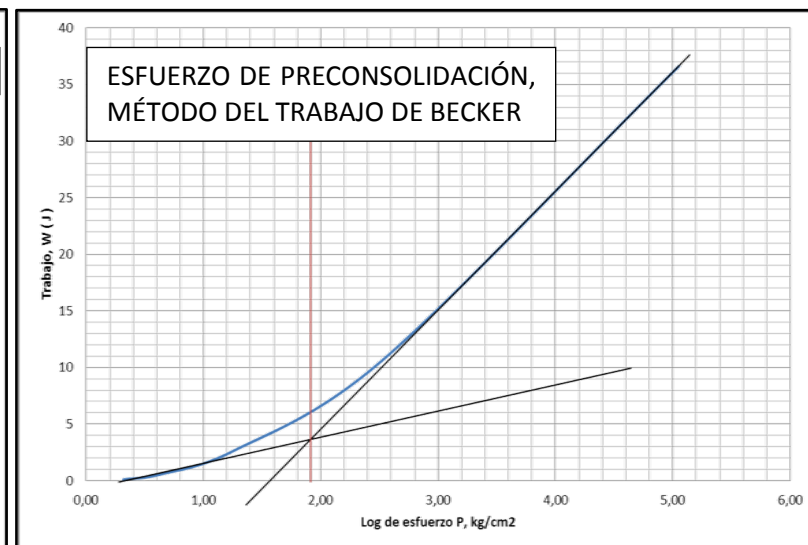
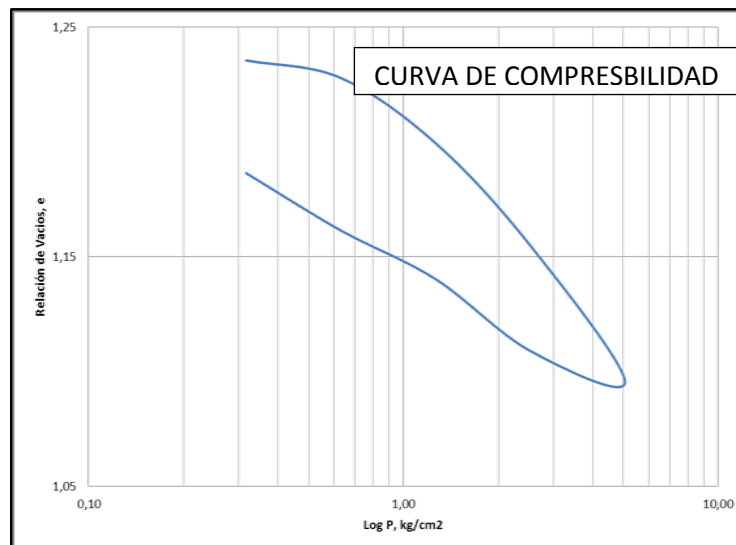
M-23 SONDEO 2



10. ANEXO III
FORMATOS DILIGENCIADOS PARA ENSAYOS DE COMPRESIBILIDAD DEL MATERIAL Y DETERMINACIÓN
DE SUCCIÓN MATRICIAL

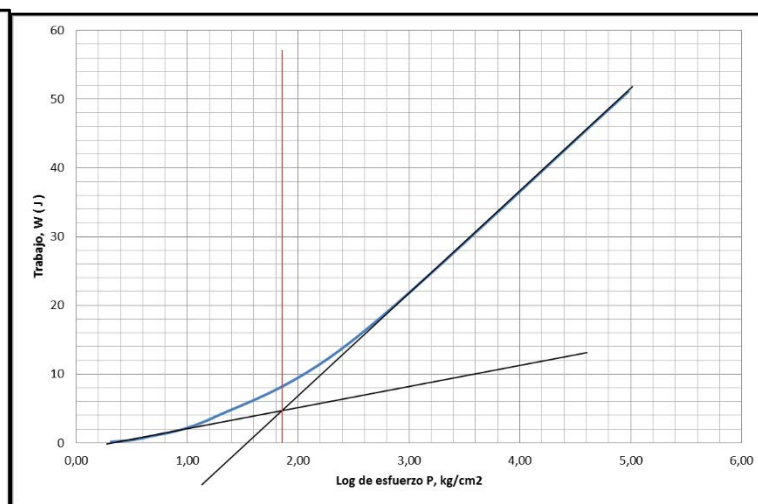
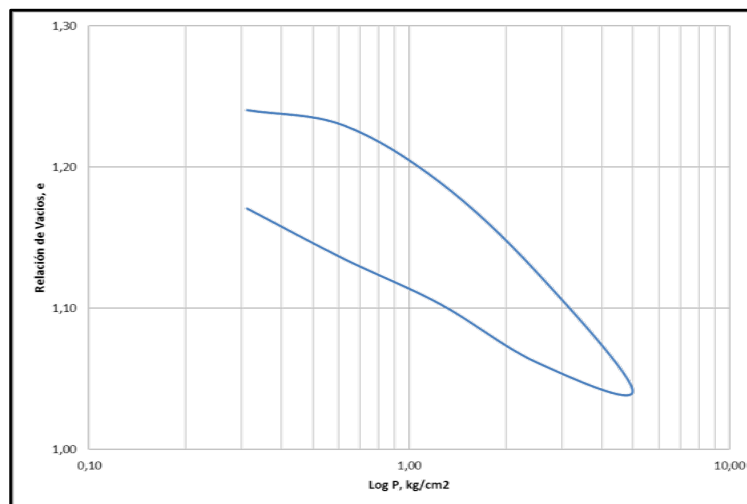
ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN RÁPIDA

S1 M3V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H_p (cm)	$H_p/2$ (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t_{50} , (min)	Coefficiente de Consolidación C_v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,250				
			0,006					
0,32	0,016	0,02	0,014	1,235	2,53	1,27	0,09	3,51
			0,010					
0,63	0,025	0,02	0,02	1,228	2,53	1,27	1,00	0,32
			0,022					
1,26	0,057	0,06	0,05	1,199	2,52	1,26	3,24	0,10
			0,042					
2,53	0,107	0,11	0,09	1,155	2,52	1,26	1,56	0,20
			0,069					
5,05	0,174	0,17	0,15	1,096	2,51	1,25	2,19	0,14
			0,15					
DESCARGA								
			0,063					
2,53	0,159	0,16	0,14	1,11	2,55	1,27		
			0,049					
1,26	0,123	0,12	0,109	1,14	2,56	1,28		
			0,039					
0,63	0,100	0,10	0,09	1,16	2,55	1,27		
			0,028					
0,32	0,071	0,07	0,06	1,19	2,55	1,28		
			0,012					
0,00	0,030	0,03	0,03	1,22	2,56	1,28		



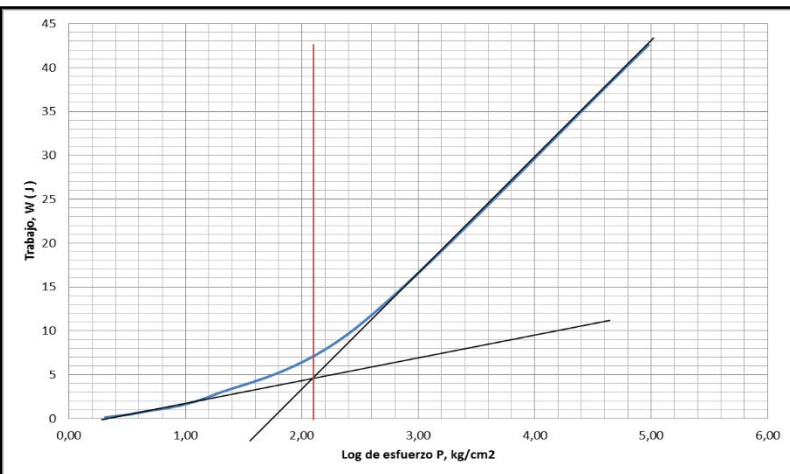
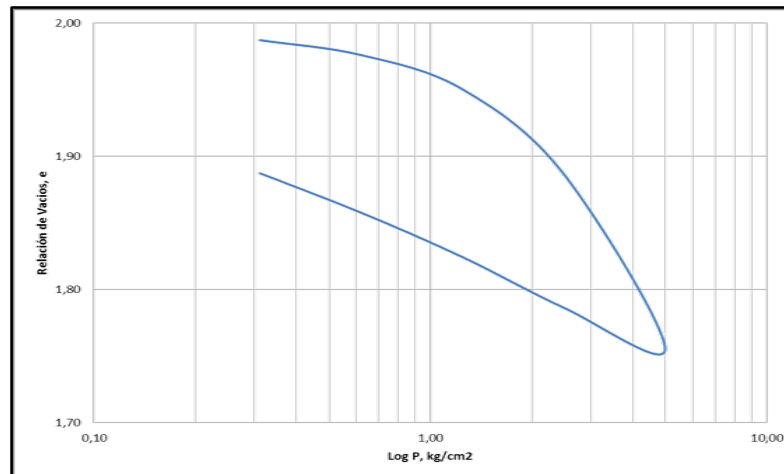
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M3 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,261				
0,31	0,019	0,02	0,009	1,240	2,11	1,05	0,09	2,43
0,62	0,029	0,03	0,020	1,230	2,11	1,06	0,25	0,88
1,24	0,067	0,07	0,014	1,189	2,10	1,05	1,44	0,15
2,49	0,126	0,13	0,03	1,126	2,09	1,05	1,56	0,14
4,98	0,205	0,21	0,032	1,041	2,08	1,04	1,96	0,11
DESCARGA								
2,49	0,186	0,19	0,07	1,06	2,02	1,01		
1,24	0,147	0,15	0,070	1,10	2,13	1,07		
0,62	0,117	0,12	0,158	1,14	2,13	1,06		
0,31	0,084	0,08	0,056	1,17	2,13	1,06		
0,00	0,036	0,04	0,13	1,22	2,14	1,07		



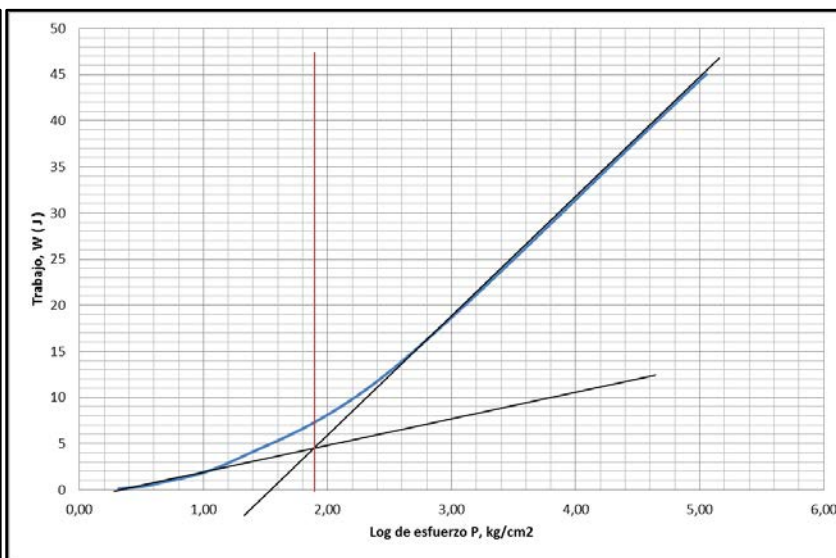
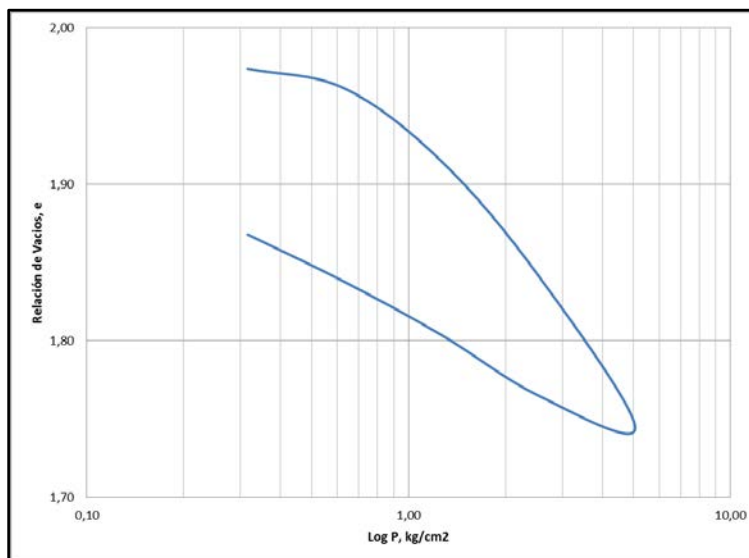
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1M6 V								
Incremento de Carga <i>(kg/cm2)</i>	Lectura del deformímetro al final del incremento <i>(cm)</i>	Cambio en la altura de la muestra <i>Δ H (cm)</i>	<i>ε= ΔH/Hi ó Δe=ΔH/Hs</i>	Relación de vacíos instantánea <i>e</i>	Altura promedio para el incremento de carga, <i>Hp (cm)</i>	<i>Hp/2 (cm)</i>	Tiempo para el 50% de Consolidación, <i>t50, (min)</i>	Coeficiente de Consolidación <i>Cv, cm2/min</i>
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,014				
			0,009					
0,31	0,019	0,02	0,027	1,987	2,11	1,05	0,0625	3,50
			0,013					
0,62	0,027	0,03	0,04	1,976	2,11	1,06	0,16	1,37
			0,021					
1,24	0,045	0,04	0,06	1,950	2,11	1,05	0,04	5,47
			0,042					
2,49	0,089	0,09	0,13	1,887	2,09	1,05	0,04	5,40
			0,086					
4,98	0,181	0,18	0,26	1,756	2,07	1,04	0,36	0,59
DESCARGA								
2,49	0,160	0,16	0,076	1,79	2,12	1,06		
			0,23					
1,24	0,133	0,13	0,063	1,82	2,13	1,06		
			0,190					
0,62	0,110	0,11	0,052	1,86	2,12	1,06		
			0,16					
0,31	0,089	0,09	0,042	1,89	2,12	1,06		
			0,13					
0,00	0,055	0,06	0,026	1,93	2,13	1,06		
			0,08					



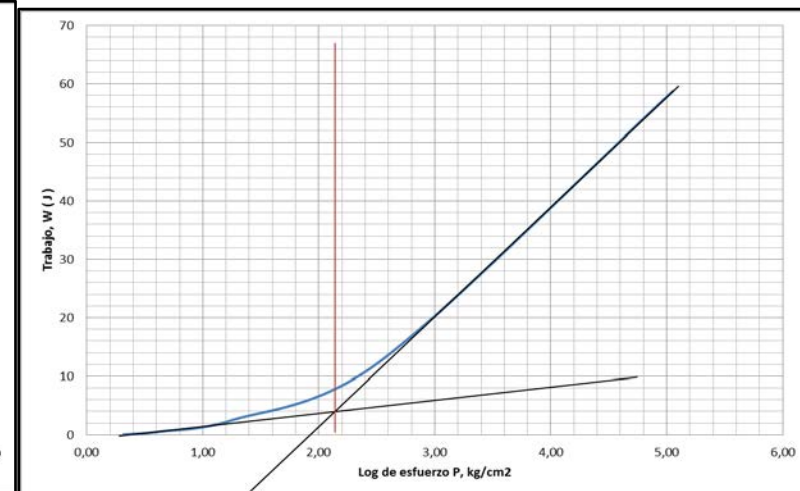
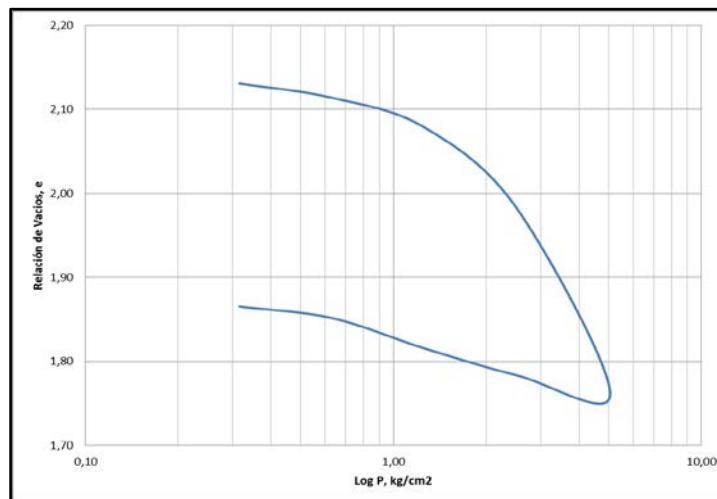
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1M6H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,997				
			0,008					
0,32	0,020	0,02	0,023	1,974	2,53	1,26	0,0625	5,04
			0,012					
0,63	0,030	0,03	0,04	1,961	2,53	1,27	1,00	0,32
			0,027					
1,26	0,070	0,07	0,08	1,915	2,52	1,26	2,56	0,12
			0,052					
2,53	0,132	0,13	0,16	1,842	2,50	1,25	0,04	7,67
			0,084					
5,05	0,214	0,21	0,25	1,744	2,48	1,24	0,04	7,55
DESCARGA								
			0,077					
2,53	0,197	0,20	0,23	1,77	2,55	1,27		
			0,064					
1,26	0,164	0,16	0,193	1,80	2,55	1,28		
			0,053					
0,63	0,135	0,13	0,16	1,84	2,55	1,27		
			0,043					
0,32	0,109	0,11	0,13	1,87	2,55	1,27		
			0,027					
0,00	0,068	0,07	0,08	1,92	2,56	1,28		



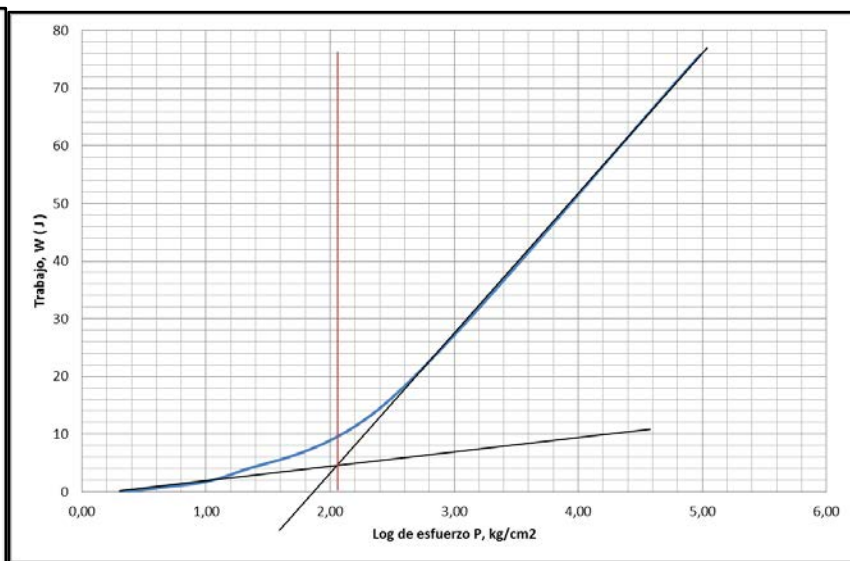
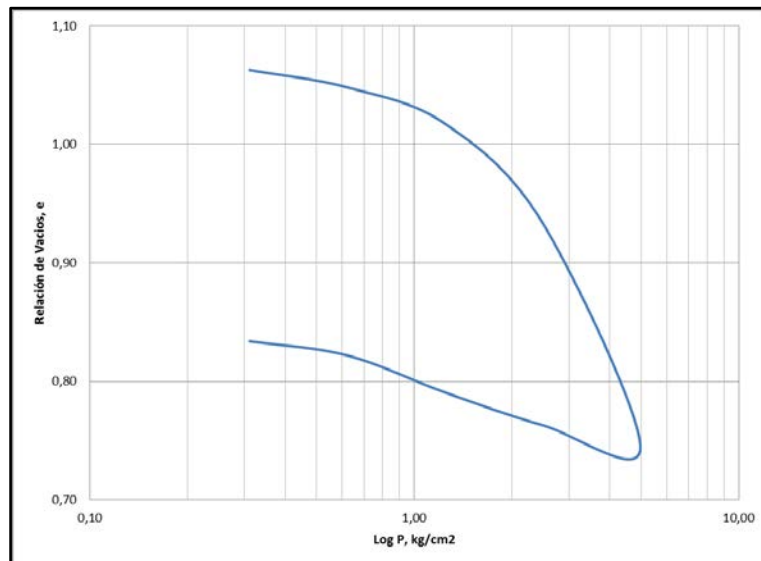
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M8V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformimetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coeficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,146				
0,32	0,012	0,01	0,005	2,131	2,53	1,27	0,0625	5,06
0,63	0,026	0,03	0,015	2,114	2,53	1,27	0,12	2,58
1,26	0,054	0,05	0,021	2,078	2,52	1,26	2,72	0,12
2,53	0,133	0,13	0,07	1,981	2,50	1,25	0,81	0,38
5,05	0,310	0,31	0,122	1,762	2,45	1,23	5,06	0,06
DESCARGA								
2,53	0,292	0,29	0,115	1,78	2,55	1,27		
1,26	0,266	0,27	0,36	1,82	2,55	1,28		
0,63	0,237	0,24	0,105	1,85	2,55	1,28		
0,32	0,226	0,23	0,330	1,87	2,54	1,27		
0,00	0,207	0,21	0,093	1,89	2,55	1,28		



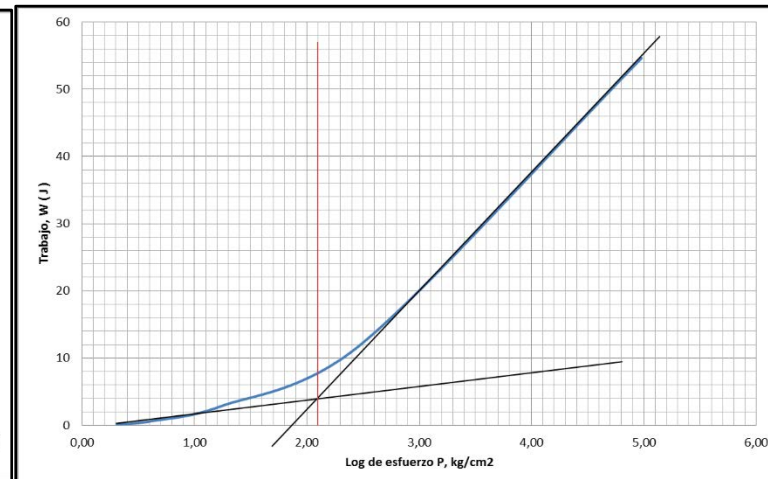
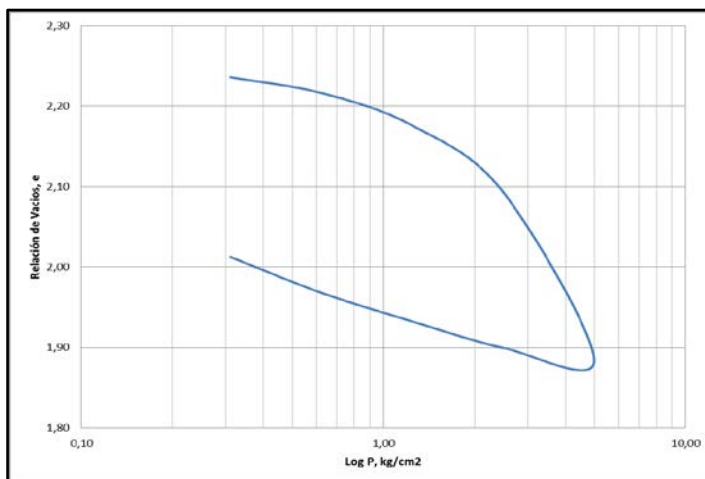
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M8 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i}$ ó $\Delta e = \frac{\Delta H}{H_s}$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,076				
0,31	0,013	0,01	0,006	1,063	2,11	1,05	0,0625	3,51
0,62	0,028	0,03	0,013	1,048	2,11	1,05	0,81	0,27
1,24	0,059	0,06	0,028	1,017	2,10	1,05	5,06	0,04
2,49	0,145	0,14	0,06	0,933	2,07	1,04	1,96	0,11
4,98	0,338	0,34	0,14	0,744	2,02	1,01	2,25	0,09
DESCARGA								
2,49	0,319	0,32	0,151	0,76	2,12	1,06		
1,24	0,290	0,29	0,31	0,79	2,13	1,07		
0,62	0,259	0,26	0,137	0,82	2,13	1,07		
0,31	0,246	0,25	0,285	0,83	2,12	1,06		
0,00	0,226	0,23	0,122	0,85	2,13	1,07		
			0,25					
			0,116					
			0,24					
			0,107					
			0,22					



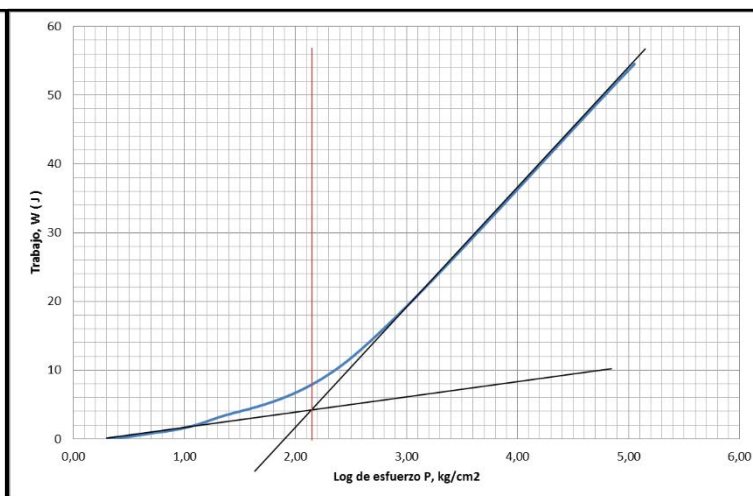
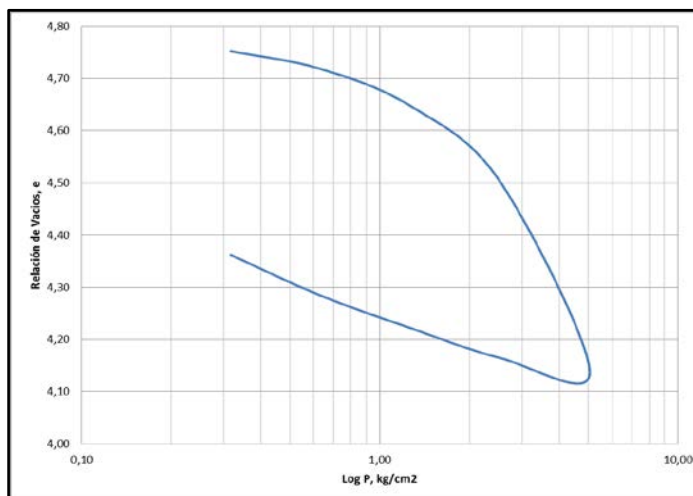
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M11 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\varepsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coeficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,254				
0,31	0,012	0,01	0,006	2,236	2,11	1,05	0,0625	3,51
0,62	0,025	0,02	0,012	2,216	2,11	1,05	2,25	0,10
1,24	0,051	0,05	0,04	2,176	2,10	1,05	0,06	3,48
2,49	0,105	0,10	0,024	2,093	2,09	1,04	1,56	0,14
4,98	0,241	0,24	0,08	1,884	2,05	1,02	2,89	0,07
DESCARGA								
2,49	0,231	0,23	0,109	1,90	2,12	1,06		
1,24	0,209	0,21	0,35	1,93	2,13	1,06		
0,62	0,186	0,19	0,099	1,97	2,13	1,06		
0,31	0,157	0,16	0,322	2,01	2,13	1,06		
0,00	0,127	0,13	0,088	2,06	2,13	1,06		



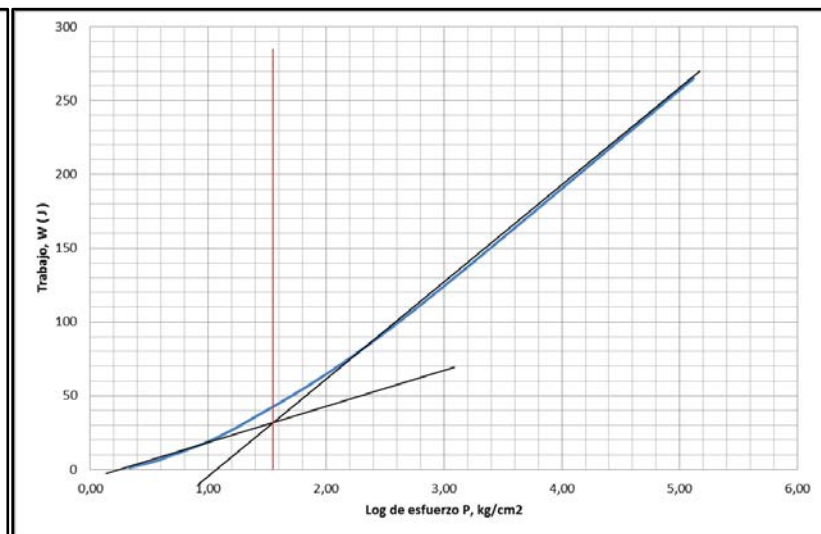
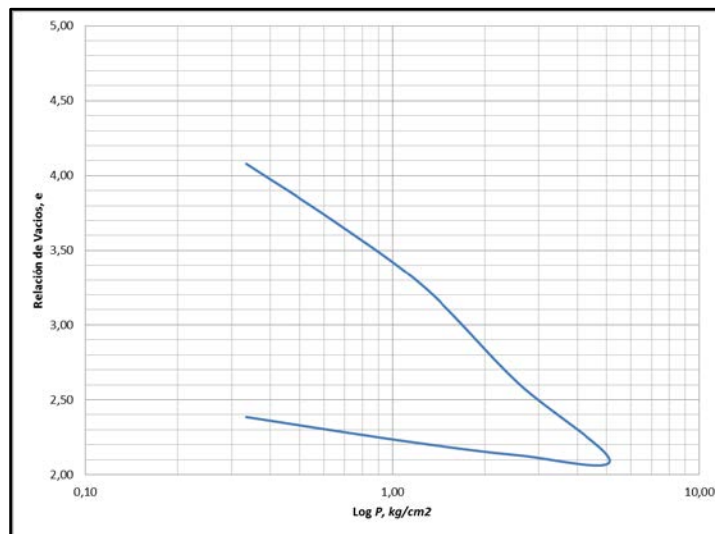
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M11 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,785				
0,32	0,014	0,01	0,006	4,752	2,53	1,27	0,0625	5,05
			0,032					
			0,011					
0,63	0,029	0,03	0,07	4,718	2,53	1,27	1,00	0,32
			0,024					
1,26	0,060	0,06	0,14	4,647	2,52	1,26	0,16	1,96
			0,049					
2,53	0,124	0,12	0,28	4,503	2,51	1,25	0,25	1,24
			0,112					
5,05	0,284	0,28	0,65	4,137	2,46	1,23	1,69	0,18
DESCARGA								
2,53	0,272	0,27	0,107	4,16	2,54	1,27		
			0,62					
			0,097					
1,26	0,247	0,25	0,563	4,22	2,55	1,28		
			0,087					
0,63	0,220	0,22	0,50	4,28	2,55	1,28		
			0,073					
0,32	0,186	0,19	0,42	4,36	2,56	1,28		
			0,057					
0,00	0,144	0,14	0,33	4,46	2,56	1,28		



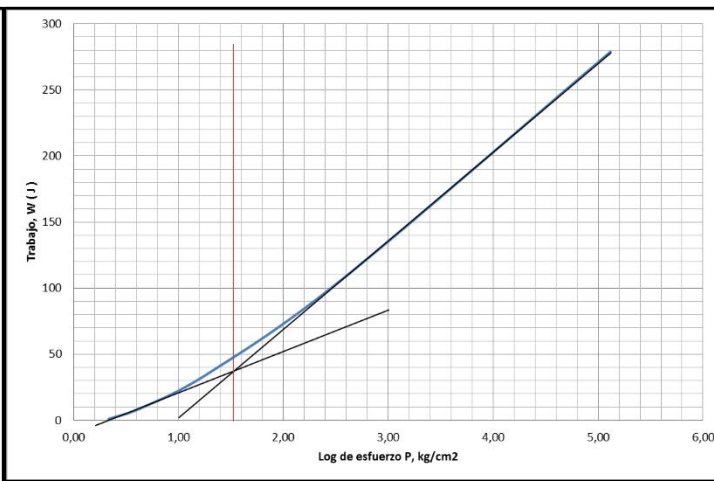
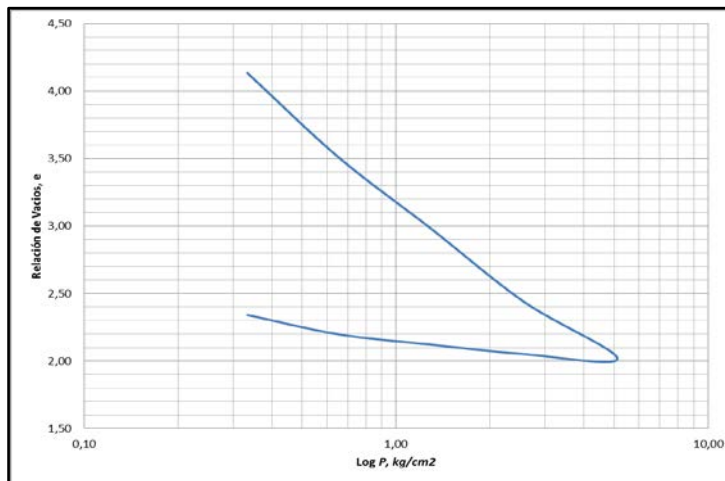
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M15 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coeficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,50				
0,33	0,178	0,17	0,076 0,418	4,08	2,18	1,09	2,89	0,08
0,65	0,339	0,33	0,147 0,81	3,69	2,19	1,09	6,76	0,03
1,29	0,525	0,52	0,229 1,26	3,24	2,18	1,09	4,84	0,05
2,57	0,784	0,78	0,343 1,89	2,61	2,14	1,07	4,00	0,06
5,12	0,998	0,99	0,438 2,41	2,09	2,16	1,08	2,89	0,08
DESCARGA								
2,57	0,983	0,98	0,431 2,37	2,13	2,28	1,14		
1,29	0,953	0,95	0,417 2,295	2,20	2,29	1,14		
0,65	0,916	0,91	0,401 2,21	2,29	2,29	1,14		
0,33	0,878	0,87	0,384 2,11	2,38	2,29	1,14		
0,01	0,734	0,73	0,321 1,77	2,73	2,34	1,17		



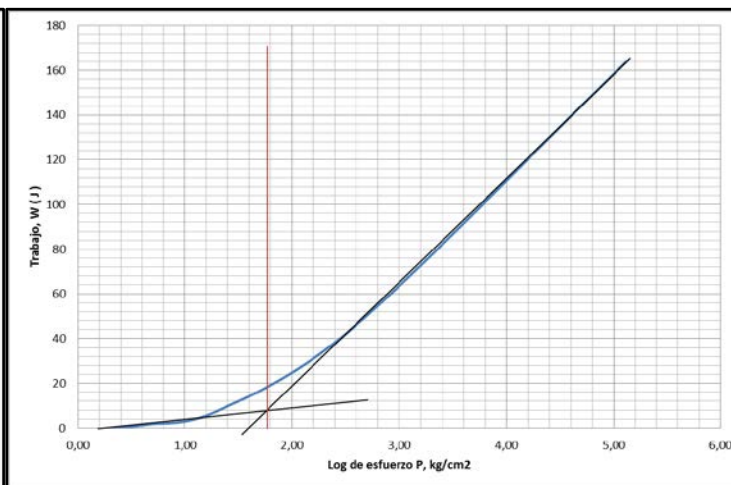
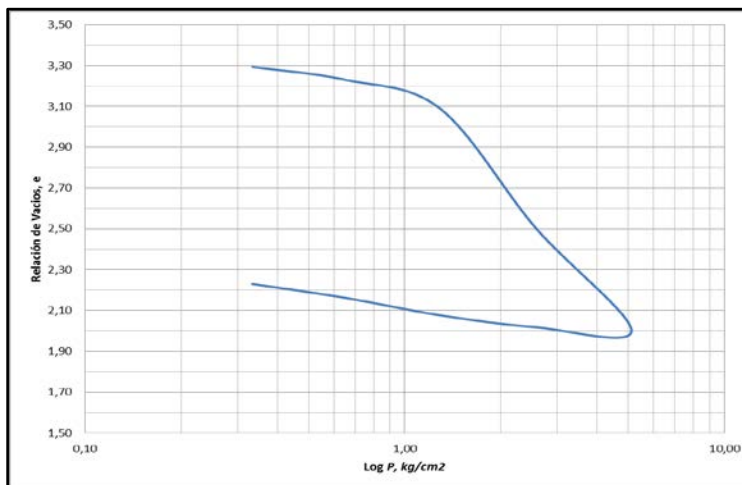
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M15 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformimetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,46				
0,33	0,194	0,13	0,059	4,13	2,20	1,10	3,24	0,07
0,65	0,453	0,39	0,324	3,51	2,14	1,07	15,21	0,01
1,29	0,673	0,61	0,173	2,98	2,16	1,08	6,86	0,03
2,57	0,899	0,84	0,95	2,44	2,16	1,08	10,24	0,02
5,12	1,074	1,01	0,270	2,02	2,18	1,09	5,76	0,04
DESCARGA								
2,57	1,060	1,00	1,47	2,05	2,28	1,14		
1,29	1,031	0,97	0,370	2,12	2,28	1,14		
0,65	0,999	0,94	2,02	2,20	2,29	1,14		
0,33	0,940	0,88	0,447	2,34	2,30	1,15		
0,01	0,851	0,79	2,44	2,55	2,31	1,16		



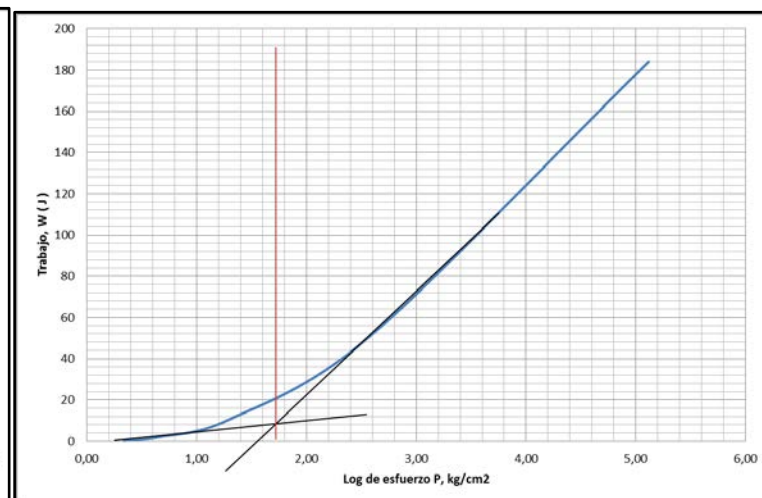
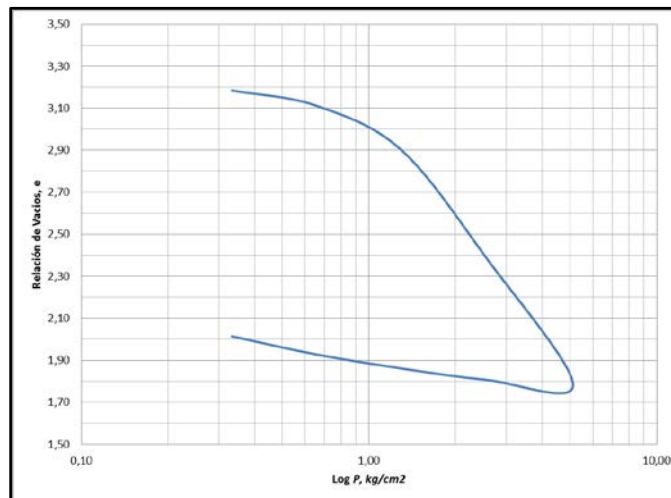
DETERMINACIÓN DE “K₀” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M19 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	3,35				
0,33	0,030	0,03	0,013	3,29	2,26	1,13	1,5625	0,16
			0,056					
			0,027					
0,65	0,064	0,06	0,12	3,23	2,25	1,13	3,17	0,08
			0,060					
1,29	0,137	0,14	0,26	3,09	2,23	1,12	1,32	0,19
			0,194					
2,57	0,442	0,44	0,84	2,50	2,12	1,06	16,81	0,01
			0,310					
5,12	0,705	0,70	1,35	2,00	2,14	1,07	11,42	0,02
DESCARGA								
2,57	0,696	0,69	0,306	2,02	2,28	1,14		
			1,33					
1,29	0,665	0,66	0,293	2,08	2,29	1,14		
			1,273					
			0,273					
0,65	0,621	0,62	1,19	2,16	2,29	1,15		
			0,257					
0,33	0,585	0,58	1,12	2,23	2,29	1,14		
			0,199					
0,01	0,453	0,45	0,87	2,48	2,34	1,17		



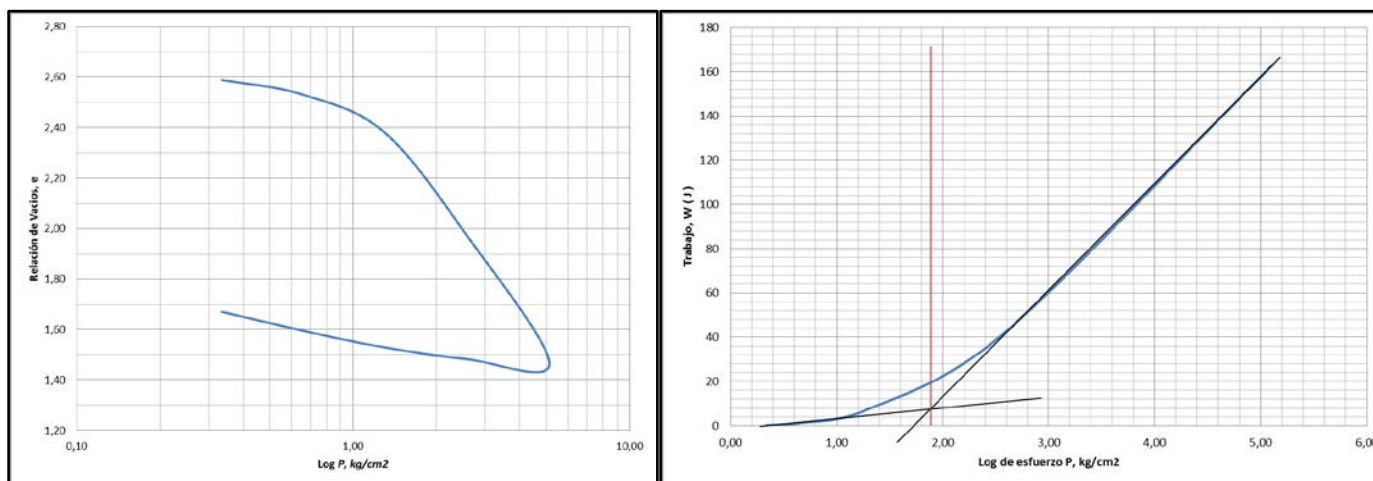
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M19 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H_p (cm)	$H_p/2$ (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t_{50} (min)	Coefficiente de Consolidación C_v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	3,27				
0,33	0,044	0,04	0,020 0,084	3,18	2,25	1,12	0,9604	0,26
0,65	0,083	0,08	0,036 0,16	3,11	2,25	1,13	1,69	0,15
1,29	0,194	0,19	0,086 0,37	2,90	2,22	1,11	3,24	0,07
2,57	0,470	0,47	0,207 0,88	2,38	2,13	1,07	7,84	0,03
5,12	0,790	0,79	0,348 1,49	1,78	2,12	1,06	9,00	0,02
DESCARGA								
2,57	0,777	0,78	0,342 1,46	1,81	2,28	1,14		
1,29	0,748	0,75	0,330 1,406	1,86	2,28	1,14		
0,65	0,712	0,71	0,314 1,34	1,93	2,29	1,14		
0,33	0,667	0,67	0,294 1,25	2,01	2,29	1,15		
0,01	0,588	0,59	0,259 1,11	2,16	2,31	1,15		



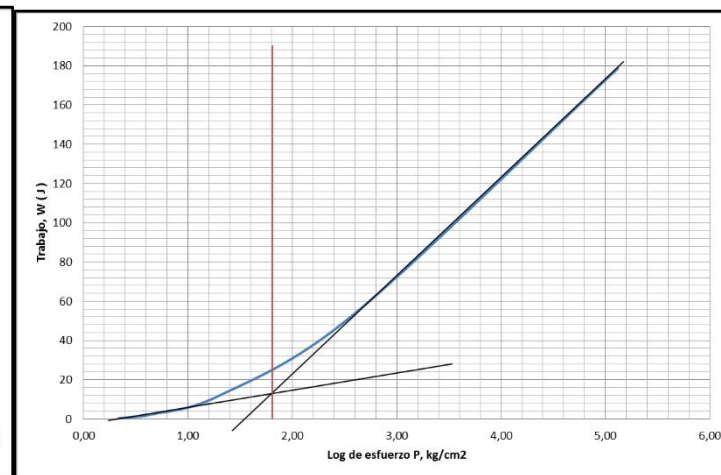
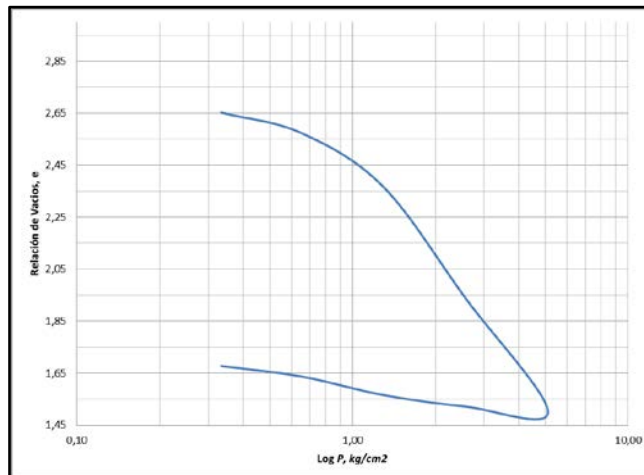
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M25 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,61				
0,33	0,016	0,02	0,006	2,59	2,52	1,26	7,84	0,04
			0,023					
			0,022					
0,65	0,056	0,06	0,08	2,53	2,51	1,26	7,29	0,04
			0,063					
1,29	0,160	0,16	0,23	2,38	2,48	1,24	12,82	0,02
			0,176					
2,57	0,446	0,45	0,64	1,97	2,39	1,19	17,64	0,02
			0,317					
5,12	0,803	0,80	1,15	1,47	2,35	1,18	23,04	0,01
DESCARGA								
2,57	0,790	0,79	0,312	1,48	2,54	1,27		
			1,13					
			0,300					
1,29	0,758	0,76	1,082	1,53	2,55	1,27		
			0,281					
0,65	0,711	0,71	1,01	1,60	2,55	1,28		
			0,260					
0,33	0,659	0,66	0,94	1,67	2,56	1,28		
			0,000					
0,01	0,000	0,00	0,00		2,53	1,27		



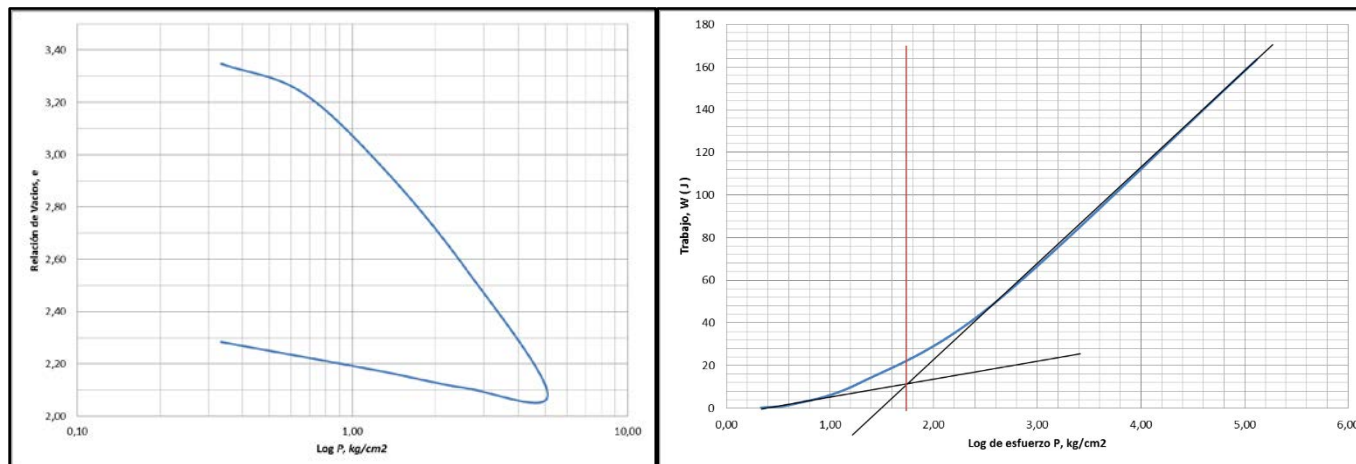
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M25 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformimetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,73				
0,33	0,050	0,05	0,020 0,073	2,65	2,44	1,22	1,44	0,20
0,65	0,102	0,10	0,041 0,15	2,57	2,43	1,22	1,82	0,16
1,29	0,237	0,24	0,096 0,36	2,37	2,40	1,20	5,76	0,05
2,57	0,521	0,52	0,211 0,79	1,94	2,32	1,16	11,56	0,02
5,12	0,810	0,81	0,329 1,23	1,50	2,32	1,16	12,25	0,02
DESCARGA								
2,57	0,796	0,80	0,323 1,20	1,52	2,47	1,23		
1,29	0,767	0,77	0,311 1,160	1,57	2,47	1,24		
0,65	0,720	0,72	0,292 1,09	1,64	2,48	1,24		
0,33	0,693	0,69	0,281 1,05	1,68	2,47	1,24		
0,01	0,572	0,57	0,232 0,86	1,86	2,52	1,26		



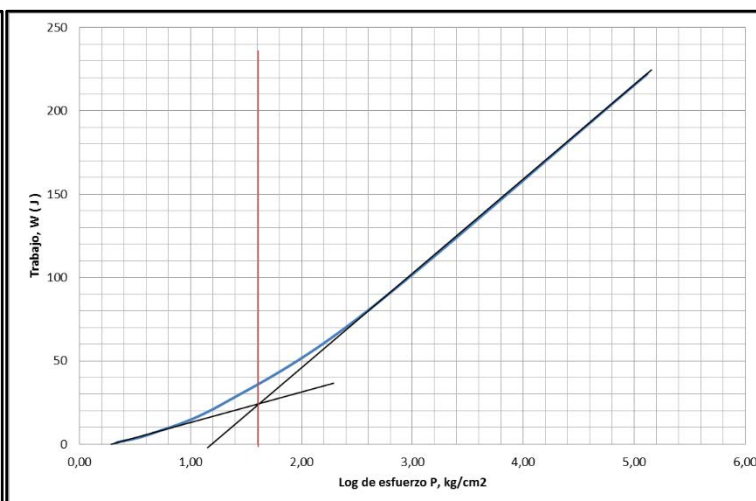
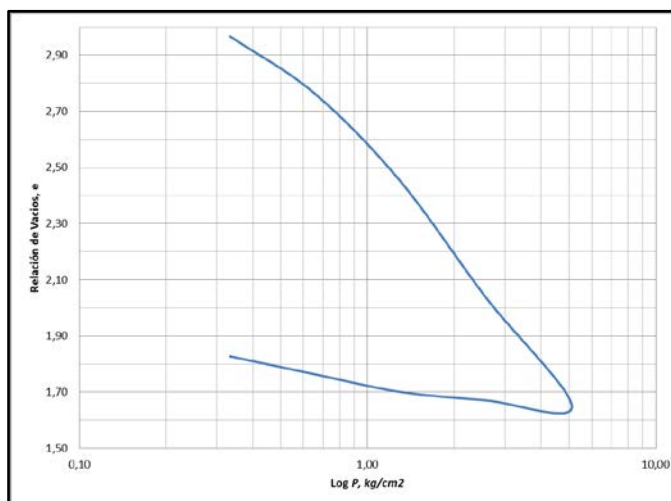
DETERMINACIÓN DE “K₀” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M29 V								
Incremento de Carga (kg/cm2)	Lectura del deformimetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra Δ H (cm)	$\varepsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, Hp (cm)	Hp/2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t50, (min)	Coefficiente de Consolidación Cv, cm2/min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	3,40				
			0,012					
0,33	0,030	0,03	0,052	3,35	2,52	1,26	1,44	0,02
			0,036					
0,65	0,092	0,09	0,16	3,24	2,50	1,25	3,17	0,02
			0,102					
1,29	0,259	0,26	0,45	2,95	2,45	1,22	1,32	0,04
			0,189					
2,57	0,479	0,48	0,83	2,57	2,42	1,21	16,81	0,01
			0,300					
5,12	0,758	0,76	1,32	2,08	2,39	1,20	11,42	0,01
DESCARGA								
2,57	0,743	0,74	0,294	2,11	2,54	1,27		
			1,29					
1,29	0,707	0,71	0,279	2,17	2,55	1,27		
			1,230					
0,65	0,674	0,67	0,266	2,23	2,55	1,27		
			1,17					
0,33	0,642	0,64	0,254	2,28	2,55	1,27		
			1,12					
0,01	0,000	0,00	0,000	2,28	2,53	1,27		
			0,00					



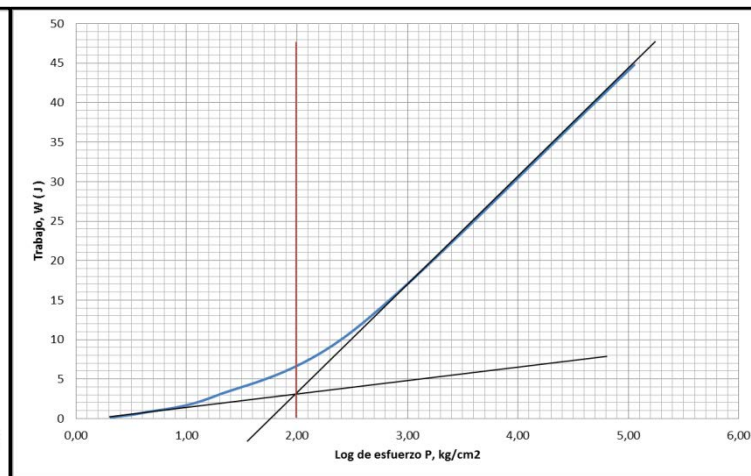
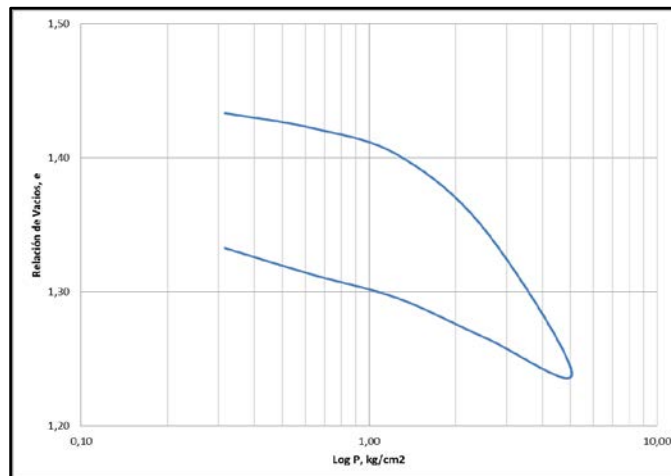
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S1 M29 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	3,23				
0,33	0,132	0,13	0,062	2,97	2,06	1,03	1	0,21
0,65	0,234	0,23	0,262	2,77	2,08	1,04	2,89	0,07
1,29	0,390	0,39	0,110	2,46	2,05	1,03	3,24	0,06
2,57	0,599	0,60	0,46	2,04	2,03	1,01	6,76	0,03
5,12	0,796	0,80	0,183	1,65	2,03	1,02	4,00	0,05
DESCARGA								
2,57	0,785	0,78	0,77	1,67	2,14	1,07		
1,29	0,770	0,77	1,56	1,70	2,14	1,07		
0,65	0,738	0,74	0,361	1,76	2,14	1,07		
0,33	0,706	0,71	1,528	1,83	2,15	1,07		
0,01	0,602	0,60	0,346	2,03	2,18	1,09		



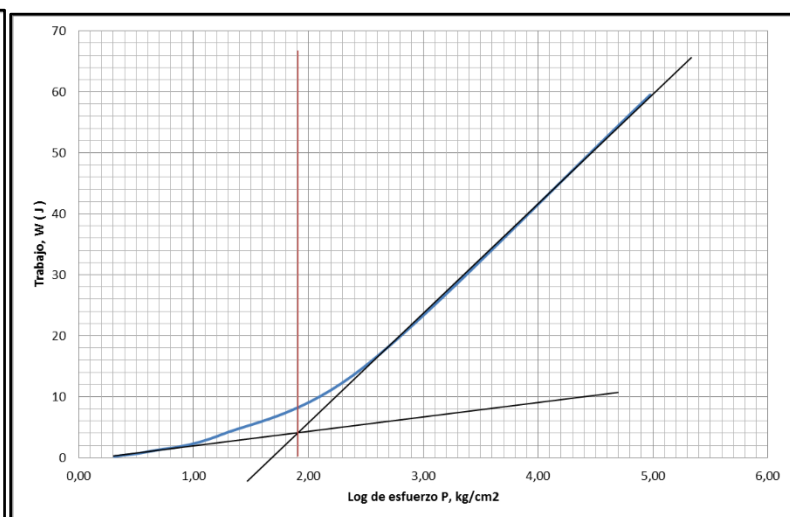
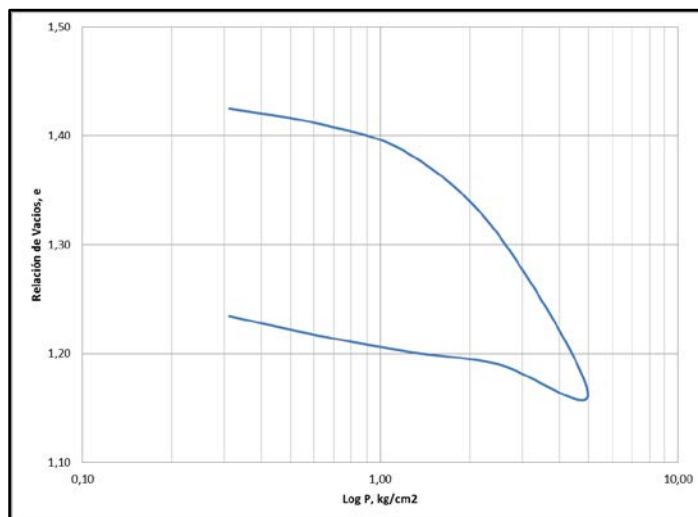
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M4 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,456				
0,32	0,023	0,02	0,009	1,433	2,53	1,26	0,81	0,39
0,63	0,035	0,03	0,014	1,422	2,53	1,27	0,49	0,65
1,26	0,056	0,06	0,022	1,402	2,53	1,26	1,44	0,22
2,53	0,113	0,11	0,045	1,346	2,51	1,26	4,00	0,08
5,05	0,224	0,22	0,088	1,239	2,48	1,24	1,96	0,16
DESCARGA								
2,53	0,196	0,20	0,077	1,27	2,44	1,22		
1,26	0,166	0,17	0,19	1,30	2,55	1,28		
0,63	0,148	0,15	0,065	1,31	2,55	1,27		
0,32	0,127	0,13	0,161	1,33	2,55	1,27		
0,00	0,106	0,11	0,058	1,35	2,55	1,27		



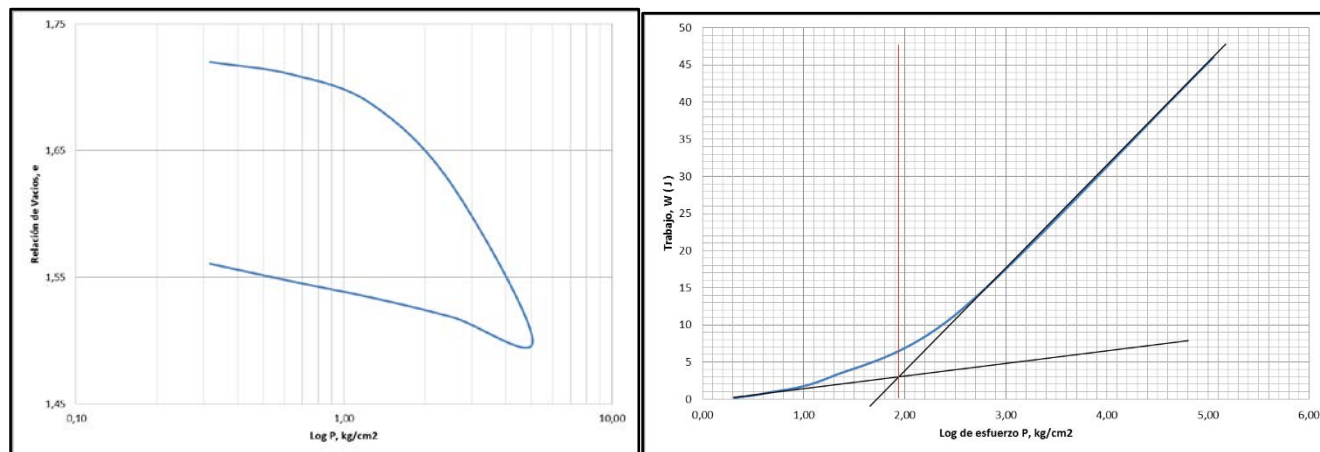
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M4 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,456				
0,31	0,027	0,03	0,013	1,425	2,10	1,05	0,0625	3,48
0,62	0,039	0,04	0,031	1,411	2,11	1,05	0,25	0,88
1,24	0,062	0,06	0,018	1,384	2,10	1,05	0,81	0,27
2,49	0,126	0,13	0,04	1,309	2,08	1,04	1,96	0,11
4,98	0,253	0,25	0,029	1,162	2,05	1,03	1,21	0,17
DESCARGA								
2,49	0,229	0,23	0,07	1,19	2,12	1,06		
1,24	0,219	0,22	0,060	1,20	2,12	1,06		
0,62	0,206	0,21	0,054	1,22	2,12	1,06		
0,31	0,191	0,19	0,049	1,23	2,12	1,06		
0,00	0,173	0,17	0,042	1,25	2,12	1,06		



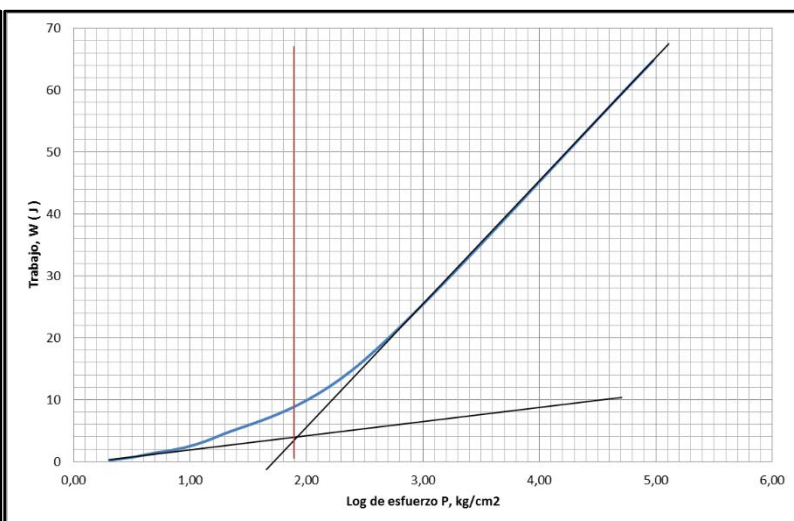
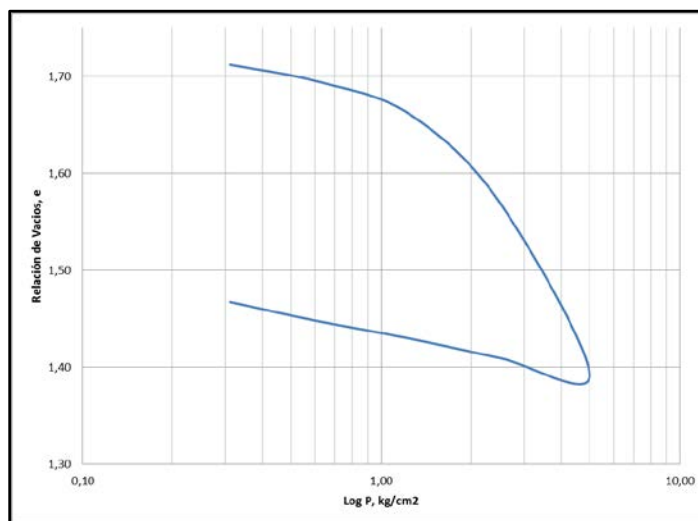
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M7								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ (min)	Ceficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,749				
0,32	0,027	0,03	0,011	1,720	2,53	1,26	0,0625	5,03
0,63	0,036	0,04	0,029	1,710	2,53	1,27	0,81	0,39
1,26	0,057	0,06	0,014	1,687	2,53	1,26	0,64	0,49
2,53	0,116	0,12	0,04	1,623	2,51	1,25	5,76	0,05
5,05	0,230	0,23	0,023	1,500	2,48	1,24	2,56	0,12
DESCARGA								
2,53	0,213	0,21	0,046	1,52	2,54	1,27		
1,26	0,198	0,20	0,13	1,53	2,55	1,27		
0,63	0,186	0,19	0,091	1,55	2,54	1,27		
0,32	0,174	0,17	0,25	1,56	2,54	1,27		
0,00	0,162	0,16	0,084	1,57	2,54	1,27		



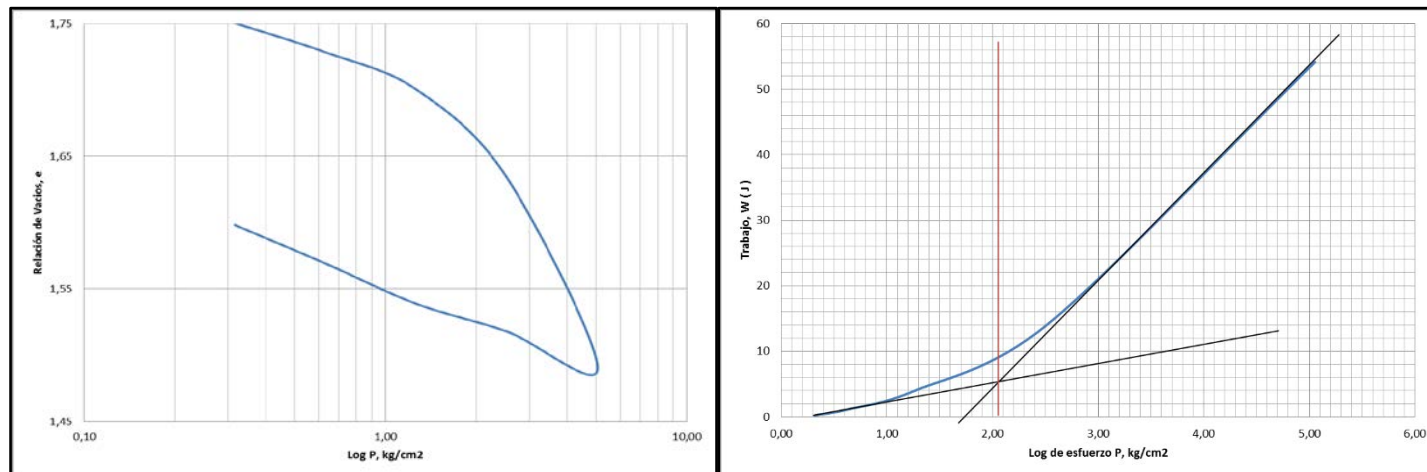
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M7 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,749				
0,31	0,028	0,03	0,013	1,712	2,10	1,05	0,0625	3,48
0,62	0,042	0,04	0,037	1,694	2,11	1,05	0,04	5,48
1,24	0,068	0,07	0,020	1,661	2,10	1,05	0,81	0,27
2,49	0,138	0,14	0,05	1,570	2,08	1,04	2,56	0,08
4,98	0,275	0,27	0,032	1,392	2,05	1,02	0,56	0,37
DESCARGA								
2,49	0,261	0,26	0,123	1,41	2,12	1,06		
1,24	0,246	0,25	0,34	1,43	2,12	1,06		
0,62	0,232	0,23	0,116	1,45	2,12	1,06		
0,31	0,217	0,22	0,319	1,47	2,12	1,06		
0,00	0,202	0,20	0,110	1,49	2,12	1,06		
			0,30					
			0,102					
			0,28					
			0,095					
			0,26					



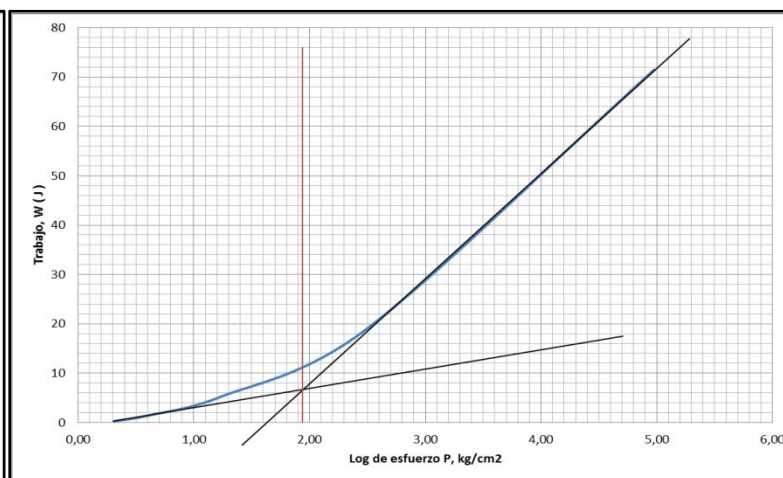
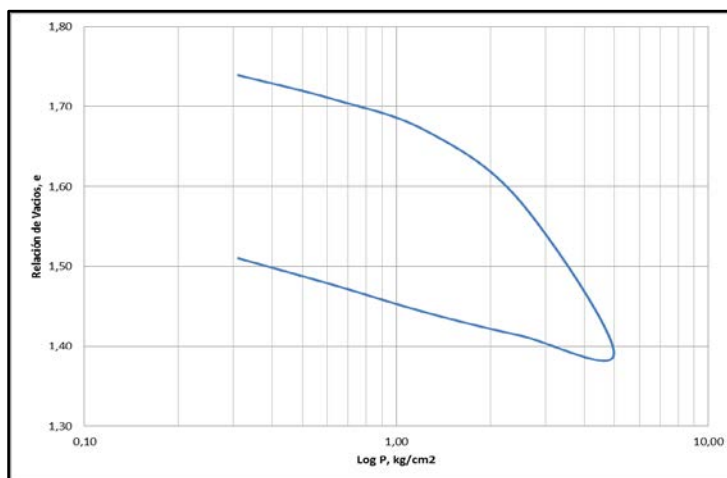
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M3 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\varepsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,784				
0,32	0,031	0,03	0,012	1,750	2,52	1,26	0,25	1,25
0,63	0,051	0,05	0,034	1,728	2,53	1,26	0,36	0,87
1,26	0,076	0,08	0,020	1,700	2,53	1,26	0,16	1,96
2,53	0,137	0,14	0,06	1,634	2,51	1,25	1,00	0,31
5,05	0,268	0,27	0,030	1,490	2,47	1,24	1,44	0,21
DESCARGA								
2,53	0,243	0,24	0,054	1,52	2,55	1,27		
1,26	0,224	0,22	0,027	1,54	2,55	1,27		
0,63	0,196	0,20	0,088	1,57	2,55	1,28		
0,32	0,169	0,17	0,245	1,60	2,56	1,28		
0,00	0,123	0,12	0,077	1,65	2,56	1,28		



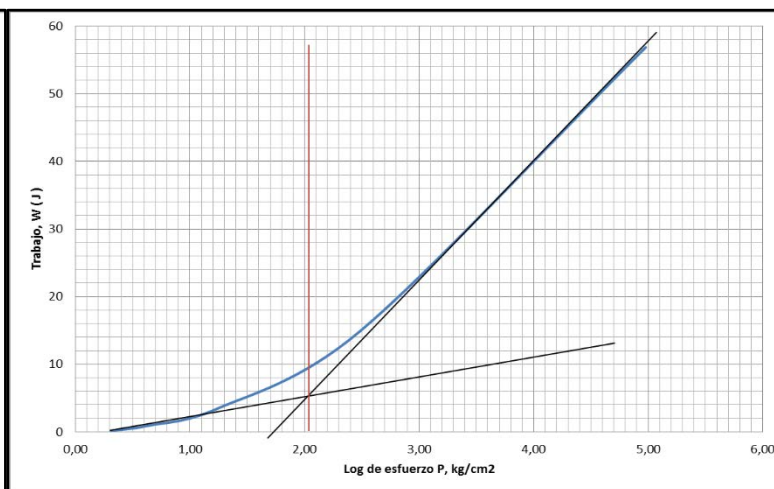
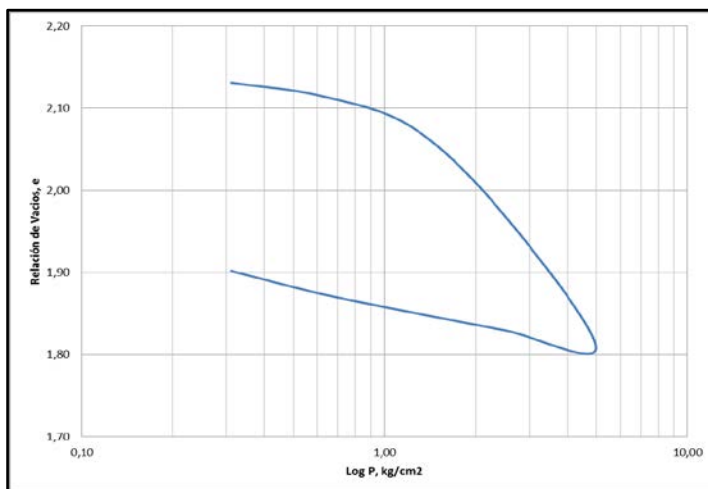
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M3 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\varepsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	1,784				
0,31	0,034	0,03	0,016	1,739	2,10	1,05	0,36	0,60
0,62	0,056	0,06	0,045	1,709	2,10	1,05	0,16	1,36
1,24	0,087	0,09	0,027	1,670	2,10	1,05	0,16	1,36
2,49	0,154	0,15	0,07	1,582	2,08	1,04	0,25	0,85
4,98	0,298	0,30	0,041	1,392	2,04	1,02	0,49	0,42
DESCARGA								
2,49	0,281	0,28	0,11	1,41	2,12	1,06		
1,24	0,260	0,26	0,073	1,44	2,12	1,06		
0,62	0,233	0,23	0,20	1,48	2,13	1,06		
0,31	0,208	0,21	0,141	1,51	2,12	1,06		
0,00	0,174	0,17	0,39	1,55	2,13	1,07		



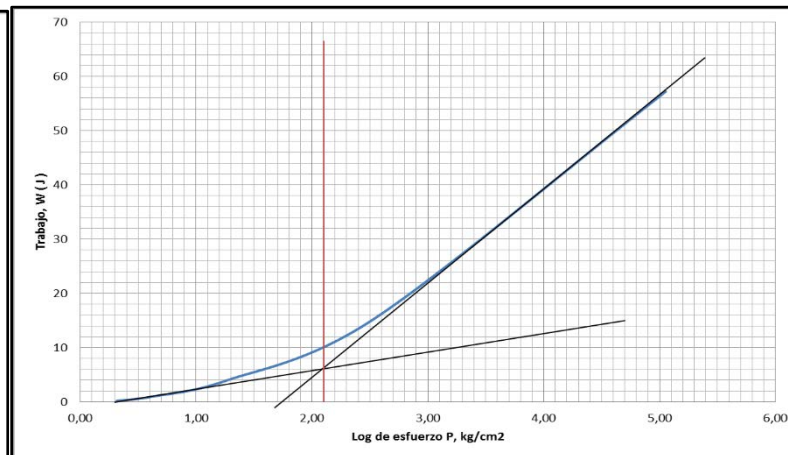
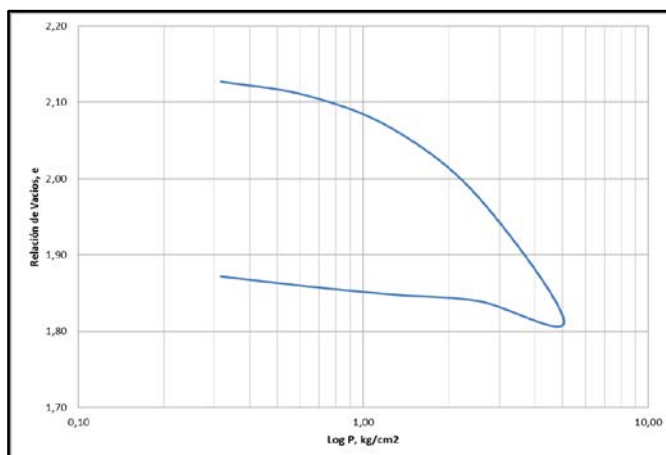
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M11 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,163				
0,31	0,022	0,02	0,010	2,131	2,11	1,05	0,0625	3,49
0,62	0,033	0,03	0,015	2,114	2,11	1,06	0,16	1,37
1,24	0,059	0,06	0,028	2,076	2,10	1,05	0,36	0,61
2,49	0,130	0,13	0,061	1,969	2,08	1,04	1,00	0,21
4,98	0,238	0,24	0,112	1,808	2,06	1,03	2,25	0,09
DESCARGA								
2,49	0,223	0,22	0,106	1,83	2,12	1,06		
1,24	0,209	0,21	0,33	1,85	2,12	1,06		
0,62	0,194	0,19	0,099	1,87	2,12	1,06		
0,31	0,175	0,18	0,313	1,90	2,12	1,06		
0,00	0,158	0,16	0,092	1,93	2,12	1,06		



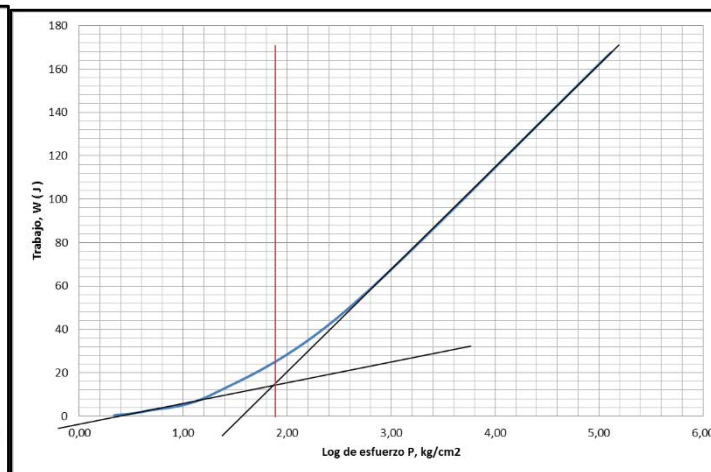
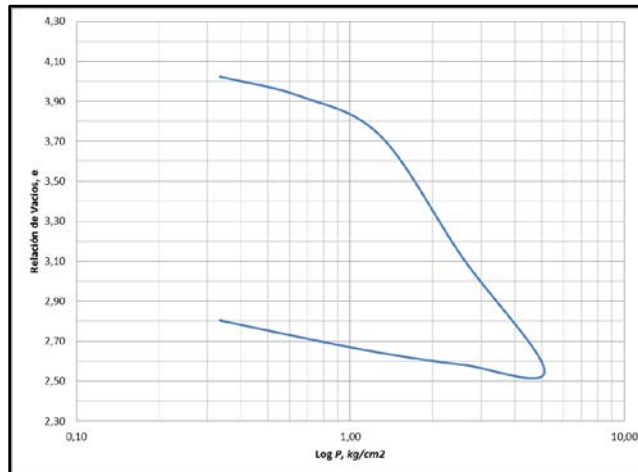
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M11 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta \epsilon = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	2,164				
0,32	0,029	0,03	0,012	2,127	2,52	1,26	0,16	1,96
0,63	0,044	0,04	0,036	2,109	2,53	1,27	0,64	0,49
1,26	0,079	0,08	0,017	2,065	2,52	1,26	0,36	0,87
2,53	0,150	0,15	0,05	1,976	2,50	1,25	2,25	0,14
5,05	0,282	0,28	0,031	1,813	2,48	1,24	1,44	0,21
DESCARGA								
2,53	0,260	0,26	0,102	1,84	2,55	1,27		
1,26	0,253	0,25	0,32	1,85	2,54	1,27		
0,63	0,244	0,24	0,100	1,86	2,54	1,27		
0,32	0,234	0,23	0,315	1,87	2,54	1,27		
0,00	0,212	0,21	0,096	1,90	2,55	1,27		



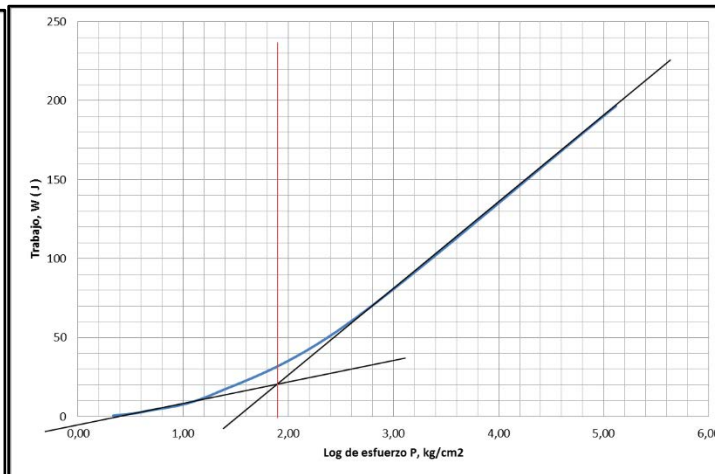
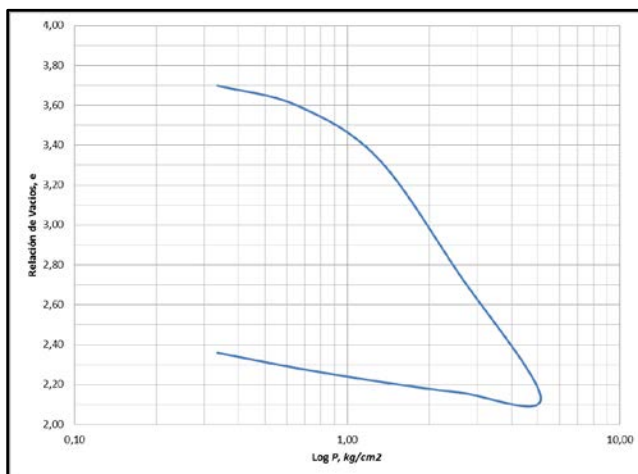
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M19 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H / H_i$ ó $\Delta e = \Delta H / H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coeficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,14				
0,33	0,056	0,06	0,023	4,02	2,38	1,19	0,9025	0,31
0,65	0,102	0,10	0,119	3,93	2,39	1,19	1,00	0,28
1,29	0,196	0,20	0,042	3,73	2,36	1,18	1,44	0,19
2,57	0,480	0,48	0,22	3,12	2,27	1,13	4,00	0,06
5,12	0,747	0,75	0,081	2,55	2,28	1,14	2,89	0,09
DESCARGA								
2,57	0,732	0,73	0,42	2,58	2,42	1,21		
1,29	0,704	0,70	0,199	2,64	2,42	1,21		
0,65	0,667	0,67	1,02	2,72	2,43	1,21		
0,33	0,627	0,63	0,310	2,80	2,43	1,21		
0,01	0,483	0,48	1,59	3,11	2,48	1,24		



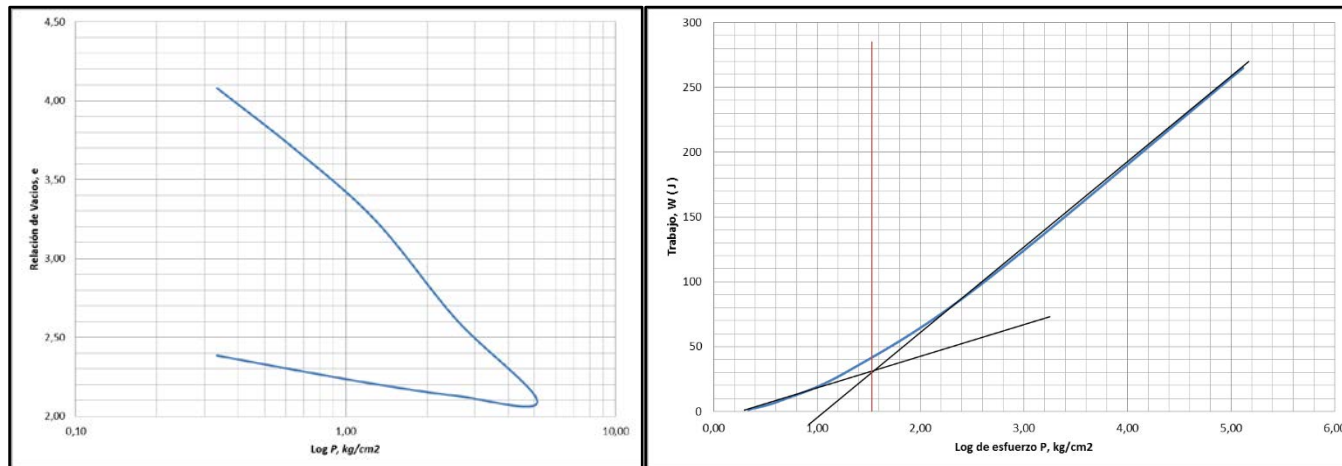
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M19 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	3,88				
0,33	0,084	0,08	0,037	3,70	2,20	1,10	1,96	0,12
0,65	0,130	0,13	0,183	3,60	2,22	1,11	1,21	0,20
1,29	0,250	0,25	0,058	3,34	2,18	1,09	2,10	0,11
2,57	0,517	0,52	0,28	2,75	2,11	1,05	3,80	0,06
5,12	0,804	0,80	0,112	2,13	2,10	1,05	7,84	0,03
DESCARGA								
2,57	0,790	0,79	0,231	2,16	2,25	1,12		
1,29	0,765	0,76	1,13	2,22	2,25	1,13		
0,65	0,734	0,73	0,359	2,28	2,26	1,13		
0,33	0,699	0,70	1,75	2,36	2,26	1,13		
0,01	0,565	0,57	0,328	2,65	2,31	1,15		



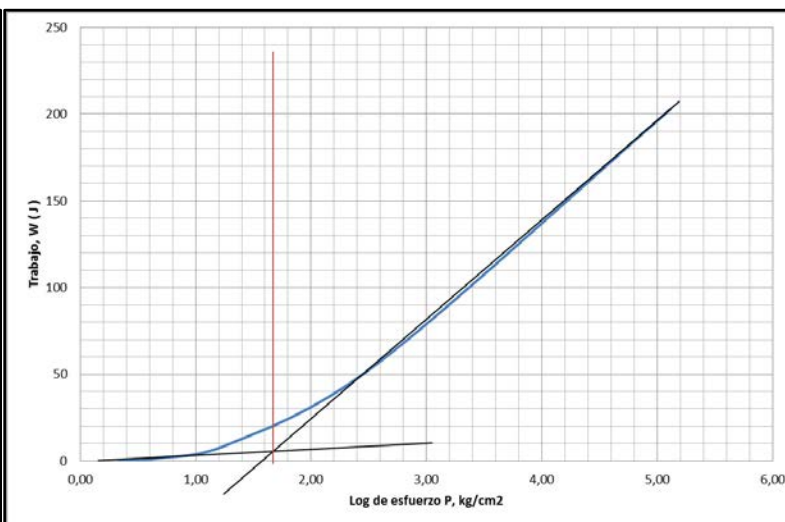
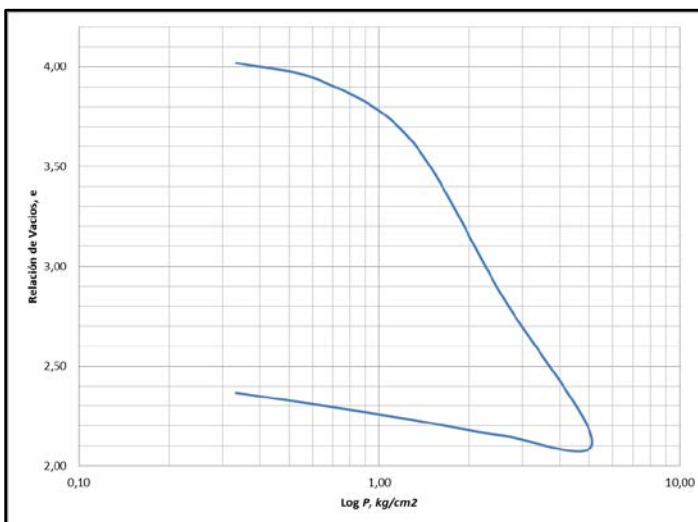
DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M23 V								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_i$ ó $\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coefficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,50				
0,33	0,178	0,17	0,076	4,08	2,18	1,09	3,24	0,07
0,65	0,339	0,33	0,418	3,69	2,19	1,09	6,76	0,03
1,29	0,525	0,52	0,147	3,24	2,18	1,09	4,84	0,05
2,57	0,784	0,78	0,81	2,61	2,14	1,07	9,00	0,03
5,12	0,998	0,99	0,229	2,09	2,16	1,08	2,89	0,08
DESCARGA								
2,57	0,983	0,98	0,343	2,13	2,28	1,14		
1,29	0,953	0,95	2,37	2,20	2,29	1,14		
0,65	0,916	0,91	0,417	2,29	2,29	1,14		
0,33	0,878	0,87	2,295	2,38	2,29	1,14		
0,01	0,734	0,73	0,401	2,73	2,34	1,17		



DETERMINACIÓN DE “K_o” PARA UNA ARCILLA SUPERFICIAL DEL OCCIDENTE DE BOGOTÁ

S2 M23 H								
Incremento de Carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (cm)	Cambio en la altura de la muestra ΔH (cm)	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i}$ ó $\Delta e = \frac{\Delta H}{H_s}$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio para el incremento de carga, H _p (cm)	H _p /2 (cm)	Tiempo para el 50% de Consolidación, t ₅₀ , (min)	Coeficiente de Consolidación C _v , cm ² /min
CARGA								
0,00	0	0	0,00	4,06				
0,33	0,038	0,02	0,008 0,038	4,02	2,36	1,18	0,64	0,43
0,65	0,083	0,06	0,026 0,13	3,93	2,35	1,17	1,96	0,14
1,29	0,224	0,20	0,086 0,43	3,62	2,30	1,15	2,89	0,09
2,57	0,585	0,57	0,238 1,21	2,85	2,19	1,09	8,47	0,03
5,12	0,928	0,91	0,383 1,94	2,12	2,20	1,10	18,49	0,01
DESCARGA								
2,57	0,913	0,89	0,377 1,91	2,15	2,38	1,19		
1,29	0,876	0,86	0,361 1,827	2,23	2,39	1,19		
0,65	0,843	0,82	0,347 1,76	2,30	2,39	1,19		
0,33	0,813	0,79	0,334 1,69	2,37	2,39	1,19		
0,01	0,805	0,78	0,331 1,68	2,38	2,37	1,19		



MEDICIÓN DE SUCCIÓN MATRICIAL

DATOS DE LABORATORIO

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M3							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,7897	0,9861	0,9528	20,42%	3715,93
			Base	0,7962	0,9951	0,9612	20,55%	3648,15
2	03/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8953	1,0907	1,0564	21,29%	3278,63
			Base	0,8776	1,0703	1,0357	21,88%	3011,34
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8654	1,0461	1,0125	22,84%	2625,74
			Base	0,8665	1,0493	1,0197	19,32%	4347,35
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8307	1,0172	0,9893	17,59%	5569,46
			Base	0,8427	1,0180	0,9925	17,02%	6042,10
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8081	0,9675	0,9397	21,12%	3357,75
			Base	0,8338	0,9956	0,9694	19,32%	4347,11
6	07/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8456	0,9823	0,9604	19,08%	4502,28
			Base	0,8418	0,9821	0,9617	17,01%	6049,48
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8551	0,9827	0,9635	17,71%	5473,97
			Base	0,8409	0,9766	0,9570	16,88%	6165,09
8	22/05/2014	2:00 p. m.	Tope	0,8845	1,0142	1,0033	9,18%	18591,30
			Base	0,8609	0,9864	0,9754	9,61%	17476,14

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M11							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8348	1,2961	1,0179	151,94%	4,36
			Base	0,8260	1,2266	1,0152	111,73%	9,34
2	03/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8904	1,2031	1,0479	98,54%	12,76
			Base	0,8767	1,2022	1,0416	97,39%	13,14
3	10/04/2014	15:45	Tope	0,8779	1,0704	1,0270	29,11%	1070,25
			Base	0,8510	1,0473	1,0076	25,35%	1832,97
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8297	1,0367	0,9964	24,18%	2169,23
			Base	0,8373	1,0492	1,0052	26,21%	1621,74
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8061	1,0069	0,9711	21,70%	3093,49
			Base	0,8096	1,0107	0,9729	23,15%	2513,16
6	07/05/2014	15:50	Tope	0,8320	0,9748	0,9509	20,10%	3887,97
			Base	0,8504	0,9922	0,9683	20,27%	3794,18
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8342	0,9442	0,9267	18,92%	4605,14
			Base	0,8167	0,9514	0,9291	19,84%	4036,09
8	22/05/2014	2:00 p. m.	Tope	0,8345	0,9689	0,9539	12,56%	11444,40
			Base	0,8531	0,9746	0,9634	10,15%	16158,96

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M15							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8249	1,0778	0,9832	59,76%	44,11
			Base	0,8296	1,0777	0,9862	58,43%	46,64
2	03/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8722	1,0784	1,0348	26,81%	1486,46
			Base	0,8902	1,1002	1,0536	28,52%	1164,45
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8641	1,0559	1,0158	26,43%	1569,71
			Base	0,8773	1,0603	1,0209	27,44%	1359,56
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8343	1,0383	0,9961	26,08%	1650,92
			Base	0,8271	1,0289	0,9873	25,97%	1678,10
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8080	0,9928	0,9559	24,95%	1941,57
			Base	0,8050	0,9864	0,9488	26,15%	1635,42
6	07/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8234	0,9775	0,9488	22,89%	2608,82
			Base	0,8389	0,9917	0,9630	23,13%	2520,76
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8367	0,9922	0,9649	21,29%	3276,88
			Base	0,8235	0,9607	0,9360	21,96%	2981,02
8	22/05/2014	2:00 p. m.	Tope	0,8555	1,0079	0,9861	16,69%	6334,99
			Base	0,8418	0,9778	0,9576	17,44%	5688,42

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M19							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8101	1,1058	0,9806	73,43%	26,46
			Base	0,8300	1,1251	0,9988	74,82%	25,26
2	10/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8769	1,0984	1,0337	41,26%	187,70
			Base	0,8616	1,0929	1,0206	45,47%	102,72
3	23/04/2014	3:45	Tope	0,8568	1,0875	1,0150	45,83%	97,61
			Base	0,8404	1,0822	1,0053	46,63%	86,97
4	30/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,7890	0,9953	0,9524	26,25%	1610,51
			Base	0,8135	1,0294	0,9825	27,75%	1299,74
5	07/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8147	0,9750	0,9443	23,69%	2325,89
			Base	0,8351	0,9899	0,9585	25,45%	1808,33
6	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8593	1,0242	0,9915	24,74%	2002,02
			Base	0,8446	0,9909	0,9627	23,88%	2263,52
7	22/05/2014	2:00 p. m.	Tope	0,8072	0,9643	0,9372	20,85%	3494,37
			Base	0,8257	0,9806	0,9538	20,92%	3457,04

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M25							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8302	1,2057	0,9802	150,33%	4,48
			Base	0,8196	1,1933	0,9766	138,03%	5,53
2	03/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8788	1,2372	1,0385	124,42%	7,16
			Base	0,8765	1,2223	1,0428	107,94%	10,18
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8411	1,0315	0,9957	23,16%	2509,94
			Base	0,8575	1,0357	0,9952	29,41%	1024,68
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8222	1,0112	0,9752	23,53%	2379,42
			Base	0,8186	1,0215	0,9767	28,34%	1195,28
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8086	1,0175	0,9745	25,92%	1689,76
			Base	0,8084	0,9977	0,9601	24,79%	1987,58
6	07/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8308	0,9826	0,9544	22,82%	2635,57
			Base	0,8473	1,0027	0,9751	21,60%	3138,44
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8261	0,9946	0,9654	20,96%	3436,90
			Base	0,8175	0,9833	0,9558	19,88%	4010,48
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8749	1,0160	0,9977	14,90%	8186,12
			Base	0,8259	0,9580	0,9396	16,18%	6814,30

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S1 M29							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,7900	1,1860	0,9691	121,11%	7,65
			Base	0,8017	1,1401	0,9463	134,02%	5,95
2	03/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8809	1,1499	1,0292	81,39%	20,50
			Base	0,8842	1,1431	1,0326	74,46%	25,56
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8591	1,0410	1,0010	28,19%	1220,82
			Base	0,8593	1,0533	1,0132	26,06%	1657,01
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8283	1,1320	0,9937	83,62%	0,44
			Base	0,8535	1,1340	1,0110	78,10%	0,96
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8134	1,0165	0,9756	25,22%	1868,87
			Base	0,7942	1,0115	0,9656	26,78%	1493,89
6	08/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8272	0,9854	0,9582	20,76%	3536,06
			Base	0,8347	0,9996	0,9696	22,24%	2862,55
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8517	0,9580	0,9395	21,07%	3383,82
			Base	0,8637	0,9782	0,9586	20,65%	3592,23
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8278	0,9741	0,9527	17,13%	5946,80
			Base	0,8819	1,0273	1,0062	16,98%	6083,47

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S2 M5							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	28/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8854	1,1062	1,0593	26,97%	1453,77
			Base	0,8705	1,0765	1,0373	23,50%	2389,05
2	04/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8987	1,0892	1,0555	21,49%	3185,49
			Base	0,8662	1,0589	1,0266	20,14%	3867,84
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8610	1,0378	1,0133	16,09%	6908,90
			Base	0,8666	1,0536	1,0177	23,76%	2302,42
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	0,8472	1,0478	1,0120	21,72%	3081,84
			Base	0,8282	1,0267	0,9932	20,30%	3777,04
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8294	1,0300	1,0051	14,17%	9088,85
			Base	0,8252	1,0252	0,9978	15,87%	7121,71
6	08/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8466	0,9709	0,9559	13,72%	9691,39
			Base	0,8395	0,9937	0,9732	15,33%	7696,58
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8509	0,9470	0,9414	6,19%	28517,80
			Base	0,8397	0,9355	0,9283	8,13%	21604,15
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8215	0,9482	0,9369	9,79%	17019,07
			Base	0,8178	0,9475	0,9345	11,14%	14031,76

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S2 M11							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	28/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8998	1,2785	1,0611	134,78%	5,87
			Base	0,8979	1,2736	1,0658	123,76%	7,25
2	04/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8837	1,1430	1,0483	57,53%	48,46
			Base	0,8953	1,1438	1,0529	57,68%	48,16
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8478	1,0460	1,0008	29,54%	1005,67
			Base	0,8567	1,0516	1,0064	30,19%	916,12
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	1,7315	1,9543	1,8997	32,46%	662,07
			Base	1,7839	1,9750	1,9343	27,06%	1434,81
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8121	1,0007	0,9663	22,31%	2834,00
			Base	0,8080	1,0187	0,9760	25,42%	1815,86
6	08/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8318	0,9722	0,9466	22,30%	2837,67
			Base	0,8371	0,9833	0,9547	24,32%	2124,77
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8671	1,0290	0,9959	25,70%	1743,96
			Base	0,8428	1,0153	0,9816	24,28%	2137,04
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8142	0,9618	0,9370	20,20%	3835,69
			Base	0,8180	0,9662	0,9399	21,58%	3147,97

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S2 M15							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	27/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,9192	1,2759	1,0743	129,98%	6,42
			Base	0,8641	1,1754	0,9953	137,27%	5,61
2	04/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8684	1,1407	1,0212	78,21%	22,63
			Base	0,8836	1,1613	1,0385	79,28%	21,88
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8420	1,0407	0,9881	36,00%	398,68
			Base	0,8424	1,0455	0,9847	42,73%	152,20
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	1,7433	1,9313	1,8953	23,68%	2327,24
			Base	1,7320	1,9458	1,9030	25,03%	1919,47
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8043	0,9989	0,9648	21,25%	3299,83
			Base	0,8153	1,0217	0,9755	28,84%	1112,29
6	08/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8567	0,9985	0,9700	25,15%	1885,35
			Base	0,8359	0,9688	0,9434	23,63%	2346,09
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8488	1,0219	0,9892	23,29%	2462,21
			Base	0,8726	1,0399	1,0090	22,65%	2697,27
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8180	0,9598	0,9387	17,48%	5657,95
			Base	0,8058	0,9463	0,9234	19,47%	4253,95

	SUCCION DEL PAPEL FILTRO S2 M23							Succión (kPa)
	Fecha	Hora	Bolsa hermetica	W bolsa (gr)	W b + pf humedo (gr)	W b+ pf seco (gr)	ω papel filtro (%)	
1	28/03/2014	5:00 p. m.	Tope	0,8947	1,2687	1,0587	128,05%	6,66
			Base	0,9019	1,2630	1,0615	126,25%	6,90
2	04/04/2014	3:30 p. m.	Tope	0,8746	1,0919	1,0260	43,53%	135,71
			Base	0,8844	1,1051	1,0402	41,66%	177,42
3	10/04/2014	3:45	Tope	0,8926	1,0786	1,0401	26,10%	1646,17
			Base	0,8575	1,0461	1,0036	29,09%	1073,06
4	23/04/2014	4:10 p. m.	Tope	1,7413	1,9255	1,8861	27,21%	1404,56
			Base	1,7452	1,9180	1,8832	25,22%	1868,44
5	30/04/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8258	1,0206	0,9839	23,21%	2489,67
			Base	0,8050	1,0001	0,9626	23,79%	2290,80
6	08/05/2014	3:50 p. m.	Tope	0,8325	0,9864	0,9544	26,25%	1611,34
			Base	0,8255	0,9937	0,9540	30,89%	828,58
7	14/05/2014	3:00 p. m.	Tope	0,8086	0,9776	0,9408	27,84%	1283,99
			Base	0,8585	1,0351	0,9974	27,14%	1418,33
8	09/01/1900	2:00 p. m.	Tope	0,8283	0,9768	0,9508	21,22%	3310,07
			Base	0,8375	0,9821	0,9578	20,20%	3833,46

11. ANEXO IV

REGISTRO FOTOGRÁFICO

EXPLORACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS EN LA ZONA



Asentamiento de Tanque de Agua por problemas de desecación en la zona de estudio.



Fin de vida útil de asfalto presentada en la vía de estudio



Fin de vida útil, junto a grietas longitudinales al borde de la vía de estudio



Piel de cocodrilo al borde de la vía de estudio junto a bache ocasionado por fin de vida útil



Registro de depresiones presentadas en la vía de estudio



Piel de cocodrilo y grietas longitudinales presentadas a lo largo del ancho de la vía de estudio

PERFORACIÓN Y MUESTREO



Arcilla encontrada en los primeros seis metros, levemente fisurada, con oxidaciones y con presencia de raíces



Arcilla encontrada en los primeros seis metros (Izquierda) vs arcilla encontrada a los quince metros (Derecha).



Arcilla encontrada de 3.00 a 3.50 metros para el sondeo 1



Extracción de muestras a partir de tubo SPT.



Extracción muestra en Molde CBR.



Arcilla encontrada a los 20 metros de profundidad



Cerramiento lugar de perforación para el sondeo uno



Instalación de tanque o pozo de retorno para lavado de perforación mecánica



Instalación de torre para extracción de muestras



Grupo de trabajo instalando torre.



Arcilla encontrada en los primeros metros, con alto contenido de materia orgánica



Extracción de muestras, llevado a cabo por el perforador y sus dos auxiliares.

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN



Muestras debidamente empacadas y recepcionadas en laboratorio de suelos USTA.



Preparación de muestras para ensayos



Ensayos de gravedad específica.



Preparación ensayos de límites de consistencia.



Ejecución ensayo de límites de consistencia



Equipos y herramientas usados en el laboratorio de suelos de la USTA

ENSAYOS DE MEDICIÓN DE SUCCIÓN MATRICIAL



Equipos usados para medir humedad en papel filtro.



Papel Whatman # 42 (calibrado), usado para medir succión



Muestra en proceso de tallado



Papel filtro en contacto directo con muestra de suelo.



Balanza de precisión 0.0001 usada para el ensayo o.



Preparación de muestras para el ensayo o, con las debidas precauciones.



Acrílicos colocados en tope y base de la muestra.



Muestra envuelta en papel hermético



Muestra en vuelta en papel de burbujas.



Muestras puestas sobre nevera de icopor para conservar temperatura y preservar equilibrio.



Muestras debidamente selladas.



Mesa de trabajo.

ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN



Tallada de muestras para ensayo



Muestra debidamente colocada en el anillo



Piedra porosa y papel filtro colocadas sobre la base de la cámara de consolidación



Piedra porosa colocada sobre la parte superior de la muestra para garantizar condición drenada.



Revisión de nivel sobre la muestra



Consolidación en ejecución.