

Maestría en Ingeniería Civil

**Dependencia de las propiedades de retención de agua en suelos
caoliníticos de acuerdo con los contenidos de microalgas fosilizadas
adicionadas artificialmente**

Ing. Wilmar Castro Rincón

Bogotá, 6 de noviembre de 2019



**Dependencia de las propiedades de retención de agua en suelos
caoliníticos de acuerdo con los contenidos de microalgas fosilizadas
adicionadas artificialmente**

**Tesis para optar por el título de magister en ingeniería civil con
énfasis en Geotecnia**

Juan Carlos Ruge, I.C. PhD

Director

Bogotá, 6 de noviembre de 2019

La tesis de maestría titulada “Dependencia de las propiedades de retención de agua en suelos caolíníficos de acuerdo con los contenidos de microalgas fosilizadas adicionadas artificialmente” presentada por Wilmar Castro Rincón cumple con los requisitos para optar por el título de Magister en ingeniería civil con énfasis en geotecnia



Juan Carlos Ruge PhD

Director de tesis

Catalina Lozada

Jurado 1

Jairo Marín Espitia

Jurado 2

Bogotá, D.C., 6 de noviembre de 2019

A mis hijas y esposa

Agradecimientos

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, mis proyectos y por permitirme por medio de ésta tesis acercarme a cumplir una más de mis metas. A mis hijas Isabella y Ana María por ser mi motivo y constante fuente de inspiración, a mi esposa por su compañía y apoyo permanente, a las tres por ser cada una a su manera cómplices de mis proyectos por entender que el sacrificio constituye parte fundamental de nuestra construcción como ser humano y del éxito, y que el mismo no tiene sentido si no se pone al servicio no solo de quienes amamos sino de todos los que nos rodean.

Al ingeniero Juan Carlos Ruge por su apoyo y guía durante todo este proceso.

Resumen

En la ciudad de Bogotá se han encontrado casos en los que los suelos presentan un ángulo de fricción interna relativamente alto, para suelos blandos (Moya y Rodríguez, 1987). Estos suelos, al igual que los de Ciudad de México, contienen diatomáceas en la composición de las arcillas, por ello, dichos valores, inusualmente altos, han sido atribuidos al contenido de microalgas fosilizadas (Caicedo et al., 2019; Caicedo et al., 2018; Caicedo y Mendoza, 2018).

El presente trabajo explora la posible incidencia de las microalgas fosilizadas en el comportamiento de suelos arcillosos parcialmente saturados. Para lograr este cometido, se empleó una muestra de Caolín, a la cual se le incluyeron porcentajes diferentes de microalgas (5%, 10%, 20% y 40%).

Para determinar la posible influencia sobre la curva SWCC, debido a la inclusión de microalgas fosilizadas, se realizaron ensayos para medir la succión por medio de diferentes métodos (Placa de succión, Método Papel filtro, Tensiómetros e higrómetro de punto de rocío). Adicionalmente, se realizaron ensayos imagenológicos y mineralógicos para conocer la microestructura y composición del material, usando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Difracción de Rayos X, esto con el fin de determinar la posible influencia de la inclusión de microalgas fosilizadas en la respuesta no saturada del material.

Abstract

In Bogotá, cases have been found where the soils have an internal friction angle of 35° (Moya and Rodriguez, 1987), these soils, like those in Mexico City, contain diatoms in the clay composition. These unusually high values have been attributed to the content of fossilized microalgae (Caicedo et al, 2019; Caicedo et al, 2018; Caicedo & Mendoza, 2018).

This work explores the possible incidence of fossilized microalgae (diatoms) in the behavior of partially saturated clay soils, to achieve this task a sample of Kaolin was used, which includes different percentages of microalgae (5%, 10%, 20% and 40%).

To determine the possible influence on the water retention properties, due to the inclusion of fossilized microalgae, tests were carried out to measure the suction by different methods (Suction Plate, Filter Paper Method, Tensiometers and Dew Point Hygrometer), additionally Imaging tests were performed to know the microstructure of the material, using Scanning Electron Microscopy (SEM), in order to determine the possible influence of the inclusion of fossilized microalgae in the unsaturated response of the material.

Índice General

Capítulo 1	20
Preliminares	20
1.1. Pregunta Problema	20
1.2. Objetivo General	20
1.3. Objetivos Específicos	20
1.4. Justificación.....	20
Capítulo 2	22
Estado actual del conocimiento.....	22
2.1. Suelos Diatomáceos.....	28
2.1.1. Aplicaciones para diatomeas.....	29
2.1.2. Características geotécnicas de suelos con microfósiles.	31
Capítulo 3	43
Construcción de la curva característica suelo - agua	43
3.1. Curva característica Suelo – Agua (SWCC)	43
3.1.1. Secciones de la curva SWCC.....	45
3.1.2. Factores que afectan la curva característica.....	46
3.1.3. Modelo de Van Genuchten	52
3.2. Ensayos para la obtención de succión.....	53

3.2.1. Succión de un suelo con papel de filtro.	53
3.2.2. Método de placa de succión.	54
3.2.3. Higrómetro de punto de rocío WP4C.	56
3.2.4. Diferencia de tensiómetros (HYPROP).	57
Capítulo 4	60
Metodología	60
4.1. Introducción.....	60
4.2. Metodología utilizada.....	60
4.2.1. Método del papel filtro.	63
4.2.2. Placa de succión.	65
4.2.3. HYPROP.	67
4.2.4. WP4C.- Higrómetro de punto de rocío.....	80
4.3. Análisis no Convencionales de las muestras	83
4.3.1. Microscopio electrónico de barrido (SEM)	83
4.3.2. Difracción de Rayos X – DRX.....	85
4.4. Actividades y alcance de las actividades	86
4.4.1. Fase 1 recopilación de información.	86
4.4.2. Fase 2 preparación de muestras y caracterización.....	86
4.4.3. Fase 3 ejecución de ensayos	87

4.4.4. Fase 4 Análisis de resultados y discusión.....	87
Capítulo 5	88
Ensayos de laboratorio y análisis de resultados.....	88
5.1. Difracción de Rayos X – DRX.....	88
5.2. Microscopio Electrónico de Barrido	89
5.2.1. Muestra sin adición de microalgas.....	89
5.2.2. Muestra con 10% de microalgas adicionadas.....	90
5.2.3. Muestra con 40% de adición de microalgas.....	91
5.3. Curva SWCC Muestra inalterada.....	93
5.4. Curvas con variaciones en el contenido de microalgas fosilizadas	96
5.4.1 Curva característica con adición del 5% de microalgas fosilizadas.....	96
5.4.2. Curva característica con adición del 10% de microalgas fosilizadas.....	98
5.4.3. Curva característica con adición del 20% de microalgas fosilizadas.....	100
5.4.4. Curva característica con adición de 40% de microalgas fosilizadas.....	102
Conclusiones	105
Referencias Bibliográficas.....	108
6. Apéndices	116
6.1. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 5% de diatomeas	116

6.2. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo.....	116
6.3. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 10% de diatomeas.....	116
6.4. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 20% de diatomeas.....	116
6.5. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 40% de diatomeas.....	116

Índice de tablas

Tabla 1 Métodos utilizados para obtener la succión	22
Tabla 2 Ensayos de caracterización no convencional y de obtencion de la succión para muestras de suelo bajo estudio	61
Tabla 3 Resultados de DRX para muestra de caolín.....	88
Tabla 4 Resultados de DRX para muestra de caolín con adicipin de 40% de diatomeas	89
Tabla 5 Resultados de ensayo de succión por el método de papel filtro	93

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Curva de retención para mezclas de suelos diatomáceos con arena	24
<i>Figura 2.</i> Campos de Aplicación para la investigación de Diatomeas.....	25
<i>Figura 3.</i> Fotomicrografía que ilustra la forma de las partículas del suelo de la Ciudad de México a) Partículas de limo, b) valvas de ostrácodos, c) y d) frústulas de diatomeas, e) Pirita framboidal, f) partículas con estructura floclada.....	26
<i>Figura 4.</i> Correlación del Contenido de Sílice con el contenido de agua el límite líquido	27
<i>Figura 5.</i> Fotomicrografías de diatomeas: a) <i>Biddulphia reticulata</i> . Caparazón o frústula de una diatomea céntrica mostrando valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm). b) <i>Eupodiscus radiatus</i> . Valva simple de una diatomea céntrica (Tamaño de la barra = 20 μm). c) <i>Diploneis</i> sp. Dos frústulas de diatomea pinnada donde se observan las estrías, valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm). d) <i>Melosira varians</i> . Frústula de una diatomea céntrica, mostrando valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm).....	28
<i>Figura 6.</i> a) Microfósiles de foraminífera del Sur Oeste del Pacífico b) Microfósiles de cocolito del Sur Oeste del Pacífico. c) Microfósiles de diatomea localizados en el lago Toskaljarvi, Finlandia (Universidad de Edimburgo). d) Microfósil de radiolaria (Universidad de Dayton).	30
<i>Figura 7.</i> <i>Distribución general de sedimentos oceánicos</i>	31
<i>Figura 8:</i> Fotomicrografía que ilustra la forma de las partículas en el suelo de la Ciudad de México: a) partículas de limo, b) valvas de ostrácodos, c) y d) frústulas de diatomeas, e) Pirita framboidal, f) partículas con estructura floclada.....	33
<i>Figura 9.</i> Correlación del contenido de sílice con el contenido de agua y límite líquido.	34
<i>Figura 10.</i> Correspondencia entre relación de vacíos, coeficiente de permeabilidad y sílice biogénica de pruebas de consolidación. Los puntos representan la permeabilidad calculada	

para cada incremento de carga. Las líneas discontinuas son las tendencias aparentes para cada sitio.....	35
<i>Figura 11.</i> Fotomicrografías de Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) a) Valvas de diatomeas pinnadas, b) Valvas de diatomeas céntricas, c) Esqueleto de radiolaria ligeramente corroído (centro) en una matriz compuesta de fragmentos de diatomeas pinnadas en su mayoría (Rack y Palmer-Julson, 1992)	37
<i>Figura 12.</i> Microestructura posterior a la consolidación en diatomita natural (),	41
<i>Figura 13.</i> Envoltente de resistencia al corte no drenado para diatomita inalterada	42
<i>Figura 14.</i> Esquema de un suelo saturado conectado a una bureta llena de agua.....	43
<i>Figura 15.</i> Curva característica para suelos con diferentes texturas	44
<i>Figura 16.</i> Regiones típicas de la curva característica	45
<i>Figura 17.</i> Curva característica para 3 tipos de suelos (Suelo 1: SM, Suelos 2: CL, Suelo 3: CH) Energía de compactación.....	46
<i>Figura 18.</i> Efecto de la energía de compactación en la curva característica. Suelo CH	47
<i>Figura 19.</i> Efecto de la densidad en la curva característica	47
<i>Figura 20.</i> Compactación y curvas características	48
<i>Figura 21:</i> Efecto del contenido de agua de compactación en la curva característica	48
<i>Figura 22.</i> Curvas características para un till de Canadá a diferentes contenidos de agua inicial	49
<i>Figura 23:</i> Efecto del tipo de compactación en la relación de succión contra contenido de agua gravimétrico.....	50

<i>Figura 24.</i> Efecto de estados de esfuerzos en la curva característica	50
Figura 25: Efecto de la técnica de saturación en la determinación de la curva característica....	51
<i>Figura 26.</i> Placa de succión	55
<i>Figura 27.</i> Higrómetro de punto de rocío.....	57
<i>Figura 28.</i> Rangos de medida de HYPROP y WP4C	58
Figura 29: Curvas por medio arrojadas por HYPROP y WP4C: A: Métodos húmedo y seco. B: método seco.....	58
<i>Figura 30.</i> Preparación de la muestra	62
<i>Figura 31.</i> Montaje de muestras para el ensayo de papel filtro	63
<i>Figura 32.</i> Curva de calibración del papel filtro (Norma I.NV. E-159-07)	64
<i>Figura 33.</i> Detalle de Placa de succión	65
<i>Figura 34.</i> Preparación de la muestra – molde con disco de saturación, papel filtro y tapa	67
<i>Figura 35.</i> Llenado de la bandeja.....	68
<i>Figura 36.:</i> Configuración de la muestra para evitar evaporación del agua de la muestra.....	68
<i>Figura 37</i> Montaje del sistema	69
<i>Figura 38.</i> Llenado del sensor.....	70
<i>Figura 39.</i> Llenado del sensor.....	70
Figura 40: Válvula de entrada de aire	71
<i>Figura 41</i> Esquema de saturación de los medidores de cerámica.....	72

<i>Figura 42.</i> Generando vacío en las jeringas.....	72
<i>Figura 43.</i> Instalación de la pieza tubular.....	73
<i>Figura 44.</i> Colocación del medidor en cerámica.....	73
<i>Figura 45</i> Retenedores para la jeringa de vacío.....	74
<i>Figura 47.</i> Remoción de aire residual del sistema.....	75
<i>Figura 48</i> Llenado del depósito del sensor.....	75
<i>Figura 49.</i> Llenado del depósito del sensor.....	76
<i>Figura 50.</i> Preparación de la muestra para ensamblaje.....	77
<i>Figura 51.</i> Ensamblaje del sensor y la muestra.....	78
<i>Figura 52.</i> Ensamblaje final para iniciar la medición.....	78
<i>Figura 53.</i> Montaje para toma de mediciones.....	79
<i>Figura 54.</i> Equipo WP4C.....	80
<i>Figura 55.</i> Técnicas para obtención de la curva de succión.....	82
<i>Figura 56.</i> Muestra sin adición de microalgas, amplificación 10000x.....	90

Introducción

La construcción de infraestructura más que un fin, constituye un medio por el cual áreas como la geotecnia se desarrollan y prosperan. Este avance continuo ha permitido evidenciar la complejidad y heterogeneidad de escenarios producto de la influencia del agua en el suelo, así como su impacto en la ejecución de diseños confiables, entre otros temas.

Los conceptos acerca de la mecánica de suelos clásica han sido desarrollados, en su mayoría, considerando suelos saturados, probablemente porque la saturación constituye la situación extrema y crítica para diversidad de obras, o por la facilidad de representación de un sistema bifásico; pero no constituye la condición en la que los vacíos del suelo no se encuentran totalmente ocupados por agua.

El suelo es un material multifase, generalmente presenta tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Cabe anotar que propiedades como resistencia, volumen y deformación son modificados e influenciados por un componente adicional llamado tensión de succión, generado por la interacción entre el aire y el agua, así como el diámetro de los poros, involucrado en el análisis (Fredlund & Rahardjo, 1993).

La succión es, entre otros, el fenómeno responsable que permite construir un castillo de arena, realizar un corte con talud prácticamente vertical en un suelo arcilloso, que las dunas se rigidicen luego de una lluvia, y que un suelo fino pueda tener valores de CBR de hasta 80%. Por lo tanto, conocer los niveles de succión que ocurren en determinado perfil estratigráfico es una tarea complicada, pero importante: debido a las condiciones especiales en las que se puede encontrar un suelo y que influyen en los esfuerzos efectivos que actúan en la estructura del mismo. Es decir que, los esfuerzos efectivos son incrementados en un suelo no saturado por la acción de la succión y otros fenómenos físicos asociados.

El presente trabajo busca determinar la afectación de microalgas en las curvas de succión en suelos caoliníticos, para este fin se generaron curvas de succión en materiales sin adición y con adiciones del 5%, 10%, 20% y 40%. Finalmente se analizaron estas curvas para definir la posible influencia de las microalgas en el comportamiento de los suelos.

Cabe anotar que, para lograr una curva característica suelo – agua (SWCC), es necesario aplicar mínimo 3 metodologías, debido a que cada ensayo, es aplicable para un sector de la SWCC (Fredlund, 1999; Hosagasi, 2006).

Con el fin de determinar la posible influencia en las SWCC de un suelo caolinítico, al adicionar un porcentaje determinado de microalgas fosilizadas, se realiza primero la respectiva caracterización de las mismas, por diferentes métodos, adicionalmente se realiza la caracterización de los suelos por medio de ensayos no convencionales como DRX y análisis imagenológico usando MEB. Igualmente, se hizo necesario aplicar diferentes metodologías para obtener las curvas de retención del suelo con un amplio rango de valores de succión y diferentes porcentajes de suelos diatomáceos adicionados artificialmente.

La presentación de la investigación relacionada se organiza de la siguiente manera en el presente documento: En el primer capítulo se presenta una introducción del problema a tratar, así como una recopilación sobre el estado general del conocimiento en relación con los ensayos de curvas características SWCC y los diferentes métodos utilizados para su construcción, así como la naturaleza, características y usos de las microalgas fosilizadas. El capítulo II, a manera de marco teórico, presenta la diferente literatura revisada durante todo el proceso de investigación, con lo cual se pretende generar un compendio del estado del conocimiento actual acerca de diferentes ensayos realizados y la naturaleza de las microalgas fosilizadas.

En el tercer capítulo se presenta de manera detallada cada uno de los ensayos realizados en el presente proceso, así como la metodología usada para la ejecución de los mismos, para presentar, finalmente, la obtención de las curvas y la interpretación de los datos resultantes de este proceso.

En el capítulo IV se presentan ensayos de laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos, así como una descripción de la procedencia de las muestras. Cabe anotar que los formatos de ensayos se presentan en el anexo 1 de la presente tesis.

En el capítulo V se analizan los resultados obtenidos en laboratorio para las diferentes muestras y el comportamiento de las curvas SWCC con diferentes porcentajes adicionados de microalgas

fosilizadas (de 0% a 40%), a continuación, se aplican los criterios vistos anteriormente generando una curva modelo, por medio de criterios matemáticos preestablecidos, que presente un comportamiento similar a los obtenidos con los ensayos de laboratorio.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones resultado de la ejecución de los ensayos de laboratorio y la interpretación de las curvas obtenidas para cada uno de los casos estudiados.

Capítulo 1

Preliminares

1.1. Pregunta Problema

¿Es posible generar una curva de retención confiable de un suelo caolínico con contenidos diatomeicos, mediante el desarrollo de ensayos de laboratorio y metodologías matemáticas

1.2. Objetivo General

Generar curvas características de succión para una mezcla de suelos caolínico-arenosos considerando la variación en el contenido de microalgas fosilizadas

1.3. Objetivos Específicos

1. Caracterizar los materiales involucrados en la investigación mediante ensayos índice y análisis no convencionales como DRX, FRX y MEB, con el fin de determinar los contenidos idóneos de diatomeas a ser adicionados de manera artificial
2. Obtener mediante diferentes técnicas las curvas de retención del suelo seleccionado en un rango amplio de los valores de succión, y con diferentes porcentajes de suelos diatomáceos adicionados artificialmente.
- 3 Simular mediante metodologías numéricas el comportamiento de las curvas de retención.

1.4. Justificación

A la fecha la literatura sobre la influencia de diatomáceas en las características de los suelos es insuficiente, por lo cual se pretende realizar un trabajo de investigación que pueda

establecer si la adición de diferentes cantidades o porcentajes de diatomeas en suelos no saturados impactan la propiedad de succión de los suelos pudiendo de alguna manera mejorar las características y propiedades de los suelo y por consiguiente su uso brinde una alternativa a la ingeniería Civil en la utilización de suelos de mejores calidades en el proceso constructivo.

Capítulo 2

Estado actual del conocimiento

El presente capítulo presenta una recopilación sobre el estado general del conocimiento en relación con los ensayos de curvas características SWCC, los diferentes métodos utilizados para la construcción de la misma, la naturaleza, características y usos de las microalgas fosilizadas (Diatomeas).

En la actualidad, las mediciones de la relación humedad – succión se basan en procedimientos de ensayo estandarizados por normas como la AASTHO y la ASTM. Para Colombia, tales procedimientos se encuentran regulados fundamentalmente por el INVIAS mediante la norma INV E-157/13 “Determinación de la succión de un suelo con el método del papel filtro”.

Expuesto lo anterior, y como propósito de estas mediciones, surge la propuesta de generar la llamada curva de retención de agua (WRC o SWCC), también denominada curva característica. La curva característica puede ser obtenida mediante varios métodos, como los que se señala en la Tabla 1.

Tabla 1 Métodos utilizados para obtener la succión

Método	Planteamiento	Componente de la succión	Rangos succión (pF)
Placa de succión (Croney & Coleman, 1960; Coleman & Marsh, 1961)	Mecánico	Matricial	0 – 3,0
Placa de presión (Richards, 1941)	Mecánico	Matricial	0 – 4,2
Membrana de presión (Coleman, 1958; Richards, 1980)	-----	-----	0 – 5,2
Desecador de vacío (Aitchnson & Richards, 1965; Baker et al, 1973)	Termodinámico	Total	4,5 – 7,0
Psicrómetro (Spanner, 1951; Snethen, 1977; Daniel et al, 1981)	Termodinámico	Total	3,0 - 4,9
Papel de filtro (Gutiérrez, 1985; Duran, 1986)	Termodinámico	Matricial / Total	0 – 6,2

Nota: Tomada de Thomé (1993).

El comportamiento de la curva característica SWCC (Soil – Water Characteristic Curve), está relacionado con el tamaño de las partículas del suelo (Granulometría), así como con su estructura interna; debido a que la relación entre el contenido de agua y la succión está directamente relacionada con la distribución de las partículas de suelo, su densidad y mineralogía del suelo (Ning y Likos 2004; Charbeneau, 2000). Por tanto, es posible modificar este comportamiento al adicionar artificialmente otros materiales. Actualmente hay muy pocos estudios sobre curvas características en materiales con adiciones. Esta premisa brinda la justificación a esta investigación, debido a que es necesario explorar la influencia sobre la succión de la adición artificial de un material, pretendiendo abrir una línea de estudio del comportamiento no saturado en materiales compuestos. Este trabajo busca, como objetivo principal, obtener las curvas características para diferentes porcentajes de material añadido (microalgas fosilizadas).

El material seleccionado para el presente análisis fue un suelo diatomáceo que presenta características geotécnicas especiales, últimamente estudiadas por su gran contenido de microalgas fosilizadas. Algunos suelos arcillosos sedimentarios muestran una inesperada resistencia al corte, debido a la presencia de microalgas fosilizadas dentro de su estructura (Caicedo *et al*, 2016). La presencia de las diatomeas afecta la microestructura del suelo, influyendo en sus propiedades de retención de agua, así como en las características electroquímicas.

Es preciso mencionar que los textos y estudios sobre la caracterización de los suelos diatomáceos es extremadamente insuficiente, las pocas referencias que se encuentran sobre el tema, contemplan una serie de ensayos monotónicos precíclicos que, bajo ciertas condiciones, buscan establecer precisiones sobre el comportamiento de este tipo de suelos, desde el punto de vista geotécnico. Burger *et al* (2001) presentan una de las pocas aproximaciones al trabajo propuesto. En el trabajo citado se realizaron una serie de ensayos de curvas de retención usando *tempe cells* y placa de presión, en suelos diatomáceos con una mezcla de arena (Figura 1). En esta investigación, como se evidencia más adelante, se buscó determinar cuál es la influencia de agregar diferentes porcentajes de un suelo diatomáceo sobre una muestra de suelo mixto (caolín-arena), midiendo la succión mediante otras técnicas.

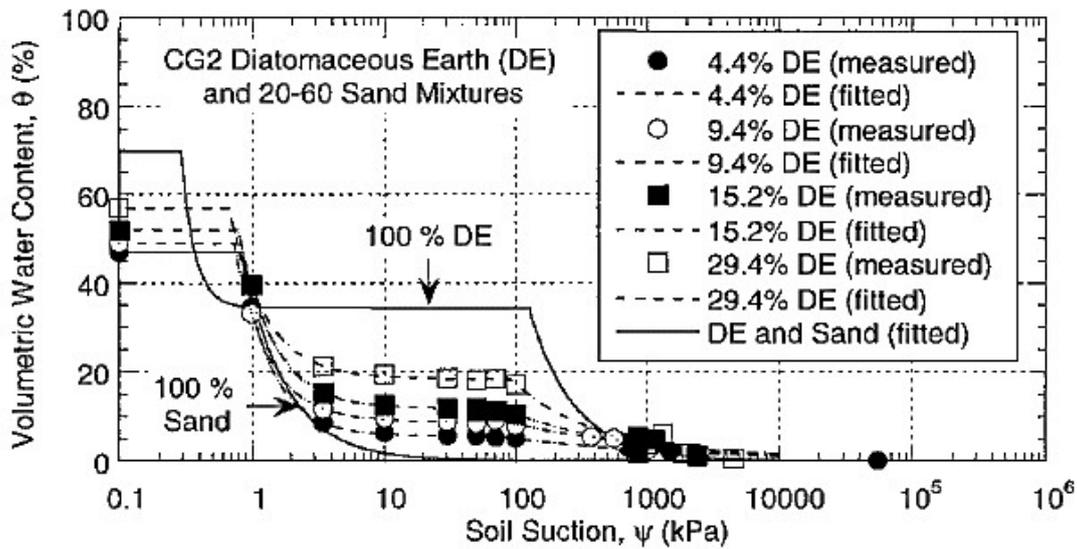


Figura 1. Curva de retención para mezclas de suelos diatomáceos con arena
Fuente: (Burger y Shackelford, 2001).

Sin embargo, este tipo de suelos está formado por sedimentos con altos contenidos de algas microscópicas de tipo diatomea, esto se asocia a su localización en lugares de alta actividad volcánica o tectónica, ambientes que favorecen su desarrollo (Talliaferro 1933).

Los sedimentos con presencia de microalgas poseen características físicas y mecánicas especiales, poco frecuentes en otro tipo de suelos. La razón principal de esta condición se atribuye a altos contenidos de agua, ángulos de fricción interna, alta resistencia al cortante (inusual en comparación con otros suelos finos), baja densidad relativa, alta permeabilidad, compresibilidad y porosidad, así como su alta capacidad de retener agua. Los estudios realizados sobre el comportamiento cíclico de los suelos diatomáceos se centran, en su gran mayoría, en lugares geográficos con alta actividad sísmica (Bradbury, 1999).

Sin embargo, el estudio de las diatomeas y sus aplicaciones se extienden a varios campos de investigación, tal como se muestra en la Figura 2:

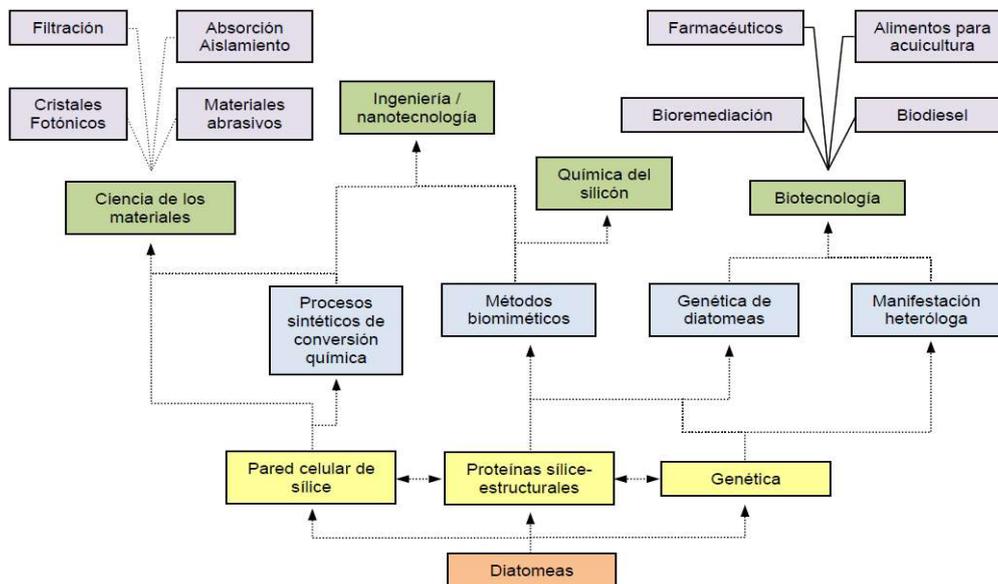


Figura 2. Campos de Aplicación para la investigación de Diatomeas
Fuente: (Modificado de López *et.al.*, 2005).

Por sus características y propiedades, la presencia de diatomeas en los suelos puede influenciar significativamente su comportamiento geotécnico. La presencia de microfósiles diatomáceos en los suelos arcillosos, así como de partículas de limo o arena, microfósiles de origen calcáreo y algunos otros elementos de origen orgánico e inorgánico colaboran para que estos suelos posean propiedades inusuales en comparación con otros suelos sedimentarios. De la misma manera, la interrelación entre estos, su afectación por diferentes fenómenos, así como por el tiempo, generan un comportamiento del suelo de alta complejidad que puede ser analizado por medio de diferentes experimentos en los que se presentan variaciones de algunos de sus componentes (López, 2009).

Es preciso mencionar que los estudios de este tipo de suelos, desde el punto de vista geotécnico han sido desarrollados en su gran mayoría en México. Concluyentemente se atribuyó a las diatomeas y a su gran capacidad de retener agua como responsables de las características tan

inusuales de los suelos en Ciudad de México, cuya estructura evidencia una alta relación de vacíos.

De acuerdo con varios estudios (Díaz Rodríguez y Santamaría 2001), la estructura de estos sedimentos está formada por un esqueleto granular y por partículas delgadas con alta superficie específica, las cuales pueden considerarse, en gran medida, como las responsables de los altos valores de límite líquido (Figura 3).

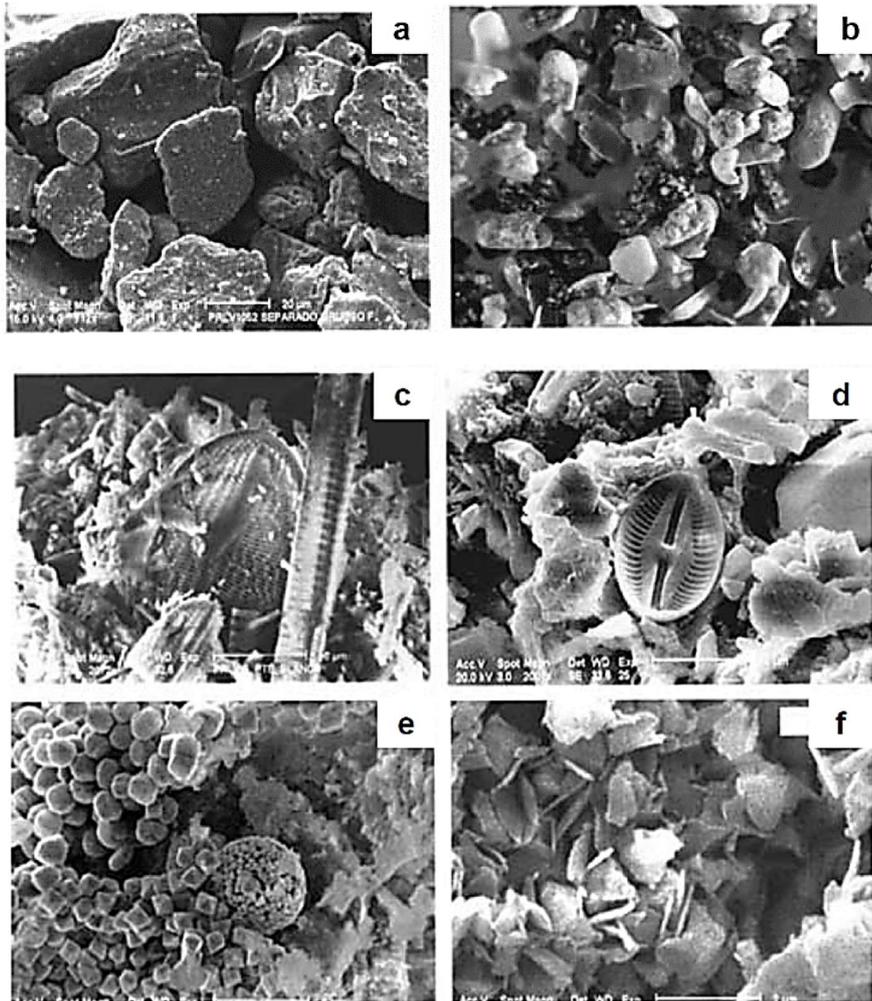


Figura 3. Fotomicrografía que ilustra la forma de las partículas del suelo de la Ciudad de México a) Partículas de limo, b) valvas de ostracódos, c) y d) frústulas de diatomeas, e) Pirita framboidal, f) partículas con estructura floculada
Fuente: (Díaz Rodríguez y Santamaría 2001).

En la Figura 4 se observan las correlaciones de tres sitios diferentes del incremento del contenido de agua y límite líquido, en relación con el contenido de sílice biogénica. A continuación, se presentan los resultados encontrados en la relación de vacíos y el coeficiente de permeabilidad y su relación con la sílice de biogénica presente.

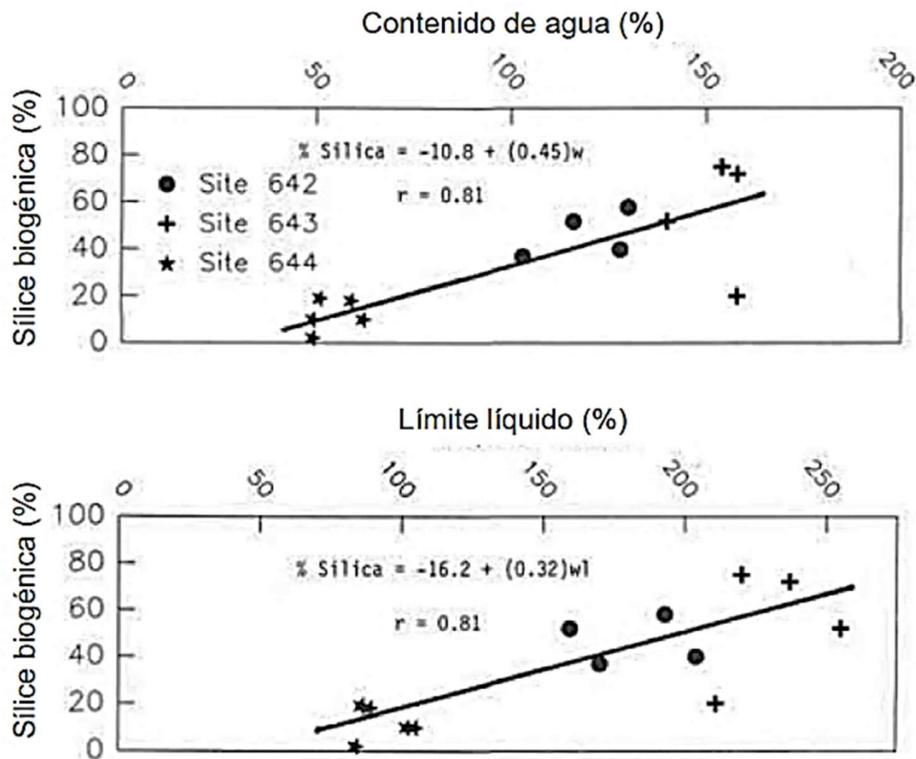


Figura 4. Correlación del Contenido de Sílice con el contenido de agua el límite líquido
Fuente: Pittenger et al. (1989)

Esta caracterización hace referencia a la gran capacidad portante de estos suelos y sus correspondencias, las que constituyen el objeto del presente trabajo, en términos de la utilización de diferentes métodos de medición de valores de succión y la aplicación de las curvas correspondientes.

2.1. Suelos Diatomáceos

Las diatomeas son algas unicelulares que constituyen uno de los grupos más comunes de fitoplancton. Muchas de estas están recubiertas por una pared celular única hecha de sílice opalino llamada frústula, la que usualmente forman dos partes asimétricas con una división. Al ser algas unicelulares, se pueden encontrar en la mayoría de ambientes acuáticos y semiacuáticos. De acuerdo con la morfología de su frústula se pueden encontrar alrededor de 100.000 especies diferentes. Su tamaño suele variar entre 10 μm y 100 μm .

Igualmente, por su forma, se pueden distinguir dos grupos principales: Céntricas, las cuales son simétricas radialmente y Pinnadas, que presentan formas alargadas y con estrías en el eje más largo. Independientemente de esta clasificación, los caparazones de las diatomeas se presentan de varias formas y tamaños (Bradbury, 2004).

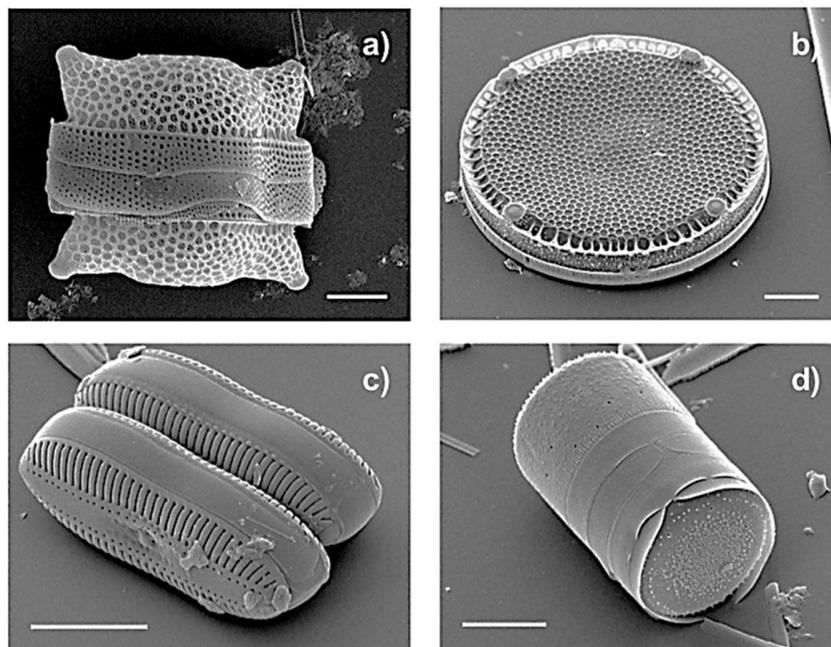


Figura 5. Fotomicrografías de diatomeas: a) *Biddulphia reticulata*. Caparazón o frústula de una diatomea céntrica mostrando valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm). b) *Eupodiscus radiatus*. Valva simple de una diatomea céntrica (Tamaño de la barra = 20 μm). c) *Diploneis* sp. Dos frústulas de diatomea pinnada donde se observan las estrías, valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm). d) *Melosira varians*. Frústula de una diatomea céntrica, mostrando valvas y lado conectivo (Tamaño de la barra = 10 μm).

Fuente: (Bradbury, 2004)

Las diatomeas poseen la capacidad de producir su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas (Autótrofos), esta característica las convierte en parte esencial de la cadena alimenticia en ecosistemas acuáticos. (López, 2009).

Las diatomeas pinnadas se encuentran de forma predominante en agua dulce y en ambientes marinos profundos. Las diatomeas céntricas prosperan en aguas marinas, especialmente en latitudes subpolares y templadas.

2.1.1. Aplicaciones para diatomeas.

Dadas las características en la estructura celular de las diatomáceas, que las hace diferentes de las que se pueden encontrar en plantas o animales, su estudio para aplicaciones de ingeniería se hace muy frecuente. El estudio del proceso de reproducción da parámetros para la manipulación de las formas y, de esta manera, ser utilizadas como biomateriales (López *et al.*, 2005). Otro uso de las diatomeas es el de bioremediación de suelos contaminados con metales pesados, así como el control de filtraciones (Burger y Shackelford, 2001; López *et al.*, 2005). De igual forma, gracias a sus capacidades filtrantes y su alto ángulo de fricción interna, se han estudiado como materiales de relleno (Khilnani y Capik, 1989; Day, 1995).

Geológicamente, los microfósiles con tamaños menores a 1 mm pueden ser divididos en dos categorías dependiendo de su génesis y la composición química de los esqueletos: Calcárea o Silícica.

De acuerdo con López (2009), los microfósiles calcáreos incluyen a los de foraminífera (Figura 6a) y cocolito (Figura 6b), mientras que los silícicos incluyen los de diatomea (Figura 6c) y radiolaria (Figura 6d).

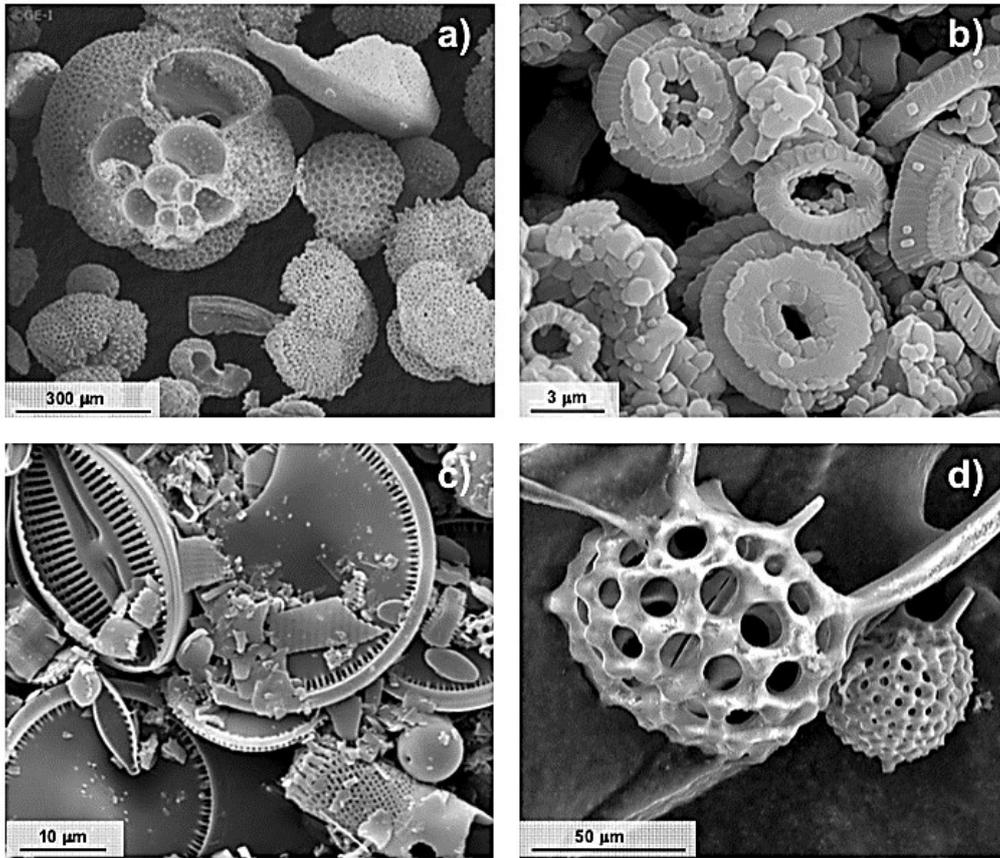


Figura 6. a) Microfósiles de foraminífera del Sur Oeste del Pacífico b) Microfósiles de coccolito del Sur Oeste del Pacífico. c) Microfósiles de diatomea localizados en el lago Toskaljarvi, Finlandia (Universidad de Edimburgo). d) Microfósil de radiolaria (Universidad de Dayton). Fuente: (López, 2009).

López (2009), citando las investigaciones de Boltovskoy (1998), establece que la localización de microfósiles depende de factores ambientales diversos. De acuerdo con dichos estudios, los microfósiles silíceos se encuentran principalmente en aguas superficiales de latitudes polares y en el Atlántico norte, en especial, los de diatomeas. En cuanto a los fósiles de radiolaria, estos están más limitados al Océano Pacífico, cubriendo una banda ancha en la región ecuatorial. Por su parte, los sedimentos calcáreos se encuentran en las porciones oceánicas de mayor profundidad (López, 2009), como se observa a continuación:

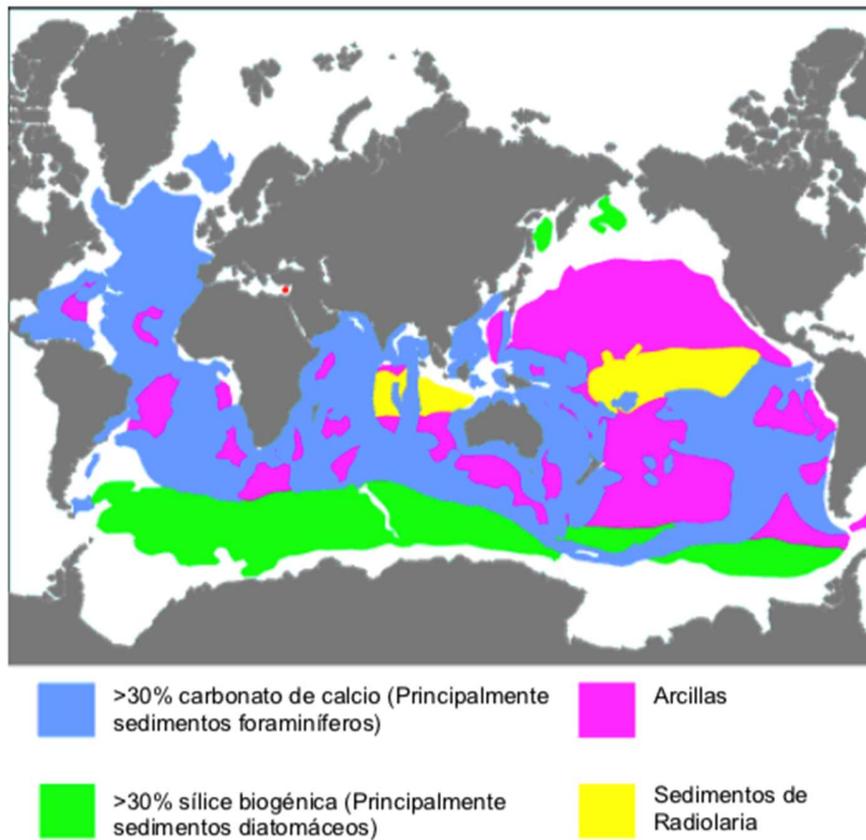


Figura 7. Distribución general de sedimentos oceánicos
Fuente: (Boltovskoy, 1998)

2.1.2. Características geotécnicas de suelos con microfósiles.

Dada la extensión de los depósitos con microfósiles diatomáceos, estos se han estudiado con diferentes propósitos como: explotación de recursos naturales, caracterización paleontológica y construcción de obras civiles.

Los depósitos encontrados en Ciudad de México son los suelos con microfósiles diatomáceos con mayores estudios; los primeros, de caracterización de estos suelos, fueron realizados por Zeevaert (1949), Marsal y Mazari (1959) y Lo (1962).

Mesri *et al.* (1975), por su parte, realizaron estudios en Ciudad de México para determinar propiedades de compresibilidad. Como resultados de estos estudios, se determinó su composición de la siguiente manera:

De 5% a 10% de partículas tamaño arena, de las cuales, la mayoría son oolitos calcáreos (el resto de esta fracción es un conjunto de minerales pesados); del 55% al 65% está compuesto por microfósiles silíceos de tamaño limo, la mayor parte diatomeas; del 20% al 30% lo componen partículas tamaño arcilla, de las cuales un estimado de 10% son esmecita y el resto es sílice biogénica o volcánica; el restante 5 a 10% es materia orgánica (López, 2009, p.19).

De acuerdo con lo anterior, el agua contenida en las diatomeas es la causante de valores muy altos en parámetros como el ángulo de fricción; inusualmente altos en conjunto con los altos valores de plasticidad. Esta combinación de valores no se encuentra normalmente en suelos arcillosos, en los que el valor del ángulo interno de fricción disminuye con el aumento de plasticidad. A continuación, se presentan los rangos de valores que arrojaron estos estudios, de acuerdo con Díaz-Rodríguez y Santamaría (2001), Mesri *et al.* (1975), Díaz-Rodríguez y Martínez-Vásquez (2008), Lo (1962) y Díaz-Rodríguez *et al.* (1992):

Humedad: 220% – 420%

Relación de vacíos: 5 – 10

Límite líquido: 110% – 458%

Límite plástico: 37% – 116%

Índice de plasticidad: 73% – 342%

Índice de compresibilidad: >8

Ángulo de fricción interna: 43° – 47°

Granulométricamente los suelos de ciudad de México se componen principalmente de limos arcillosos y arcillas limosas con partículas angulares, conformadas por vidrios y fragmentos de diatomeas; adicionalmente se encontraron cristales de pirita y algunas estructuras focoladas de arcilla (Figura 8).

Los altos valores de la relación de vacíos son atribuidos a la estructura abierta que presentan los suelos, que a su vez se atribuye a la baja velocidad de sedimentación (Díaz-Rodríguez, et al., 1998 y Díaz-Rodríguez, 2006). De igual manera, las observaciones hechas en estos estudios arrojan que los suelos de Ciudad de México se confirman microscópicamente por esqueletos granulares y partículas con una superficie específica alta, esta situación es la causante de altos valores de límite líquido (Díaz-Rodríguez y Santamaría, 2001).

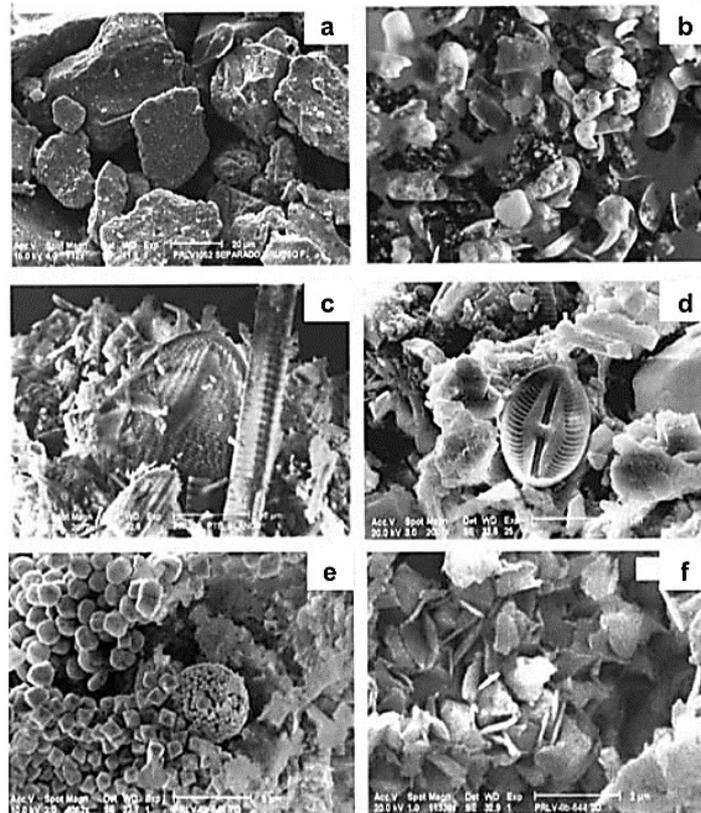


Figura 8: Fotomicrografía que ilustra la forma de las partículas en el suelo de la Ciudad de México: a) partículas de limo, b) valvas de ostrácodos, c) y d) frústulas de diatomeas, e) Pirita framboidal, f) partículas con estructura focolada

Cabe anotar que el estudio de microfósiles en el fondo marino se ha encaminado de manera secundaria al campo de la geotecnia. El *Ocean drilling program* es la entidad que posee las investigaciones más extensas con respecto al tema. A continuación, se resumen algunos de sus trabajos más representativos:

Pittenger *et al.* (1989) registraron en el margen continental del mar noruego comportamientos anómalos en las propiedades índice de los suelos; se registró un aumento en la porosidad (con su respectivo aumento en la permeabilidad y el contenido de agua) y una baja en la densidad de los sedimentos. Al analizar las propiedades geomecánicas se evidenció un decremento del índice de compresibilidad (C_c) con unos valores comprendidos entre 2 y 5.

Una vez revisada la composición microscópica de los sedimentos se encontró una relación entre la composición del suelo y las propiedades geomecánicas del mismo. Para este caso en particular se encontró una alta concentración de restos biogénicos de sílice. Como resultado de estas observaciones en la figura número 9 se presentan las correlaciones ejecutadas para tres sitios, relacionando el contenido del agua, límite líquido y el contenido de sílice biogénica:

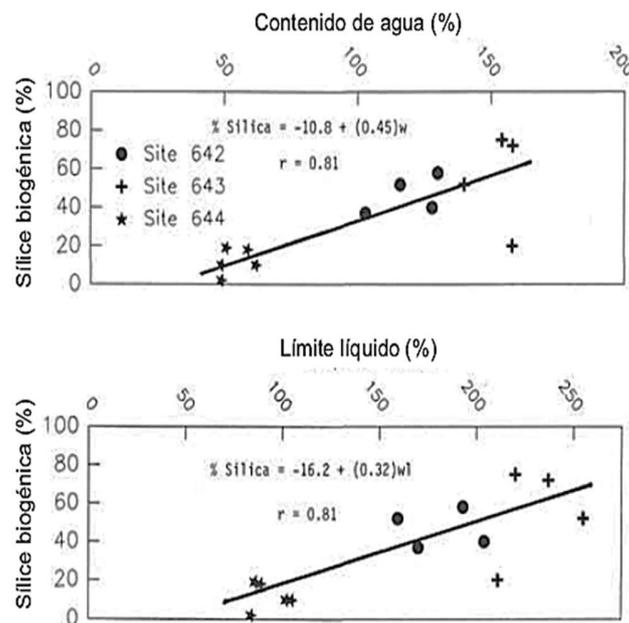


Figura 9. Correlación del contenido de sílice con el contenido de agua y límite líquido.
Fuente: (Pittenger et al, 1989).

La Figura 10 presenta la correlación entre la relación de vacíos, coeficiente de permeabilidad y el contenido de sílice biogénica:

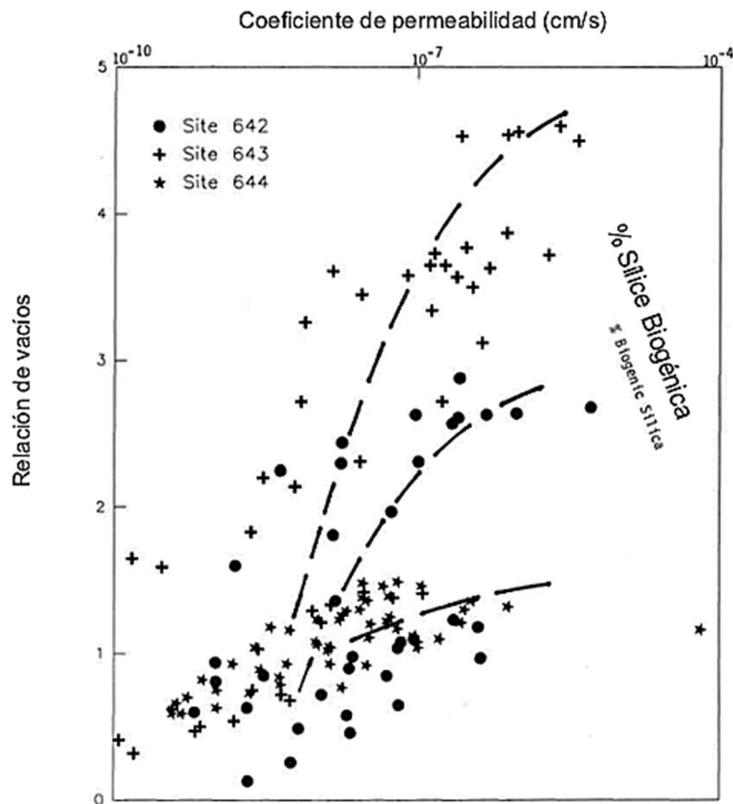


Figura 10. Correspondencia entre relación de vacíos, coeficiente de permeabilidad y sílice biogénica de pruebas de consolidación. Los puntos representan la permeabilidad calculada para cada incremento de carga. Las líneas discontinuas son las tendencias aparentes para cada sitio. Fuente: (Pittenger et al, 1989).

Bryant y Rack (1990) realizaron la caracterización geotécnica de sedimentos marinos localizados en las márgenes continentales de la Antártica. De sus observaciones concluyeron que la presencia de restos diatomáceos en sedimentos silíceos y calcáreos afectan al material, tanto química como geoméricamente, en comparación con los sedimentos calcáreos biogénicos. Esto se evidenció ya que el material sedimentario superficial presentó preconsolidación debido a la estructura generada entre la arcilla, fragmentos diatomáceos y calcáreos.

Por otra parte, en 1990, el *Ocean Drilling Program* caracterizó los sedimentos de las márgenes de Perú, ricos en materia orgánica y Sílice biogénica. De acuerdo con las observaciones, Hill y Marsters (1990), Lee *et al.* (1990) y Marsters y Christian (1990) llegaron a la conclusión de que las diatomeas encontradas en los sedimentos afectan las siguientes propiedades del suelo: (1) Aumento en la resistencia al corte no drenado; (2) Disminución de la resistencia remoldeada; (3) Aumento de porosidad, y (4) Aumento del contenido de agua, como consecuencia del aumento de la porosidad. Los investigadores atribuyen estos cambios en las propiedades mecánicas de los sedimentos al enlace creado entre la materia orgánica, los procesos geoquímicos y la presencia de esqueletos diatomáceos.

Rack y Palmer-Julson (1992), por su parte, realizaron investigaciones sobre los sedimentos en el Océano Índico, los cuales contienen microfósiles. Estas investigaciones demostraron que la presencia de diatomáceas afecta las siguientes propiedades del suelo: (1) Aumento de la resistencia al corte a medida que aumenta el contenido de agua; (2) Disminución de la densidad, y (3) Aumento de la porosidad al aumentar la profundidad. Estos cambios son contradictorios con respecto a la tendencia normal de este tipo de materiales, que presentan un aumento de la densidad con la profundidad.

Pittenger *et al.* (1989) determinaron que el contenido de microfósiles mejoraba las propiedades de compresibilidad. Igualmente, se determinó que el agua intraesquelética era expulsada rápidamente debido a la compactación, este fenómeno influye en los procesos de consolidación.

De otra parte, López (2009) retoma los estudios de Rack y Palmer-Julson (1992), quienes determinaron relaciones microestructurales con las propiedades físicas de los sedimentos, de lo cual concluyeron que:

- La porosidad está directamente relacionada con el contenido de diatomeas y sílice, mientras que todas las mediciones de densidad (densidad de sólidos, peso volumétrico seco y húmedo) no se correlacionan con la porosidad de las muestras. Las diatomeas pinnadas crean una estructura más abierta y por lo tanto, menos densa (Figura 11a). En los sedimentos con diatomeas céntricas se observó una estructura menos abierta, la cual se reflejó en una menor porosidad y mayores valores de densidad (Figura 11b).

- La porosidad se reduce de manera importante en los sedimentos diatomáceos donde los poros individuales se encuentran llenos del material de la matriz arcillosa que los rodea o se han desarrollado minerales autigénicos en su interior (p. ej. minerales de hierro, pirita, dolomita o calcita, dependiendo del ambiente de sedimentación).
- La porosidad de los suelos con microfósiles depende del tipo de esqueletos presentes, ya que en el caso de sedimentos que contienen radiolaria (Figura 11c), el material más fino se concentra en el interior de los esqueletos y la porosidad global del material disminuye cuando la concentración de radiolaria aumenta.
- La alta porosidad solo se relacionó con la presencia de microfósiles silíceos, ya que cuando los sedimentos contienen microfósiles calcáreos el aumento del esfuerzo vertical con la profundidad provoca un decremento de la porosidad, similar a la presentada en suelos marinos sin microfósiles. (López, 2009, p. 22 y 23).

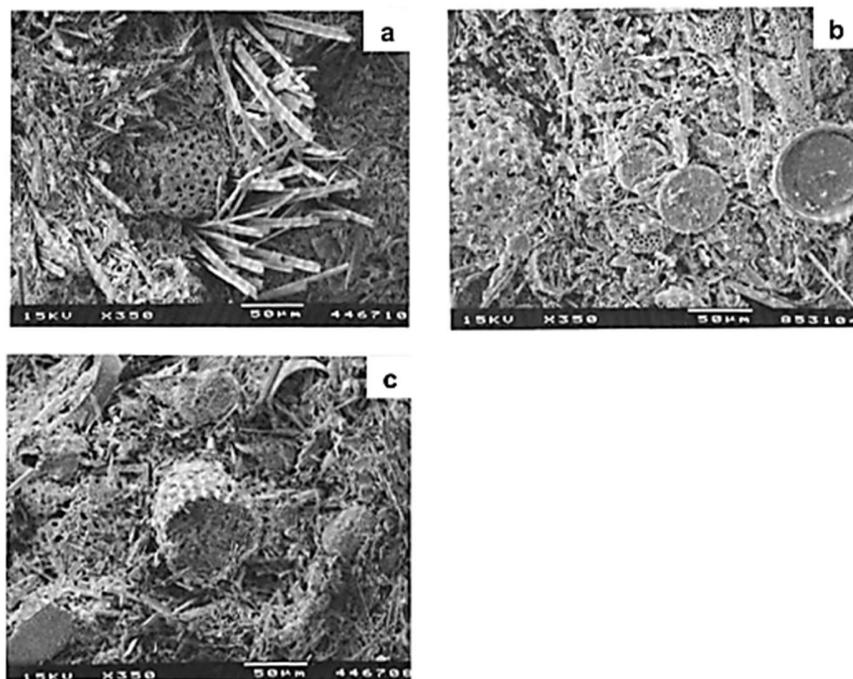


Figura 11. Fotomicrografías de Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) a) Valvas de diatomeas pinnadas, b) Valvas de diatomeas céntricas, c) Esqueleto de radiolaria ligeramente corroído (centro) en una matriz compuesta de fragmentos de diatomeas pinnadas en su mayoría (Rack y Palmer-Julson, 1992)
Fuente: (López, 2009).

Igualmente, en las investigaciones de Holler (1992) en el Mar de Japón; Ladd *et al.* (1993) y Chen *et al.* (1993) en las costas al noreste de Australia; Rutledge *et al.* (1995) en el Océano Pacífico Norte, y MacKillop *et al.* (1995) en el Océano Pacífico Ecuatorial, entre otros, se encontraron resultados similares.

De otra parte, Khilnani y Capik (1989, 1997) y Day (1995) evaluaron los suelos diatomáceos en la formación Monterrey en California, para aplicaciones de ingeniería; específicamente su viabilidad para rellenos. Sus conclusiones fueron similares a las investigaciones de sedimentos oceánicos; Day (1995) determinó un ángulo de fricción de 44° al aplicar un esfuerzo vertical bajo, estos resultados fueron determinados por:

1. El aumento de fricción entre las diatomeas debido a la superficie rugosa e imperfecciones
2. que pueden presentar.
3. *Interlocking* o trabazón entre partículas.
4. El esfuerzo vertical efectivo bajo, genera una envolvente baja por la rotura de las diatomeas.

Day (1995) concluyó que la compresibilidad de los suelos diatomáceos tiene una relación directa con la resistencia y las características de los microfósiles; para esfuerzos verticales bajos, presentan deformaciones bajas; cuando los esfuerzos verticales son altos se trituran las diatomeas afectando su compresibilidad.

Tanaka y Locat (1999) efectuaron estudios similares para determinar las propiedades índices y mecánicas en tramos de suelos limo arcillosos de la Bahía de Osaka. La distribución granulométrica se definió por los siguientes parámetros:

1. Presencia de Microfilmes – Diámetro máximo 100 μm .
2. Presencia de granos individuales de limo y arena.
3. Presencia de flóculos o agregados de partículas.
4. Presencia de arcillas – Máximo 40%.

Teniendo en cuenta estos parámetros y las observaciones realizadas, se definieron 4 tipos de poros en los suelos dando más importancia a las influencias de los microfósiles: (1) Inter – agregado, (2) Intra – agregado, (3) Esquelético y (4) Intra – Esquelético.

De acuerdo con los estudios de Tanaka y Locat (1999), se llegó a la conclusión de que las propiedades índices se afectaban debido a que los vacíos intraesqueléticos atrapan gran cantidad de agua. El agua atrapada entre los vacíos esqueléticos e intraesqueléticos es retenida por succión; solo el agua entre poros intraagregados está en contacto con los materiales arcillosos, afectando directamente el comportamiento mecánico de estos. A medida que se incrementa el esfuerzo vertical efectivo se van fracturando los microfósiles, disminuyendo el espacio intraesquelético y disminuyendo la influencia en las propiedades índice.

De acuerdo con López (2009), Tanaka *et al.* (2001) y Shiwakoti *et al.* (2002) realizaron la caracterización de suelos diatomáceos naturales encontrados en Hachirogata, Ariake, Aeropuerto de Kansai, Oeste de Osaka, Parque Yamashita e Hiruzenbara, y los compararon con mezclas de caolín – diatomita, arena – diatomita y arcilla natural – diatomita. De esta investigación se concluyó que:

- Una gran parte del comportamiento peculiar de los suelos japoneses revisados, pudo explicarse tomando en cuenta la presencia de microfósiles en ellos.
- La gran capacidad de los microfósiles diatomáceos para retener agua intraesquelética es la causa del aumento en los límites líquidos y plásticos. Este comportamiento no se presenta cuando se agrega un material granular (arena) a una arcilla. Considerando que el agua intraesquelética en los suelos diatomáceos no contribuye en el comportamiento del suelo, la interpretación de estos parámetros debe hacerse con cuidado.
- El comportamiento mencionado, es la causa de que los suelos diatomáceos naturales presenten un valor de actividad aparentemente alto, aun cuando presenten bajas proporciones de material fino en su composición.

- El valor de la densidad de sólidos de la diatomita es bajo en comparación con la mayoría de los suelos naturales ($\rho_s \approx 2.3$), debido a ello, es razonable que su presencia cause valores considerablemente bajos de ρ_s en un suelo diatomáceo natural.
- La compresibilidad y el coeficiente de permeabilidad de un suelo aumenta con el contenido de microfósiles. Durante la etapa de consolidación, los suelos diatomáceos presentan un comportamiento complejo para esfuerzos mayores al vertical de fluencia (σ_y), que incluye la rotura y trituración de los esqueletos diatomáceos, en adición al mecanismo de los suelos ordinarios. Esta característica está directamente relacionada con los altos valores de C_c obtenidos en los suelos diatomáceos y especialmente en muestras de diatomita natural, que exhiben un alto grado de enlace entre partículas derivado de la presencia de sílice y procesos diagenéticos.
- La presencia de microfósiles diatomáceos en un suelo arcilloso causa un incremento significativo en su resistencia al esfuerzo cortante y ángulo de fricción interna, con respecto a un suelo arcilloso de la misma mineralogía sin presencia de microfósiles. La rugosidad y el *interlocking* entre partículas de diatomea son los responsables de este comportamiento, el cual se presenta en menor medida en un suelo arcilloso al incluir partículas no plásticas de arena o limo.
- La resistencia al cortante de un suelo diatomáceo presenta una ligera disminución al sobrepasar el esfuerzo vertical de fluencia (σ_y) debido a la rotura de las partículas. Las propiedades índice del suelo (w_p , w_L) también disminuyen en función del esfuerzo de consolidación y el grado de trituración de las partículas, debido a que disminuye el volumen de porosidad intra-esquelética capaz de retener agua. De acuerdo con Marsal y Mazari (1959) este comportamiento se presenta también en el suelo de la Ciudad de México (López, 2009, pág. 25).

Por otra parte, Rajasekaran (2006) estudió la influencia de los microfósiles en los sedimentos marinos en Singapur, haciendo énfasis en la influencia de la pirita en el comportamiento mecánico del suelo. Hong *et al.* (2006) también realizaron estudios para determinar el

comportamiento mecánico de la diatomita natural de Oita, Japón, relacionándolo con observaciones de microscopio electrónico de barrido (SEM) y porosímetro de intrusión de mercurio (Figura 12). Estas investigaciones confirmaron los hallazgos de Shiwakoti *et al.* (2002), y se definió que la resistencia al esfuerzo cortante está relacionada con el esfuerzo de confinamiento de transición (Figura 13).

Verdugo (2008), por su parte, realizó estudios de caracterización de suelos bajo ambientes volcánicos, confirmando los hallazgos de Shiwakoti *et al.* (2002), según los cuales, independientemente del peso volumétrico, su resistencia al corte es muy alta.

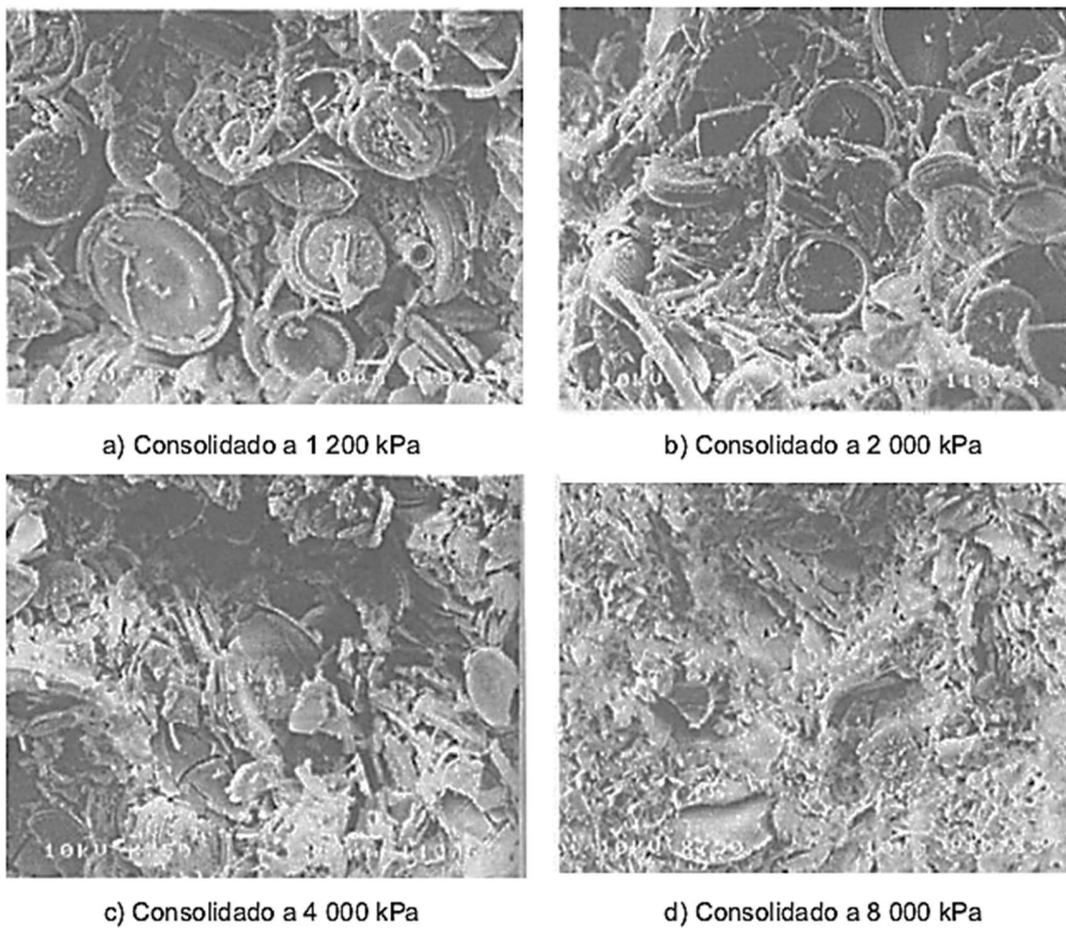


Figura 12, Microestructura posterior a la consolidación en diatomita natural (),
Fuente: (Hong Et Al 2006).

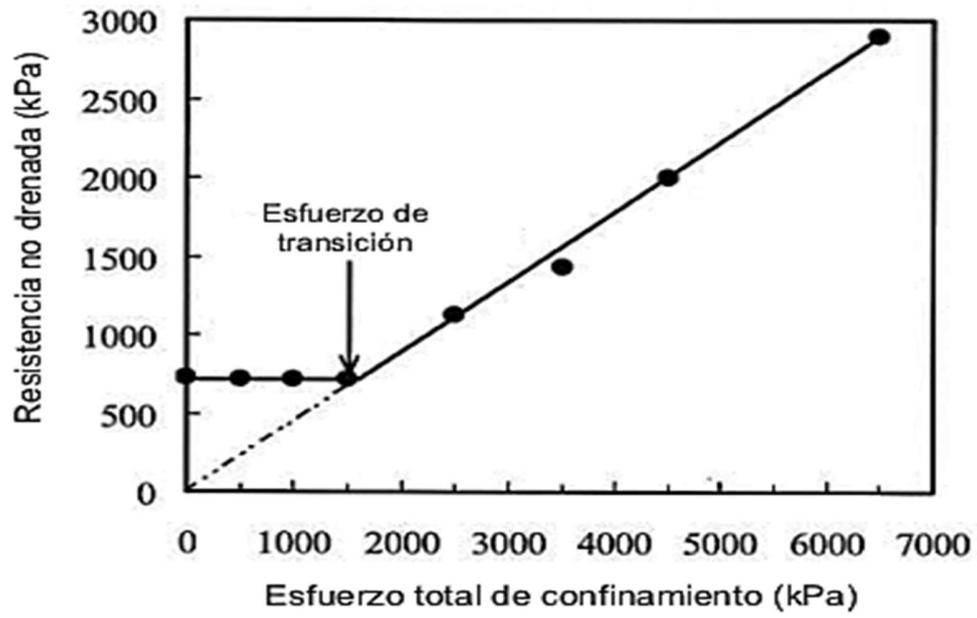


Figura 13. Envolvente de resistencia al corte no drenado para diatomita inalterada
Fuente: (Hong Et Al 2006).

Capítulo 3

Construcción de la curva característica suelo - agua

En el presente capítulo se presentan las particularidades de las curvas características suelo-agua, así como los ensayos que se realizan para definir las, entre los que se encuentran los de succión: incluye ensayo de papel filtro y placa de succión; el higrómetro de punto de rocío WP4C y diferencial de tensiómetros (HYPROP).

3.1 . Curva característica Suelo – Agua (SWCC)

De acuerdo con la Figura 14 se tiene un sistema en el cual la muestra de suelo se encuentra en estado saturado, esto se da por que la muestra se encuentra en contacto con un disco el cual permite el paso del agua mas no del suelo, y la bureta mantiene el agua al mismo nivel, por tanto no hay flujo.

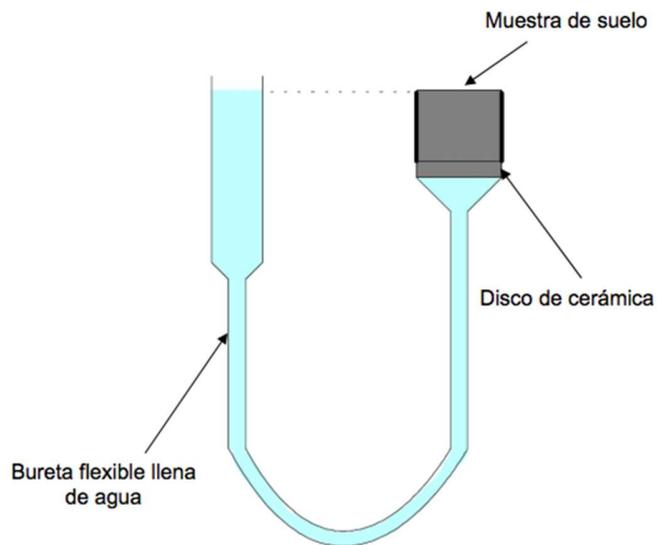


Figura 14. Esquema de un suelo saturado conectado a una bureta llena de agua
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Al cambiar de posición la bureta (hacia abajo), se genera un gradiente entre el nivel del agua y la muestra de suelo, lo cual genera un flujo de agua desde el suelo hacia la bureta, hasta generar equilibrio. Una consecuencia de este flujo es que el agua de la muestra se encuentra en tensión, la cual es generada por diferentes gradientes, lo que se puede representar a través de la curva característica. Es decir que esta es la relación gráfica entre el contenido del agua o grado de saturación y la succión del suelo (tensión del agua). Por ello también se conoce como curva de retención del suelo.

La curva característica del suelo (SWCC por sus siglas en inglés) representa la relación entre el contenido de agua y la succión que presenta el suelo, por lo tanto su comportamiento que depende de la granulometría y estructura del suelo (Thomé, 1993); esto se ve al comparar las SWCC de arcillas y suelos granulares (Figura 15), ya que las primeras desaturan de manera gradual mientras que en los suelos granulares la desaturación ocurre de manera rápida.

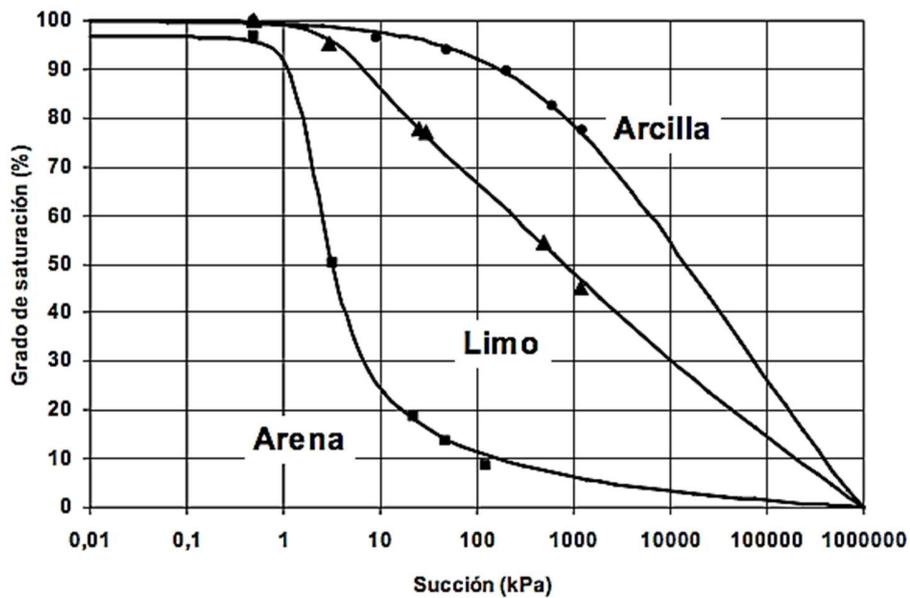


Figura 15. Curva característica para suelos con diferentes texturas
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Debido a que la SWCC se presenta en términos de contenido de agua gravimétrico, no se refleja el cambio de volumen por las variaciones en la succión.

3.1.1. Secciones de la curva SWCC.

La curva característica se compone de tres zonas: la capilar, la de desaturación y la residual. En la zona capilar, el suelo mantiene el estado de saturación hasta la entrada de aire (Fredlund, 1999, citado por López, 2009) en los macroporos, del suelo (Figura 16). Cuando el agua es desplazada por el aire, esta pasa a estar en un estado discontinuo, ya que no se adhiere uniformemente al suelo, lo cual reduce el coeficiente de permeabilidad considerablemente. Este estado se conoce como zona de desaturación, (Figura 16).

En la zona residual, el incremento de la succión no produce cambios en el contenido de agua, debido a que el agua que queda en la muestra no fluye entre los poros y solo pueden removerse por evaporación (Hosagasi, 2006) (Figura 16).

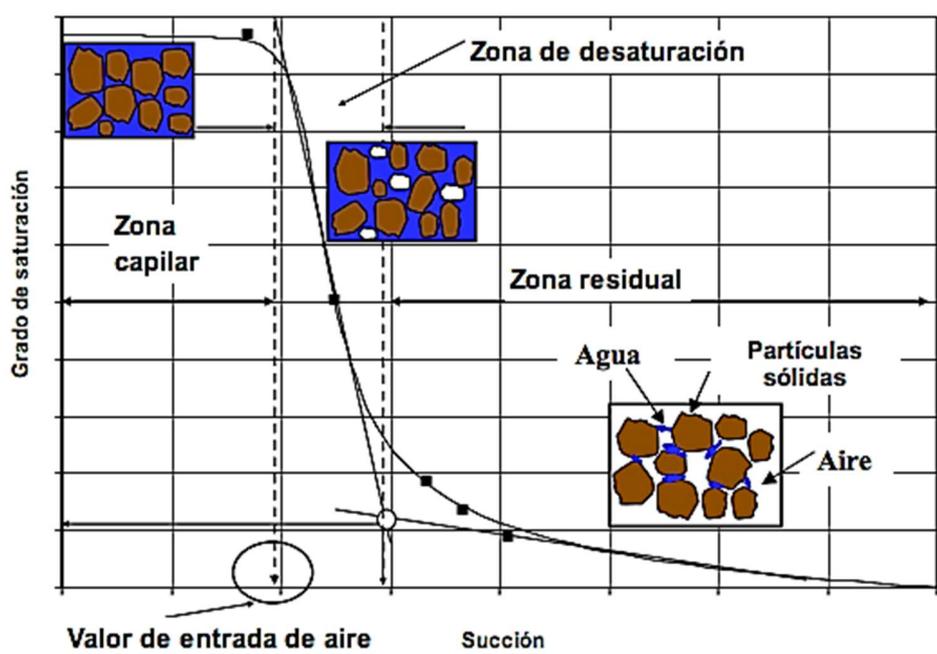


Figura 16. Regiones típicas de la curva característica
Fuente: (Pérez, 2008, pág 19)

3.1.2. Factores que afectan la curva característica.

La determinación de la curva característica es sensible a varios factores como: tipo de suelo, contenido de agua, compactación del espécimen, influencia de estado de esfuerzos, tipo de compactación del espécimen e histéresis.

Con relación al tipo de suelo, en la Figura 17 se presentan las curvas características tipo para diferentes tipos de materiales (SM, CL y CH). En estas curvas se puede evidencia que a medida que el suelo es más plástico, aumenta su capacidad para retener agua. Los suelos con mayor tamaño de partículas generan una curva más plana.

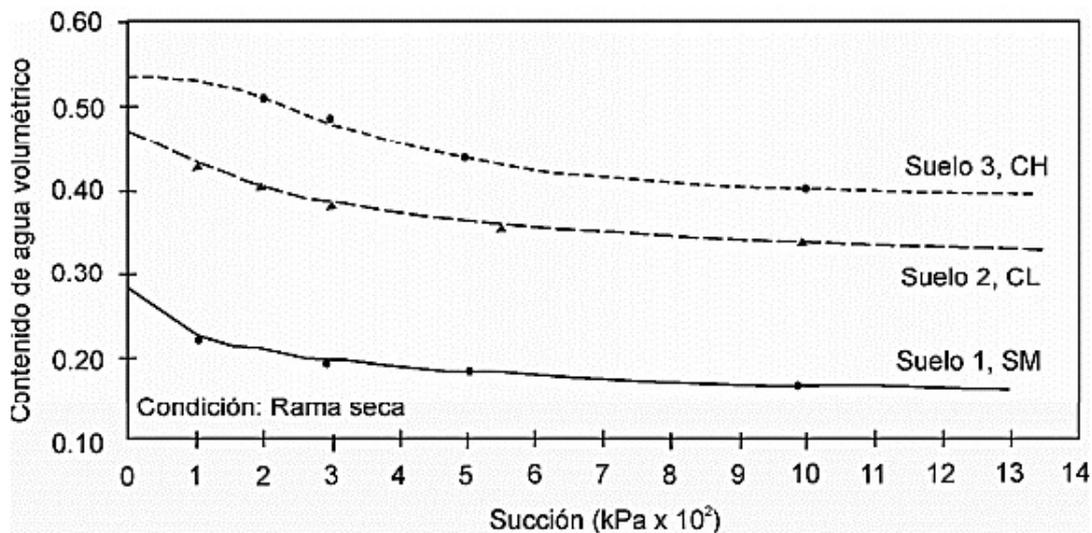


Figura 17. Curva característica para 3 tipos de suelos (Suelo 1: SM, Suelos 2: CL, Suelo 3: CH) Energía de compactación Fuente: (Miller, et al, 2002)

Miller *et al.* (2002) realizaron curvas características variando la energía de compactación (reducido, estándar y modificada) sobre un suelo arcilloso clasificado como CH en el SUSC (Figura 18). De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluyó que para una energía reducida (15 golpes y 3 capas) la curva generada está muy por debajo de las generadas con compactación estándar y modificada; esto se debe a que la porosidad del suelo está directamente relacionada con la energía de compactación.

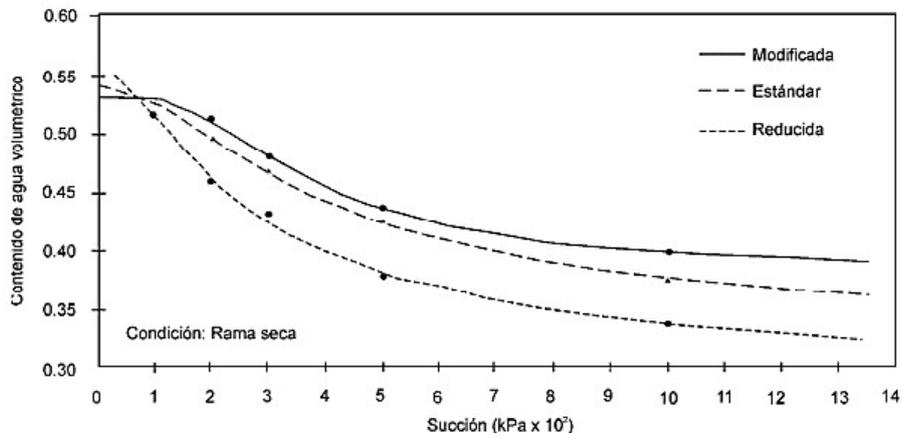


Figura 18. Efecto de la energía de compactación en la curva característica. Suelo CH
Fuente: (Miller, et al, 2002)

Yang *et al* (2004), por otra parte, estudió los efectos de la relación de vacíos en la curva característica, para este estudio se determinó la curva característica en una muestra compactada con densidades secas distintas. Una vez construidas las curvas, se observa que a medida que aumenta la densidad seca, aumenta la entrada de aire, demostrando que, a mayor densidad o relación de vacíos, puede mantener mayor cantidad de agua a medida que la succión aumenta (Figura 19).

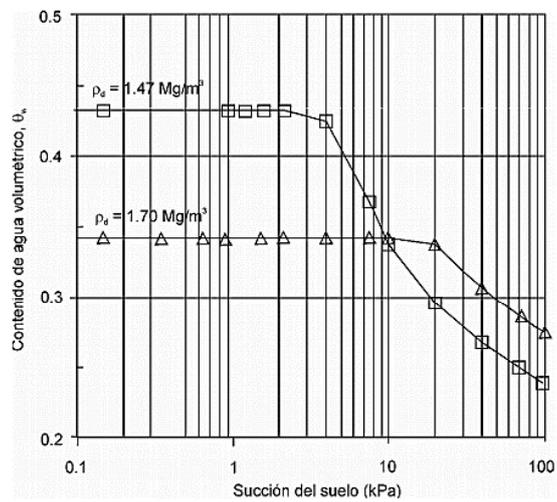


Figura 19. Efecto de la densidad en la curva característica
Fuente: Yang *et al* (2004).

Sugii *et al.* (2002), citado por Cevat, (2006) demostraron que la energía de compactación no presenta influencias en la curva características de las arenas (Figura 20), por lo cual se concluye que para arenas y materiales granulares la energía de compactación no es un factor determinante.

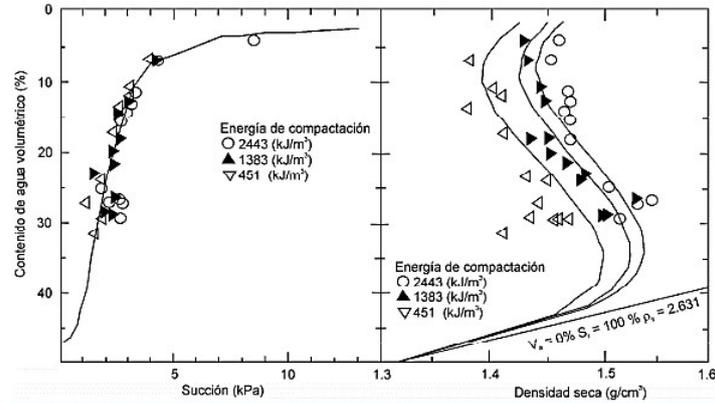


Figura 20. Compactación y curvas características
Fuente: (Sugii, et al, 2003)

En cuanto al contenido de agua de compactación, los estudios de Miller *et al* (2002) concluyeron que el contenido de agua inicial no es un factor determinante en la construcción de la curva característica. En la Figura 21 se presenta la curva característica para dos muestras con diferente contenido de agua, y se evidencia que no hay una diferencia apreciable entre ambas curvas.

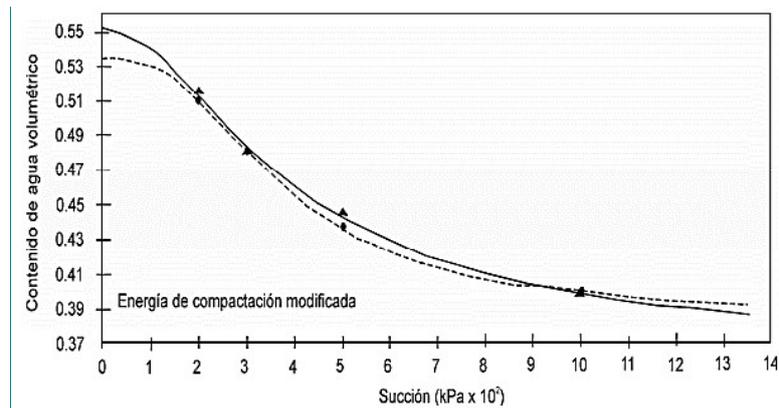


Figura 21: Efecto del contenido de agua de compactación en la curva característica
Fuente: (Miller, et al 2002)

Vanapalli *et al.* (1994), citados por Pérez, (2008) estudiaron el efecto del contenido inicial de agua en depósitos Till (depósitos de sedimentos variados de origen glacial), en Saskatchewan, Canadá. El estudio establecía generar las curvas características con contenidos de agua preestablecidos: óptimo, debajo del óptimo y por encima del óptimo. Los resultados determinaron que el contenido de agua inicial del espécimen afecta la curva en ciertos rangos (Figura 22):

Para el espécimen ensayado con contenido de agua inicial menor, la curva se localiza en la parte inferior cuando la succión es menor a 10 000 kPa; para valores mayores, las tres curvas tienden a converger. Por otro lado, las curvas obtenidas de especímenes compactados con contenido de agua óptimo y con un valor más alto al óptimo, parecen tener diferencias ligeras (Pérez, 2008, p. 19).

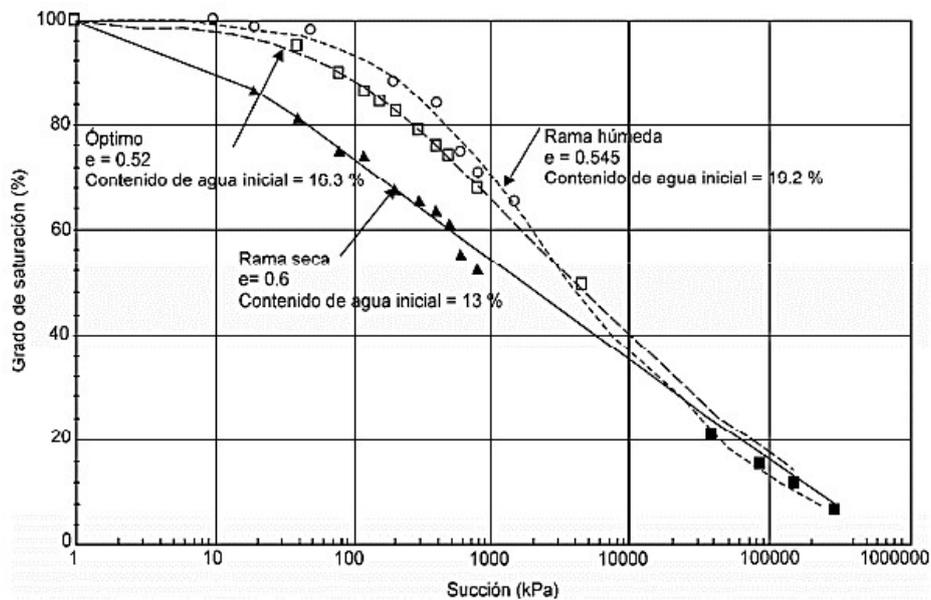


Figura 22. Curvas características para un till de Canadá a diferentes contenidos de agua inicial
Fuente: (Vanapalli 1994)

El tipo de compactación, por su parte, genera diferencias en la estructura interna del suelo, afectando la curva característica, como se muestra en la Figura 23. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la curva característica presenta mayores contenidos de agua usando una compactación estática.

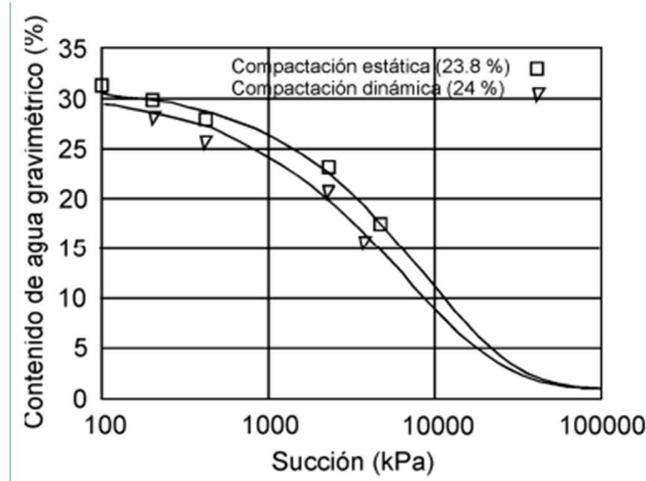


Figura 23: Efecto del tipo de compactación en la relación de succión contra contenido de agua gravimétrico
Fuente: (Vanapalli 1994)

La influencia de los estados de esfuerzos, por otra parte, no ha tenido tanta atención por parte de los investigadores. Ng y Pang (2000), llevaron a cabo un experimento con muestras cargadas y descargadas con un consolidómetro, y después ensayados con celda de presión volumétrica. Al analizar los resultados, se evidencia que la muestra que no estuvo sometida al consolidómetro, generó un proceso de desaturación más ágil, mientras que la muestra sometida a mayor carga, presenta una curva característica más plana, reteniendo una cantidad de agua mayor (Figura 24).

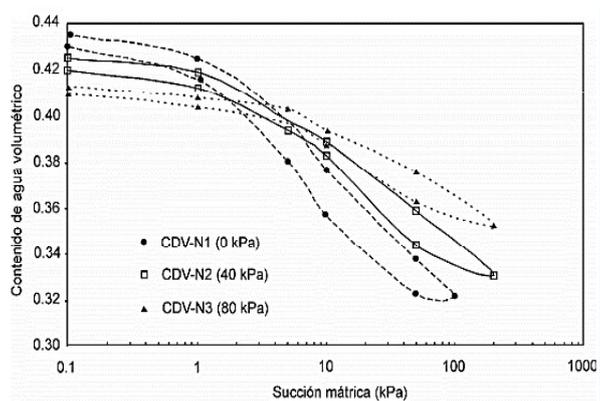


Figura 24. Efecto de estados de esfuerzos en la curva característica
Fuente: Ng y Pang (2000).

Cevat (2006) realizó estudios variando el tipo de saturación de las muestras: la primera muestra se saturó el espécimen y acto seguido se sometió al vacío, una segunda muestra fue saturada al vacío y acto después se puso en agua. Los resultados muestran que la primera muestra presentó una saturación mayor, generando una separación de las curvas características en el rango de 1 a 50 kPa. Por encima de estos valores las curvas convergen.

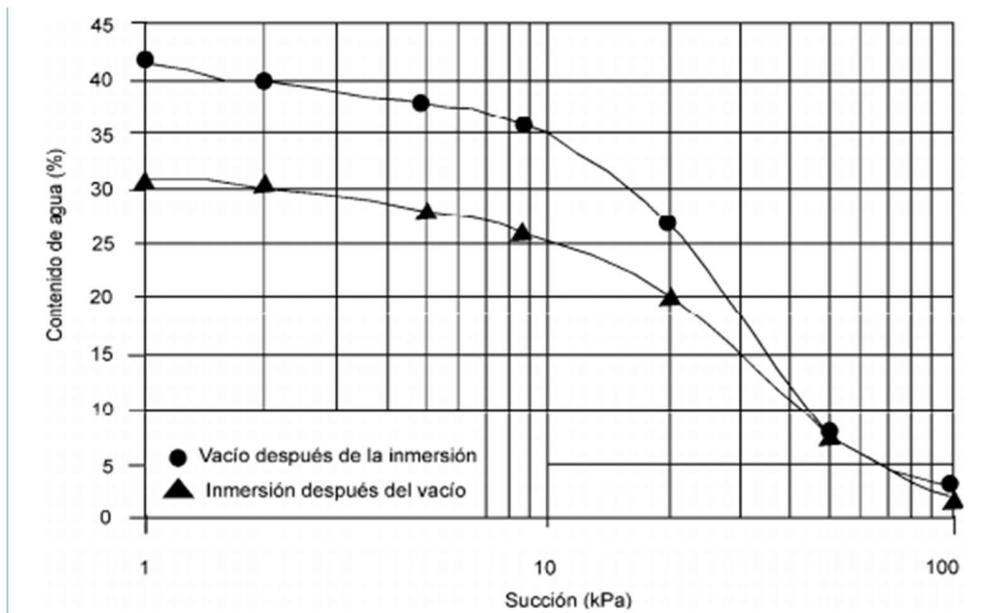


Figura 25: Efecto de la técnica de saturación en la determinación de la curva característica
Fuente: Ng y Pang (2000).

En cuanto a la histéresis, las relaciones entre succión y contenido de agua tiene muchas connotaciones.

Por ejemplo, un suelo que sufre un proceso de secado, ya sea por evaporación o por drenaje, y otro en un proceso de humedecimiento por efecto de la lluvia o por capilaridad; en ambos casos y para el mismo valor de succión, se tiene que el suelo en proceso de secado retiene más agua que el que sufre humedecimiento (Pérez, 2008, p. 23).

La histéresis puede deberse a varios factores como la uniformidad de las partículas, el tamaño de los poros, los procesos de expansión y contracción, entre otros. Dados los factores que

afectan la curva característica, no se tiene una metodología estandarizada, razón por la cual cada investigador diseña su propia metodología, equipos y procedimientos. Al tener una metodología estandarizada, se busca mejorar las comparaciones entre resultados obtenidos.

3.1.3. Modelo de Van Genuchten

Para la construcción de una curva de succión es necesario obtener un modelo matemático que pueda representar la tendencia de los datos obtenidos en laboratorio y plasmarlos en un gráfico de regresión el cual pueda ser leído cuando se tenga un dato representativo para dicha curva, este modelo tiene un ajuste optimo a las curvas de datos experimentales.

En este trabajo las curvas obtenidas se ajustaron con el método empírico de Van Genuchten descrito a continuación:

Este método consiste en la aplicación de una ecuación, la cual es una función continua con tres parámetros de ajuste.

Dicha ecuación se representa:

(0-1)

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

Donde:

α, n y m son parámetros de ajuste

ψ es la succión matricial

θ_s es el contenido de agua volumétrico saturado

θ_r es el contenido de agua residual del suelo.

Este modelo tiene como punto de inflexión que permite mayor flexibilidad y define de mejor forma la sigmoideal o de “s” invertida de la curva característica, el parámetro “ α ” está relacionado con el valor de entrada de aire (Lu y Likos 2004), el parámetro “n” está relacionado con la distribución del tamaño del poro y es un índice de la pendiente de la curva característica (Van Genuchten, 1980). Para terminar el parámetro “m” está relacionado con la simetría total de la curva característica donde $m=1-(1/n)$.

3.2. Ensayos para la obtención de succión

El objeto principal de este trabajo de grado es la construcción de la curva característica suelo – agua (SWCC), lo que requiere de la realización de ensayos de succión en muestras previamente preparadas para este fin. En la actualidad existen diferentes tipos de ensayos válidos para diferentes rangos de succión, y realizando los ensayos planteados anteriormente se busca lograr una curva SWCC completa, para su posterior análisis. Los ensayos a realizar son: Papel de filtro, placa de succión, tensiómetros e higrómetro de punto de rocío.

3.2.1. Succión de un suelo con papel de filtro.

Uno de los principales usos de los datos obtenidos de la succión es la determinación del perfil de humedad de equilibrio, el cual se obtiene mucho después de construida la estructura, como resultado del movimiento del agua del suelo de zonas de baja succión a zonas de alta succión. La medición de la succión en una arcilla parcialmente saturada permite la predicción de dicho perfil de equilibrio. Esto es de mucha importancia debido a la estrecha relación entre la humedad y el CBR, lo cual es utilizado para el diseño de espesores de pavimento.

Otro uso importante de los datos de succión consiste en la predicción del levantamiento de suelos potencialmente expansivos. En nuestro medio son muy comunes los depósitos arcillosos extensos, con potenciales de expansión altos. En el análisis de dichos depósitos resulta importante la presión de succión que se genera cuando son sometidos a procesos de compactación, lo que varía notablemente los estados de esfuerzos.

El método del papel filtro compara el potencial del agua del suelo con el potencial de retención de agua en un medio poroso, en este caso, el papel de filtro Whatman, cuyo rango de medición llega hasta 7 pF (log - cm de columna de agua)

3.2.2. Método de placa de succión.

De acuerdo con Otálvaro (2011), la principal característica del método de la placa de succión es la aplicación directa de una presión de agua negativa a la muestra, tal como lo explica a continuación:

El valor aplicado es limitado a 100 kPa debido a la cavitación teórica del agua dentro del tubo de drenaje (Feuerharmel et al., 2006). La placa de succión es usada para la determinación de las succiones bajas que incluye el valor de entrada de aire de los macroporos. El equipo desarrollado está conformado por tres sistemas principales (Figura 26):

- I) Una celda de acero inoxidable de tres cuerpos: base, anillo porta muestras y anillo superior. La base tiene una entrada y una salida para el agua desairada y un fondo rebajado con forma de espiral para facilitar la saturación, en el que es fijada una cerámica porosa con un valor de entrada de aire de 1 bar. El anillo superior está provisto de una tapa acrílica perforada.
- II) El sistema de saturación está compuesto por un reservorio de 5 li y una mesa que provee una diferencia de nivel de 1.5 m con respecto al reservorio.
- III) El sistema de imposición de succión está conformado por una repisa ubicada a 2.3m. del piso del laboratorio, un tubo guía con mordazas de aluminio para desplazar la bureta verticalmente, lo que proporciona una diferencia de nivel de 2.0m., y una bureta graduada de 50ml, calibrada con un sensor de 1mm³ de precisión.

El procedimiento de ensayo en la placa de succión contempla los siguientes pasos:

- I) Saturación de la cerámica porosa de alto valor de entrada de aire.
- II) Emplazamiento del cuerpo de prueba en el anillo porta muestras.

- III) Saturación del cuerpo de prueba por capilaridad.
- IV) Emplazamiento del anillo porta muestras en la celda.
- V) Aplicación de la succión deseada manteniendo presión de aire igual a cero, mediante la tapa perforada superior y deslizando la bureta hacia abajo de la posición de la celda, para aplicar una pequeña presión negativa.
- VI) Finalmente es abierta la válvula conectada con la bureta aplicando la succión y es registrado el cambio de volumen en función del tiempo, corrigiendo la succión debido al cambio en la columna de agua de la bureta (Otálvaro, 2011).

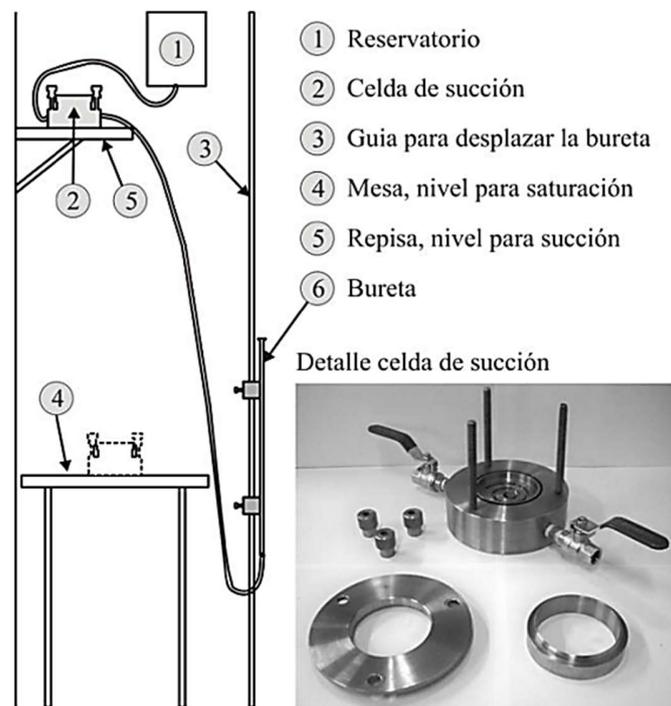


Figura 26. Placa de succión
Fuente: (Otálvaro, 2011).

3.2.3. Higómetro de punto de rocío WP4C.

El WP4C permite medir el potencial de agua en un sólido o líquido relacionando el potencial de la lectura de la muestra de agua y la presión de vapor de aire en equilibrio de la muestra. La relación está dictada por la siguiente ecuación.

$$\psi = \frac{RT}{M} \times \ln \frac{p}{p_0} \quad (0-2)$$

Donde

P: Presión de vapor de aire

P₀: Presión de vapor de saturación a temperatura de la muestra

R: Constante de gas 8.31 j/molK

T: Temperatura de la muestra en grados kelvin

M: Masa molecular del agua

Esta medida se presenta en el WP4C computando el potencial de agua, para ello se equilibra el agua en fase líquida de la muestra con la fase de vapor de agua en el espacio superior de la cámara cerrada. Un valor aproximado de potencial osmótico se puede encontrar mediante la medición de la conductividad eléctrica EC del extracto de saturación del suelo.

Un valor aproximado de potencial osmótico se puede encontrar mediante la medición de la conductividad eléctrica EC del extracto de saturación del suelo el que se presenta en la siguiente ecuación.

$$\psi_{os}(MPa) = -0.036EC \frac{dS}{m} \quad (0-3)$$



Figura 27. Higrómetro de punto de rocío
Fuente: (Decagon devices inc., 2014)

El valor P_f se puede determinar con la siguiente ecuación.

$$pF = \log_{10} h \quad (0-4)$$

Donde:

h : Presión negativa expresada en cm. de agua

3.2.4. Diferencia de tensiómetros (HYPROP).

La construcción de la SWCC requiere de varios ensayos para lograr continuidad de la curva (Figura 28), para este trabajo se utiliza la diferencia de tensiómetros (HYPROP-2). La medición en el método de evaporación (Schindler *et al*, 2016) el cual se encuentra en la parte seca de la curva. Las medidas con el equipo WP4C se pueden usar los métodos húmedos o secos.

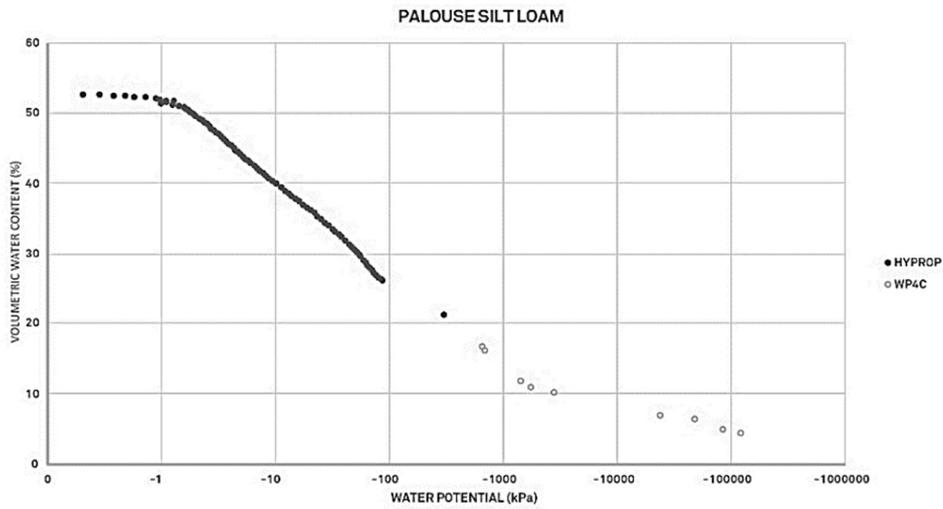


Figura 28. Rangos de medida de HYPROP y WP4C
Fuente: (Meter Group AG, 2017)

Al combinar los métodos seco y húmedo, se obtienen curvas que no coinciden. Adicionalmente, con diferentes valores de humedad, los datos medidos con HYPROP pueden generar potenciales superiores a los medidos con el equipo WP4C. Para evitar este tipo de situaciones se realizan los ensayos por método seco (Figura 29).

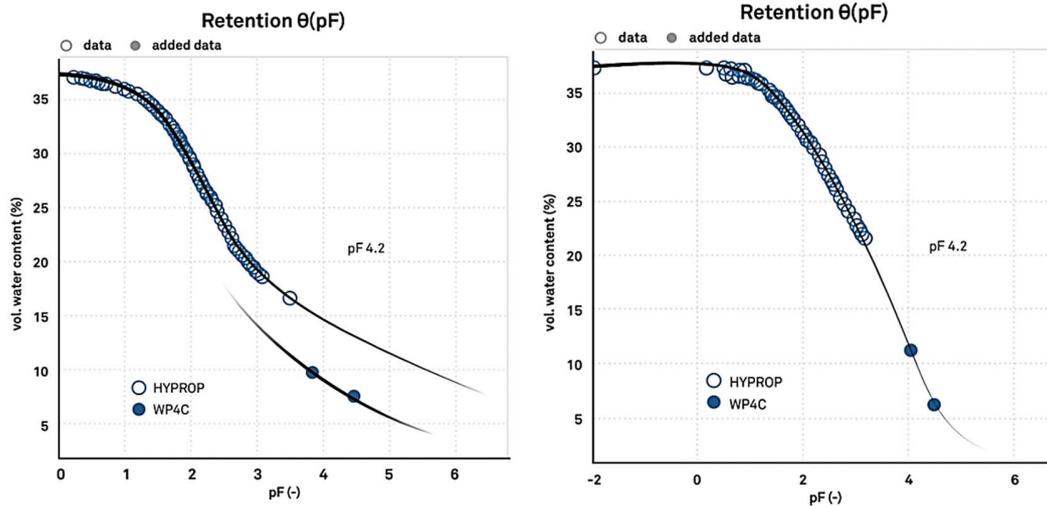


Figura 29: Curvas por medio arrojadas por HYPROP y WP4C: A: Métodos húmedo y seco. B: método seco
Fuente: (Meter Group AG, 2016).

Para que las curvas arrojadas por HYPROP y WP4C coincidan, se recomienda que la muestra utilizada para el WP4C sea tomada de la muestra que se utilizó para el ensayo en HYPROP, de esta manera se puede lograr que las curvas de ambos ensayos puedan coincidir.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Introducción

Para determinar la influencia de la inclusión de microalgas a mezclas de caolín, se realizó la curva SWCC en una muestra, sin incluir microalgas fosilizadas. Adicionalmente, se construyeron curvas de retención de agua con diferentes porcentajes de microalgas fosilizadas. Para determinar las curvas características de las muestras analizadas, se aplicaron técnicas de medición que constituyen un ejemplo de tecnologías innovadoras para la caracterización de la succión: Papel filtro, Placa de succión, Higrómetro de punto de rocío (WP4-C) y Diferencial de tensiómetros.

4.2. Metodología utilizada

La primera fase corresponde a las tareas de caracterización inicial de los materiales presentes en la investigación. Debido a la importancia de la estructura (fábrica) del suelo para efectos del presente estudio, además de los ensayos para obtener las características índices y realizar análisis mineralógicos, se realiza un estudio imagenológico usando el microscopio electrónico de barrido (SEM). Los ensayos realizados se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2 Ensayos de caracterización no convencional y de obtención de la succión para muestras de suelo bajo estudio

Muestra	SEM	DRX	Papel filtro	Placa de succión	WP4-C	Tensiómetro
Caolín	1	1	1	1	1	1
Caolín + Diatomea 5%	----	----	1	1	1	1
Caolín + Diatomea 10%	1	----	1	1	1	1
Caolín + Diatomea 20%	----	----	1	1	1	1
Caolín + Diatomea 40%	1	1	1	1	1	1

Nota: elaboración propia, 2019.

Los porcentajes de adición de diatomea *a priori* seleccionados corresponden a valores ya identificados que obtuvo Slebi (2017) en su investigación, donde reveló que los suelos adicionados con diatomea aumentaron su ángulo de fricción aproximadamente a estos escalones de contenido.

Según los estándares, las muestras para las técnicas de papel filtro y placa de succión deben ser, en lo posible, inalteradas, sin embargo, debido a la naturaleza de la investigación, se requiere que las muestras tengan algún tipo de reconfiguración al momento de adicionar el suelo diatomáceo. Para esta investigación en particular se usó un método similar a la preparación de la muestra en el ensayo de expansividad de Lambe (INV E 132 /13). Las muestras fueron preparadas identificando la humedad de saturación, y distribuidas desde una humedad baja que permite la construcción de la muestra, hasta una humedad cercana a la saturación, esto en

especial para la técnica de papel filtro. Las curvas fueron construidas con alrededor de 15 puntos para la técnica del papel filtro.

Para este análisis las muestras fueron compactadas en tres capas por 15 golpes para cada una dentro de un anillo indeformable de 7cm de diámetro. El material fue mezclado en seco luego se agrega el agua necesaria a cada una de las muestras para obtener una escala de humedad.

La muestra para el ensayo de placa de succión fue confeccionada de igual forma que las de papel filtro.



Figura 30. Preparación de la muestra
Fuente: Elaboración propia, 2019

Es importante tener en cuenta que el parámetro de compactación no se controló durante la preparación de las muestras en razón a que el mismo no es el objeto de análisis de este trabajo.

La fase correspondiente a la obtención de las curvas de retención (SWCC) abarca el análisis detallado de varios métodos de medición de succión en la que se utiliza una sola trayectoria correspondiente a desaturación. A continuación, se presentan la metodología que se utilizó para realizar cada uno de los ensayos propuestos en este escrito.

4.2.1. Método del papel filtro.

El método de papel filtro supone ser la técnica más sencilla de medición. Esta se compone de pocos y simples pasos, los cuales se mencionan a continuación:

1. Se comprueba el peso del papel filtro a emplear en una balanza que tenga una precisión mínima de 0,0001 g. Seguido a esto se ubica el papel filtro sobre la muestra que tendrá los componentes específicos de caolín-arena y microalgas fosilizadas.

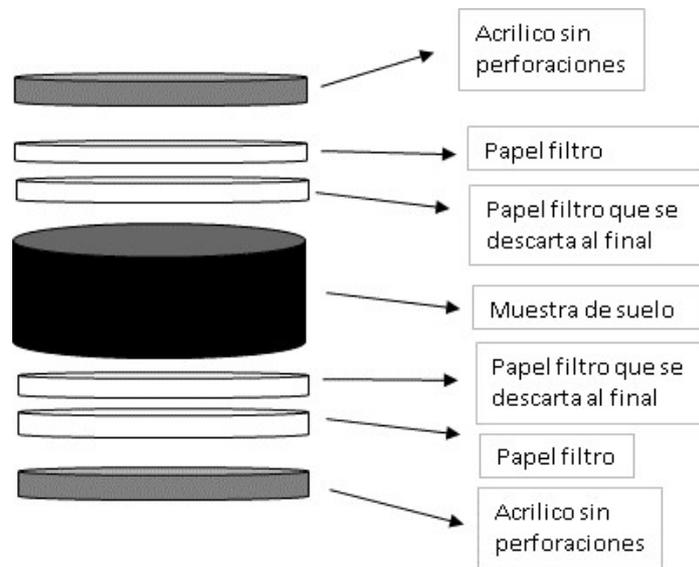


Figura 31. Montaje de muestras para el ensayo de papel filtro
Fuente: (modificado de Bulut, et,al 2001)

2. Es de vital importancia entender que, según la ubicación de este, se hace la medición o de succión matricial o de succión total. Se coloca un disco cerámico, que debe tener el mismo diámetro de la muestra a ensayar, sobre el papel filtro y otro en la contracara; se sella completamente con papel vinipel, se guarda en bolsas herméticas y se lleva al cuarto húmedo, en donde debe pasar un tiempo mínimo de 7 días.

3. Pasados 7 días, se pesa el papel filtro y enseguida se seca al horno durante al menos 10 horas, para determinar su peso seco. Estos valores se calculan, registran y finalmente se realiza una calibración de la succión basada en la norma INV 159-07 y a su vez en la ASTM – D5298-10 (Figura 32).

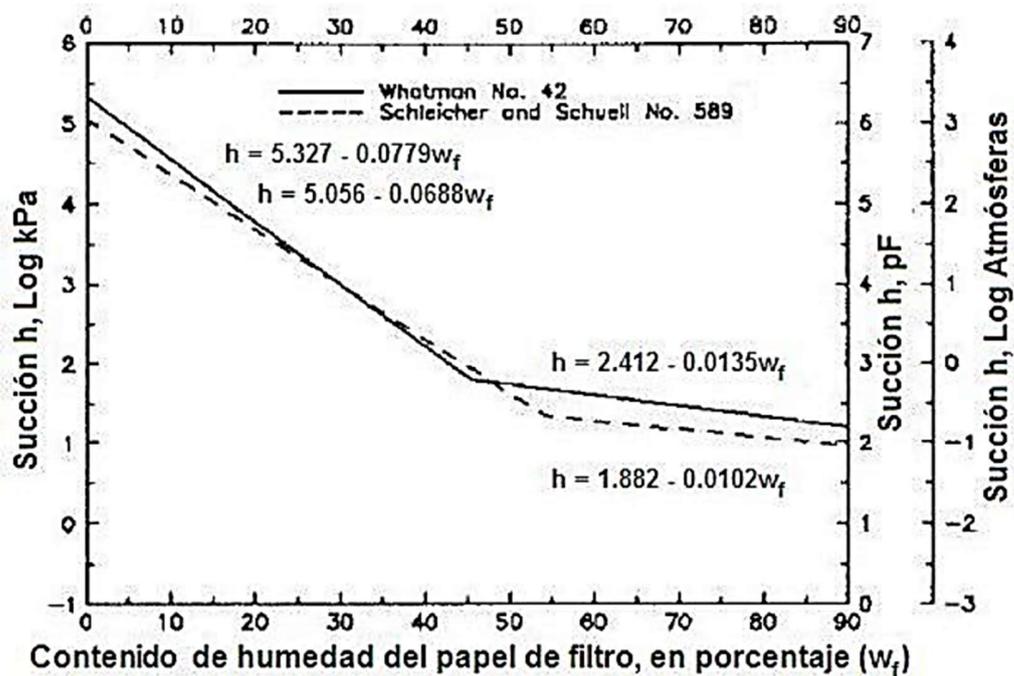


Figura 32. Curva de calibración del papel filtro (Norma I.N.V. E-159-07)
Fuente: ASTM D5298-10

4. Según la ASTM D5298-10 numeral 5.4, el rango de medición del papel filtro es de 10 a 10000 kPa. Sin embargo, Almeida (2005), realiza comparaciones con tensiones hasta los 1500 kPa, luego de estos valores se ven cambios ligeros de contenido de humedad, respecto al método tradicional.

4.2.2. Placa de succión.

También denominado aparato de Haines, es un método que aplica directamente una presión negativa sobre la muestra. La limitación teóricamente se establece en 100 kPa de la piedra porosa usada en el equipo, por lo cual permite definir el trecho inicial de la curva de retención que es importante para la interpretación de la SWCC.

El aparato de la placa de succión es ilustrado en la Figura 33. El ensayo consiste en una diferencia de presión que es impuesta entre el reservorio y la muestra, la cual es menor a la presión atmosférica. Al multiplicar esta cabeza por el peso específico del agua, se obtiene la succión inducida de la piedra porosa. La humedad necesaria para la SWCC se obtiene secando la muestra para obtener el peso de sólidos.

Por su configuración, esta es capaz de reproducir valores de succión muy bajos, que otros métodos no pueden definir. La parte inicial de la trayectoria de desaturación es clave para observar el valor de entrada de aire (AEV) de los macroporos.

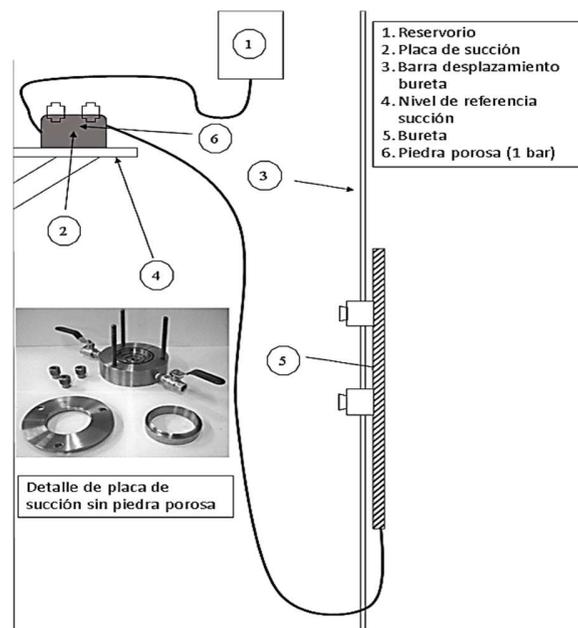


Figura 33. Detalle de Placa de succión
Fuente: (Otalvaro, 2016)

1. Se coloca la piedra porosa en una cámara inundada de agua y es conectada por un tubo flexible que posee un regulador de nivel en el extremo, que mantiene el nivel de salida del agua a una altura cualquiera escogida, en función de la succión matricial a calcular. Solo hay trayectoria de secado.
2. Las muestras deben inalteradas, tomadas en anillos de corte hincados, sin embargo, para esta tesis, se trabajó con muestras remoldeadas, ya que se introdujo artificialmente contenido de microalgas, para determinar su posible influencia en el comportamiento de las mismas.
3. La piedra porosa se debe saturar durante 24 horas en agua destilada. Se conecta la placa, el tubo flexible y el frasco que será llenado con agua destilada, eliminando las burbujas que hayan surgido durante ese proceso. La saturación de todo el equipo es fundamental y dispendiosa. Se puede utilizar agua caliente inicialmente hervida y mantenida arriba de los 30°C. Este procedimiento facilita la absorción de eventuales burbujas presas en las paredes del sistema.
4. Posteriormente se instala la piedra en la cavidad que la aloja en la cámara. Se satura la muestra por capilaridad, llevando el nivel del reservorio a una altura superior al del suelo.
5. En lo posible usar una cámara de protección para evitar la evaporación, asegurándose que el suelo estará bajo presión atmosférica. El tiempo para la saturación es de 24 ó 36 h para arcillas (La muestra utilizada para la presente tesis está conformada por una mezcla de caolín con arena de guamo).
6. Después de saturado, colocar el nivel superior de la bureta coincidente con el nivel de contacto placa-suelo. En ese proceso, saldrá agua en exceso. Ese nivel será el inicial.
7. Para lograr la trayectoria de secado, las presiones aplicadas dentro de la cámara serán crecientes. En cada etapa, durante el ensayo el agua fluye por la bureta hasta que es alcanzado el equilibrio.
8. A partir del momento en que no es observado más goteo de agua, la masa de la muestra es registrada y usada en el cálculo de la humedad. Cabe resaltar que la masa seca es obtenida al final del ensayo, secando la muestra a 105°C durante 24h, después del equilibrio de la última succión requerida para este ensayo.

4.2.3. HYPROP¹.

Actualmente se cuentan con varias herramientas para la evaluación de la curva característica agua-suelo (SWCC), uno de ellos es el método realizado con el HYPROP, el cual se describe a continuación:

1. En la bandeja se deposita una cantidad de agua de manera que su nivel suba aproximadamente 2 cm, a partir del fondo.
2. Se coloca el papel filtro en la parte superior del disco de saturación. Acto seguido se coloca el molde con la muestra de suelo y se retira la tapa de plástico, como se ve en la Figura 34:



Figura 34. Preparación de la muestra – molde con disco de saturación, papel filtro y tapa
Fuente: Elaboración propia, 2019

¹ Traducido y adaptado del Manual Hyprop. Tomado de: Meter Group AG. (2016)

3. Se sumerge suavemente el conjunto en la bandeja de saturación con una leve inclinación, debe hacerse de esta manera para evitar burbujas en la base. En caso de no tener suficientes discos de saturación, se puede usar cualquier dispositivo que permita el paso del agua a la parte inferior de la muestra, de manera que se genere una saturación ascendente.

4. Una vez ingresada la muestra en la bandeja de saturación, se procede a llenar la bandeja hasta que la lámina de agua se encuentre a 0,5 cm. del tope del molde. Ver Figura 35. Importante: No mojar la muestra directamente, la saturación de la misma debe realizarse a través del disco de saturación en el fondo de la bandeja.



Figura 35. Llenado de la bandeja
Fuente: Elaboración propia, 2019

5. Una vez elevado el nivel del agua, se vuelve a instalar la tapa de plástico, de esta manera se evita la pérdida de humedad de la muestra por evaporación del agua. Una vez realizado este paso, se puede seguir con la siguiente fase del ensayo. Ver Figura 36:



Figura 36.: Configuración de la muestra para evitar evaporación del agua de la muestra
Fuente: Elaboración propia, 2019

Para obtener una adecuada lectura de las tensiones generadas en la muestra, se debe asegurar que el agua del sistema no tenga aire (Disuelto o en burbujas), para lograr esto se debe hacer una purga del sistema, para este fin se puede utilizar una bomba de vacío o el método de las jeringas, ambos métodos se mencionan a continuación:

Método Bomba de vacío.

6. Se coloca la bomba de vacío en el suelo (las bajas temperaturas ayudan a generar mejores valores de succión)

Nota: Bajo ninguna circunstancia deben tocarse los medidores de cerámica con los dedos desnudos, la grasa del cuerpo y el jabón pueden afectar las propiedades hidrofílicas del sensor. Cuando el agua del sistema se evapora, se cubre el sensor con un protector de silicona.

7. Se conecta todo el sistema como se muestra en la Figura 37, para conectar las mangueras se puede guiar por el código de colores de la misma.

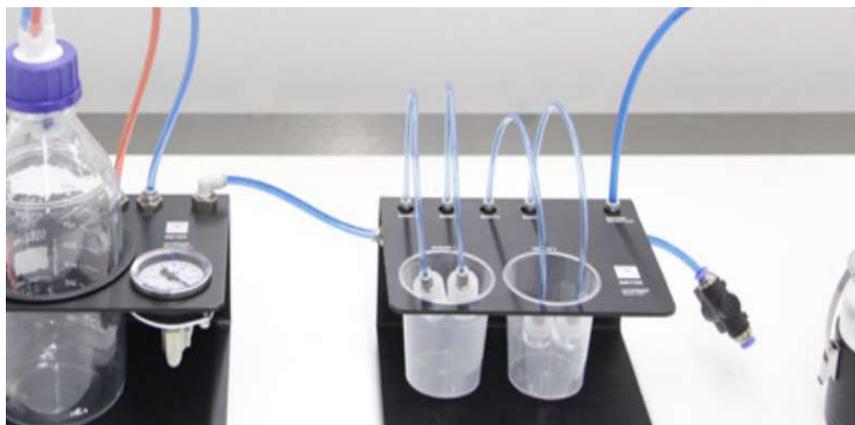


Figura 37 Montaje del sistema
Fuente: Meter Group AG. (2016)

8. Finalmente, se toman los tiempos de trabajo de la bomba de vacío. Se recomienda este paso para optimizar la vida útil de la bomba y el consumo de energía. Se recomienda también tener una botella extra de agua desionizada, cada vez que se hace purga del sistema.

9. Se llenan los hoyos en el sensor con la jeringa (Figura) – Importante: no introduzca la jeringa en los hoyos del sensor, ya que esto puede afectar las lecturas.



Figura 38. Llenado del sensor
Fuente: Elaboración propia, 2019

10. Se reensambla el sensor y se llena de nuevo con agua desionizada, como se aprecia en la Figura 39

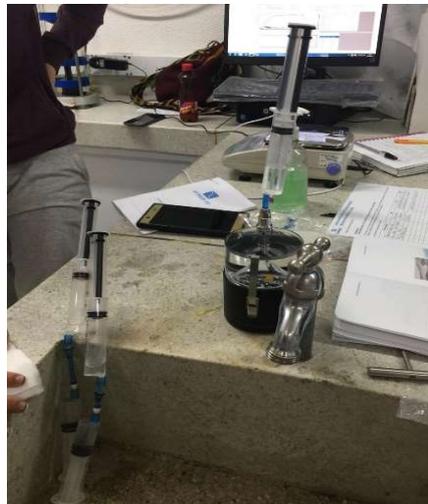


Figura 39. Llenado del sensor
Fuente: Meter Group AG. (2016)

11. Se atornillan los sensores que se requiera y se cubren los que no se necesitan. Acto seguido se llenan los envases con agua desionizada y se cierra la válvula.
12. Se prepara el cronometro con el ritmo al cual trabajará la bomba de vacío. Para hacer una purga completa del sistema, se requiere un mínimo de 24 horas de trabajo de la bomba.
13. Nota: Si la lectura del manómetro cae, significa que el sistema tiene una fuga, en ese caso se revisa el sistema, se repara la fuga y se reinicia el proceso de purga. Si se está utilizando una bomba de vacío diferente a la suministrada por el fabricante, se debe revisar que esta pueda generar un valor de 0.8kPa por debajo de la presión atmosférica, en caso contrario debe cambiarse la bomba.
14. Nunca desconecte los tubos para ventilar el sistema, esta acción puede generar daños en los sensores de presión. Para ventilar el sistema abra lenta y cuidadosamente la válvula de escape (Figura 40).



Figura 40: Válvula de entrada de aire
Fuente: Meter Group AG. (2016)

Método de las jeringas.

15. Para optimizar los tiempos de purga se debe dejar los medidores de cerámica en agua desionizada durante toda la noche, sin embargo, no puede entrar agua por la parte superior del medidor, debido a que esta acción bloquea los poros del medidor (Figura 41).

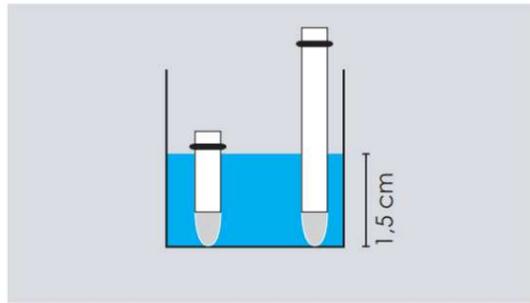


Figura 41 Esquema de saturación de los medidores de cerámica
Fuente: Meter Group AG. (2016)

Nota: Bajo ninguna circunstancia se deben tocar los medidores de cerámica con los dedos desnudos, ya que la grasa del cuerpo y el jabón pueden afectar las propiedades hidrofílicas del sensor. Cuando el agua del sistema se evapore cubra el sensor con un protector de silicona.

16. Se llena una de las jeringas con 10ml de agua desionizada, acto seguido deben colocarse boca arriba y remover el aire residual.

17. Se tapa la boquilla de la jeringa y se jala el émbolo completamente, el vacío generado por esta acción desgasifica el contenido (Figura 42).



Figura 42. Generando vacío en las jeringas
Fuente: Meter Group AG. (2016)

18. Se coloca la jeringa boca arriba y se remueve el aire residual. Se repiten estos pasos hasta que no muestre más burbujas.

19. Se coloca la pieza tubular en la punta de la jeringa, acto seguido se presiona hasta que se genere una gota en la punta de la jeringa (Figura).

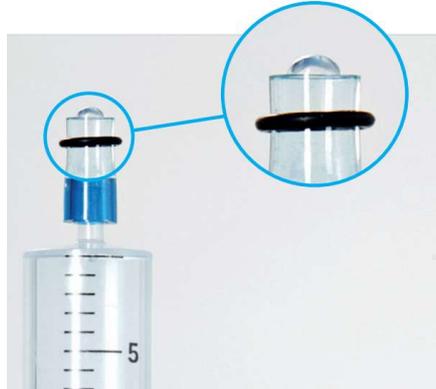


Figura 43. Instalación de la pieza tubular
Fuente: Meter Group AG. (2016)

20. Se coloca el medidor de cerámica en la punta de la jeringa (Figura).



Figura 44. Colocación del medidor en cerámica
Fuente: Meter Group AG. (2016)

21. Se llena la jeringa de vacío con 5 ml de agua desionizada, se coloca la jeringa boca arriba y se remueve el aire residual.

22. Se repiten los pasos 14 a 17 para desgasificar el agua desionizada, y acto seguido se coloca la pieza tubular en la punta de la jeringa.

23. Se conectan las 2 jeringas (10 ml y 5 ml) entre sí. Los O-Rings, ayudan a cerrar el sistema.

24. Se debe halar el émbolo de la jeringa de vacío (10 ml) y, acto seguido, instalar los retenedores, de esta manera el vacío en la jeringa remueve el aire del medidor de tensión Figura 45.



Figura 45 Retenedores para la jeringa de vacío
Fuente: Meter Group AG. (2016)

25. Manteniendo la presión en el émbolo, se presionan los retenedores y se deja que el émbolo recupere lentamente su posición (Figura 46).

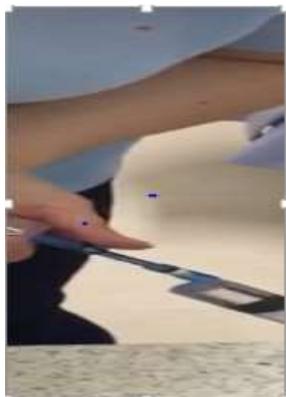


Figura 46 . Retenedores jeringa de vacíos
Fuente: Meter Group AG. (2016)

26. Se retira la jeringa, se posiciona boca arriba y se remueve el aire residual (Figura 47).



Figura 47. Remoción de aire residual del sistema
Fuente: Meter Group AG. (2016)

27. Se repiten los pasos 14 a 17, hasta que el líquido de la jeringa no muestre aire residual.
28. Se llena la jeringa de vacío con 15 a 20 ml de agua desionizada, y se desgasifica de acuerdo al procedimiento de los pasos 14 a 17.
29. Se inserta el tubo azul y acto seguido se llena la jeringa.
30. Se conecta el tubo azul en el sensor y se llena el depósito (Figura 48). Es importante que bajo ninguna circunstancia el émbolo introduzca el agua con presión, ya que esto puede dañar los sensores de presión.



Figura 48 Llenado del depósito del sensor
Fuente: Meter Group AG. (2016)

31. Se repiten los pasos 27 y 28 hasta llenar el depósito.
32. Debe permitirse que las burbujas suban por el depósito. Cuidadosamente se agita y da pequeños golpes al recipiente para liberar las burbujas (Figura 49). No debe golpearse el recipiente contra una superficie dura, el impacto podría generar daños en los sensores de presión.



Figura 49. Llenado del depósito del sensor
Fuente: Meter Group AG. (2016)

33. Para aliviar la presión en el sistema, debe mantener el émbolo y la jeringa, remover los retenedores y lentamente empujar el émbolo hacia adelante. Cabe anotar que esta acción debe llevarse a cabo con mucha cautela debido a la sensibilidad del sensor de presión.
34. Se llena la jeringa de vacío con agua desgasificada y se introduce en el depósito, se hala el émbolo hasta que los retenedores hagan clic. Se debe mostrar una presión igual a -2 kPa. Cuando se alcance este valor, el sistema está listo para realizar mediciones en alrededor de 3 horas. En caso de no lograrse este valor de presión, se puede atribuir a una de las siguientes razones:
- Volumen muerto en la jeringa.
 - Aire en las mangueras.

c. Una fuga en el sistema.

Una vez encontrada la causa del problema, este deberá purgarse de nuevo.

35. Después de ensamblado el sistema, se prepara la muestra para el montaje con el sensor. Se coloca el adaptador encima de la muestra saturada, los orificios deben estar por encima de la muestra de suelo (Figura 50). Acto seguido se toma el muestreador, y se taladran huecos en etapas de 10 mm. Se debe cuidar al momento de ejecutar los huecos, no compactar la muestra.



Figura 50. Preparación de la muestra para ensamblaje
Fuente: Meter Group AG. (2016)

36. Deben llenarse los agujeros con agua, para garantizar que no habrá aire cuando el sistema se ensamble.

37. Cuidadosamente coloque el sensor encima de la muestra de suelos cuidando que este no quede comprimido y que no queden burbujas atrapadas entre el sensor y la muestra de suelo (Figura 51).



Figura 51. Ensamblaje del sensor y la muestra.
Fuente: Elaboración propia, 2019

38. Se saca la muestra de la bandeja de saturación, se gira de manera que el sensor quede en la parte de abajo. A continuación, se remueve el disco de saturación y el papel filtro, se asegura la muestra con las agarraderas incluidas en el sensor, finalmente se limpia la humedad y el exceso de material en la periferia de la muestra, no hacerlo puede generar lecturas inexactas (Figura 52).



Figura 52. Ensamblaje final para iniciar la medición
Fuente: Meter Group AG. (2016)

39. Para realizar la medida, se debe conectar tanto el sensor como la balanza a una computadora con el programa HYPROP. A continuación, se presenta el montaje para varios equipos (Figura 53).

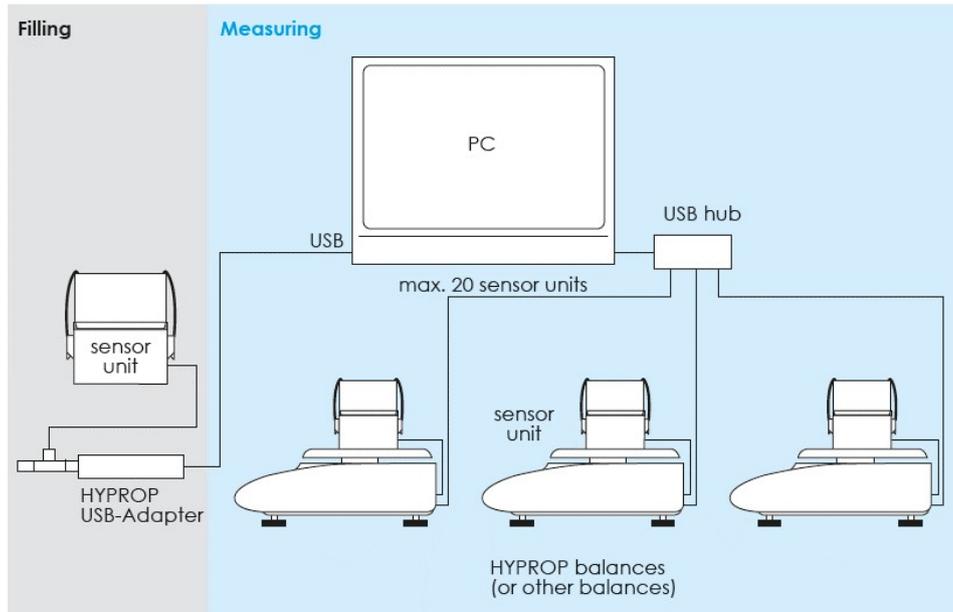


Figura 53. Montaje para toma de mediciones
Fuente: Meter Group AG. (2016)

40. Una vez conectado el sistema a la computadora, se debe encender la balanza, en el programa hacer clic en el icono “Show Devices”, acto seguido dar clic en el icono “Measurement wizard”.

41. Una vez abierta la ventana se deberá ingresar la siguiente información:

- a. Tipo de medida.
- b. Unidades de medida.
- c. Nombre de la muestra de suelos.
- d. Tipo de anillo de muestra.
- e. Tipo de balanza.

42. Dar clic al botón "Start" para dar inicio a la lectura de la muestra.

4.2.4. WP4C.- Higrómetro de punto de rocío

Uno de los equipos que se pueden utilizar para la construcción de la curva SWCC es el equipo WP4C de Decagon devices. El rango de medición está entre 0 y 300MPa, y arroja el resultado en aproximadamente 5 minutos, con una precisión de ± 0.1 MPa (Figura 54).

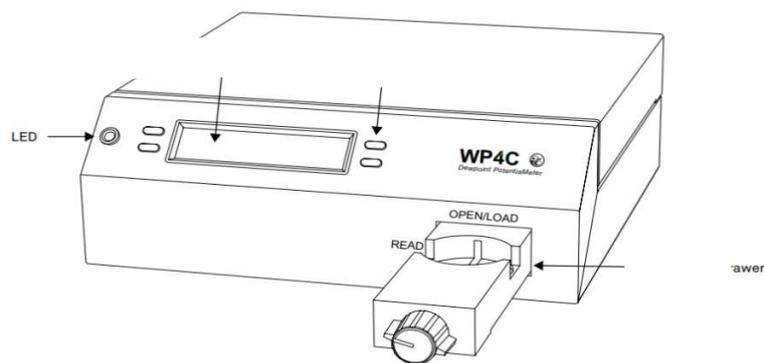


Figura 54. Equipo WP4C

A continuación, se presenta el procedimiento para realizar la curva con este equipo:

1. Se mide la masa de una tasa de acero inoxidable del WP4, se adiciona agua de acuerdo con la saturación que se desee obtener.
2. Se sella la muestra con uno de los plásticos del equipo. Este procedimiento se realiza para diferentes contenidos de agua y se dejan equilibrar las muestras al menos 16 horas.
3. Se deposita la muestra en el recipiente adecuado (se recomienda utilizar recipientes en acero inoxidable, gracias a que alcanzan un equilibrio de temperatura, permitiendo una lectura más precisa).

Nota: Las muestras de suelo se pueden secar en su recipiente para determinar su humedad gravimétrica, la cual es conveniente para generar las SWCC.

- a. La muestra debe cubrir el fondo del recipiente, el no hacerlo genera problemas en las lecturas.
 - b. La muestra no puede sobrepasar la mitad de la altura del recipiente, por encima de esta altura, se corre el riesgo de contaminar los sensores y el cajón.
 - c. La parte exterior del recipiente, así como los bordes, deben estar limpios, ya que estos materiales pueden contaminar el cajón y, por tanto, los ensayos posteriores.
4. Antes de iniciar las lecturas, se debe verificar que la diferencia de temperatura entre el cajón del aparato y el recipiente no excedan $-0,5^{\circ}\text{C}$ (el WP4C registra la diferencia de temperatura entre el cajón y el recipiente – Botón inferior derecho). Si la muestra está más caliente que el cajón se puede generar condensación y las lecturas se verán afectadas; en caso que la temperatura de la muestra sea inferior a la temperatura del cajón, el aparato no iniciará la lectura hasta que la diferencia entre ambos sea de 1°C . Entre más se acerquen las temperaturas de recipiente y el cajón, se requiere menos tiempo para iniciar las lecturas.
 5. Una vez verificadas las condiciones del numeral 1 y 2, se ingresa la muestra al cajón y se cierra. El cajón posee un selector OPEN / LOAD – READ, para dar inicio al ensayo, este selector debe ponerse en la posición “READ” (Figura).
 6. Una vez iniciada la medición de la muestra, el aparato mostrará en el display las mediciones en tiempo real. Cuando acabe la medición, se encenderá una luz LED de color verde, indicando que el ensayo ha terminado.

En la Figura 55 se observa el espectro de valores de succión que cubre aproximadamente cada una de las técnicas elegidas. Se seleccionaron las cuatro para obtener una curva completa, en la que se puedan revelar los puntos de inflexión de las mismas, útiles para obtener los parámetros de la curva.

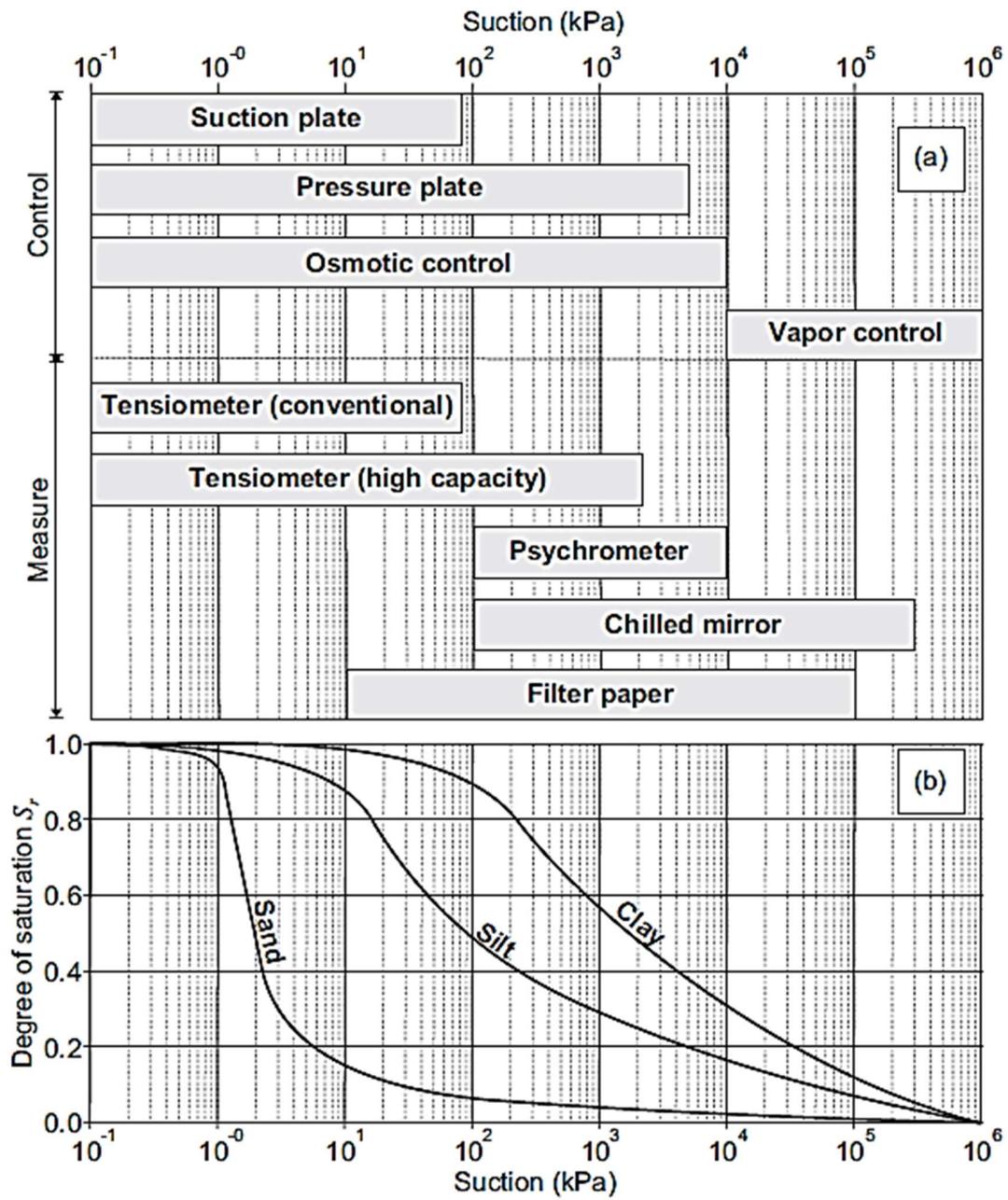


Figura 55. Técnicas para obtención de la curva de succión
Fuente: (Caicedo, 2019)

4.3. Análisis no Convencionales de las muestras

4.3.1. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

En este caso, el análisis imagenológico será útil para observar la presencia de las diatomeas dentro de la microestructura del material compuesto, tanto para el material base sin adición de diatomeas, como para una de las adiciones. Se pretende *a priori* demostrar la presencia de diatomeas en la muestra, así como la localización de las microalgas en la estructura, lo que puede dar información relevante para la etapa de análisis de resultados.

De acuerdo con la página de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de los Andes (s.f):

La microscopía de barrido de electrones (MEB) es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV. El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos.

Funcionamiento

Un microscopio de barrido de electrones funciona con un haz de electrones producido por una fuente que puede ser un cañón termoiónico (filamento de tungsteno o de hexaboruro de lantano) o un cañón de emisión de campo FEG, (Field Emission Gun).

Al cañón se le aplica un potencial eléctrico que acelera el haz de electrones hacia una columna, este es focalizado por medio de lentes electromagnéticas sobre la muestra (toda la trayectoria de los electrones debe estar en vacío, de lo contrario, los electrones colisionarían

con las moléculas de aire y serán absorbidos). Los electrones chocan e interactúan con la muestra produciendo varias señales que pueden ser recogidas de acuerdo con la señal y con los detectores presentes. La magnificación de la imagen se produce por un conjunto de lentes electromagnéticas que mediante un tratamiento adecuado de las señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos (CRT).

Interacción del haz con la muestra:

Cuando los electrones colisionan con la muestra se producen varios fenómenos:

Electrones secundarios:

- La propia muestra emite electrones secundarios debido a la colisión con el haz incidente para generar imágenes tridimensionales de alta resolución SEI (Secondary Electron Image). La energía de estos electrones es muy baja, inferior a 50 eV, por lo que los electrones secundarios provienen de los primeros nanómetros de la superficie.
- Electrones retrodispersados: Algunos electrones primarios son reflejados o retrodispersados tras interactuar con los átomos de la muestra. La intensidad de emisión de estos electrones está directamente relacionada con el número atómico medio de los átomos de la muestra (Z promedio), así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados, permitiendo la obtención de imágenes planas de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image).
- Absorción de electrones: La muestra absorbe electrones en función del espesor y la composición; esto produce la diferencia de contraste en la imagen.
- Emisión de rayos X: Cuando los electrones de niveles internos son expulsados por la interacción de los electrones primarios, habrá transiciones entre los niveles de energía con emisión de rayos X. Esta energía y longitud de onda están relacionadas con la composición elemental del espécimen, permitiendo realizar análisis químicos mediante espectroscopía por dispersión de energía y de longitud de onda (EDS y WDS).
- Emisión de electrones Auger: Cuando un electrón es expulsado de un átomo, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar esta vacancia, lo que da como resultado un exceso de energía. Esta energía extra puede ser liberada emitiendo un nuevo

electrón de la capa más externa (electrón Auger). Son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.

Todas estas señales están relacionadas entre sí y dependen, en gran medida de la topografía, el número atómico y el estado químico de la muestra; por lo tanto, un microscopio de barrido de electrones suministra información morfológica, topográfica y composicional de las superficies de las muestras.

Ventajas del MEB:

- La gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes permite enfocar y observar amplias zonas de la muestra al mismo tiempo.
- Puede producir imágenes de alta resolución (de hasta 3 nm.), es decir, que detalles muy cercanos pueden ser observados separadamente a alta magnificación.
- Ofrece la posibilidad de preparar de las muestras de una manera relativamente sencilla.
- Permite observar muestras en diversos tamaños, desde centímetros hasta nanómetros.

Limitaciones del MEB:

Por las características de funcionamiento de este tipo de equipos, se requiere que las muestras sean conductoras y que estén libres de humedad.

No es posible observar la estructura interna y detalles ultraestructurales de las muestras, para esto se requiere un Microscopio de transmisión de electrones MET o TEM (de las siglas en inglés *Transmission Electron Microscopy*) (Universidad de los Andes, s.f.).

4.3.2. Difracción de Rayos X – DRX

Está técnica es usada frecuentemente en el estudio de la ciencia de materiales para identificar la mineralogía de un material. Esto puede ser importante para establecer la influencia de la composición en el comportamiento mecánico y/o hidráulico, prácticamente de cualquier material.

La técnica consiste en bombardear la muestra con haz electrones de rayos X, que presenta una longitud de onda sobre un material con una estructura cristalina. La interacción puede describirse mediante la Ley de Bragg, que reproduce la dirección en que se difracta el rayo y, de esta manera, se puede obtener qué tipo de material se está ensayando.

Esta metodología permitió, en esta investigación, tener una idea de la composición mineralógica del material base (caolín). Cuando se añadió diatomeas en proporción de 40% a la muestra base, la DRX evidenció la mayor presencia de los minerales asociados a estas microalgas fosilizadas.

4.4. Actividades y alcance de las actividades

Las actividades se pueden clasificar en 4 fases principales:

4.4.1. Fase 1 recopilación de información.

- Antecedentes generales sobre mezclas de suelos caoliníticos y arenosos, así como de suelos diatomáceos.
- Construcción del estado del arte sobre los procedimientos individuales de los métodos de medición de succión y metodología para calibración de las curvas.

4.4.2. Fase 2 preparación de muestras y caracterización.

- Se crean mínimo 5 tipos de mezcla entre caolín, arena y suelos con presencia de microalgas fosilizadas, conformado un suelo con la integridad necesaria para tener las dimensiones requeridas para las mediciones de succión con los métodos señalados.
- El suelo se caracteriza mediante las metodologías tradicionales y los análisis no convencionales a nivel mineralógico y microestructura indicados en la metodología.
- Las muestras se preparan mediante el procedimiento específico explicado en el capítulo de metodología
- Es importante tener en cuenta que el parámetro de compactación no se controló durante la preparación de las muestras en razón a que el mismo no es objeto de análisis de este trabajo.

4.4.3. Fase 3 ejecución de ensayos

- Se ejecutan los ensayos de obtención de la curva de succión mediante las tres técnicas ya seleccionadas.

4.4.4. Fase 4 Análisis de resultados y discusión

- Mediante los resultados de ensayos de caracterización mineralógica, análisis imagenológico y curvas de retención (4 métodos), se logró analizar la dependencia de las propiedades de retención de agua en este tipo de materiales compuestos.

Capítulo 5

Ensayos de laboratorio y análisis de resultados

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior, se construye una curva SWCC en una muestra de caolín, acto seguido se modifican muestras agregando diferentes porcentajes de microalgas fosilizadas, para, de esta manera, construir las respectivas curvas y realizar una comparación de los resultados. Antes de discutir los resultados de las curvas, se muestra algunos resultados de la caracterización de los materiales, que pueden ayudar a explicar eventualmente algún comportamiento no esperado.

5.1. Difracción de Rayos X – DRX

En la primera muestra analizada para el caolín “puro” se puede observar que, al ser sometida a la DRX, los minerales que son revelados son mostrados en la Tabla 3. Es evidente la presencia de caolinita en la muestra, mineral principal de este tipo de caolín. Es esencial explicar que el gran contenido de sílice presente en la muestra, es debido a que los minerales arcillosos también poseen silicatos en su estructura, lo que se traduce en una presencia alta de este mineral para este ensayo de DRX.

Tabla 3 Resultados de DRX para muestra de caolín

Nota:	Mineral (% peso)	Formula química	Material
	Sílice	SiO ₂	59,38
	Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	31,33
	Illita	(KH ₃ O)(AlMgFe) ₂ (SiAl) ₄ O ₁₀	1,86
	Montmorillonita	(NaCa) _{0,3} (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	7,43

Elaborada por el autor, 2019.

Para la muestra con 40% de adición de diatomeas, se esperaba un aumento en la cantidad de sílice, puesto que estas microalgas fosilizadas durante el tiempo su estructura evolucionó a este tipo de mineral. En la Tabla 4 se muestran los resultados.

Tabla 4 Resultados de DRX para muestra de caolín con adición de 40% de diatomeas

Mineral (% peso)	Formula química	Material
Sílice	SiO_2	75,11
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	19,45
Illita	$(\text{KH}_3\text{O})(\text{AlMgFe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$	1,23
Montmorillonita	$(\text{NaCa})_{0,3}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	4,21

Nota: Elaborada por el autor, 2019.

5.2. Microscopio Electrónico de Barrido

Una vez realizadas las mezclas requeridas para el análisis, estas se revisaron por medio de microscopio electrónico de barrido (MEB). A continuación, se presentan las imágenes obtenidas con este método.

5.2.1. Muestra sin adición de microalgas.

A continuación, se presentan las imágenes de las muestras sin adición de microalgas. En la Figura 56, es posible analizar, desde la imagen obtenida, la estructura levemente laminar del caolín, el cual naturalmente presenta mineral caolinítico en mayor porcentaje, como se confirma

en el ensayo de DRX. A esta escala de magnificación, se observan algunos microporos presentes en la muestra. Es importante reseñar que las placas de Illita y Montmorillonitas reveladas en el análisis de DRX, no se pudieron identificar en las imágenes de SEM.

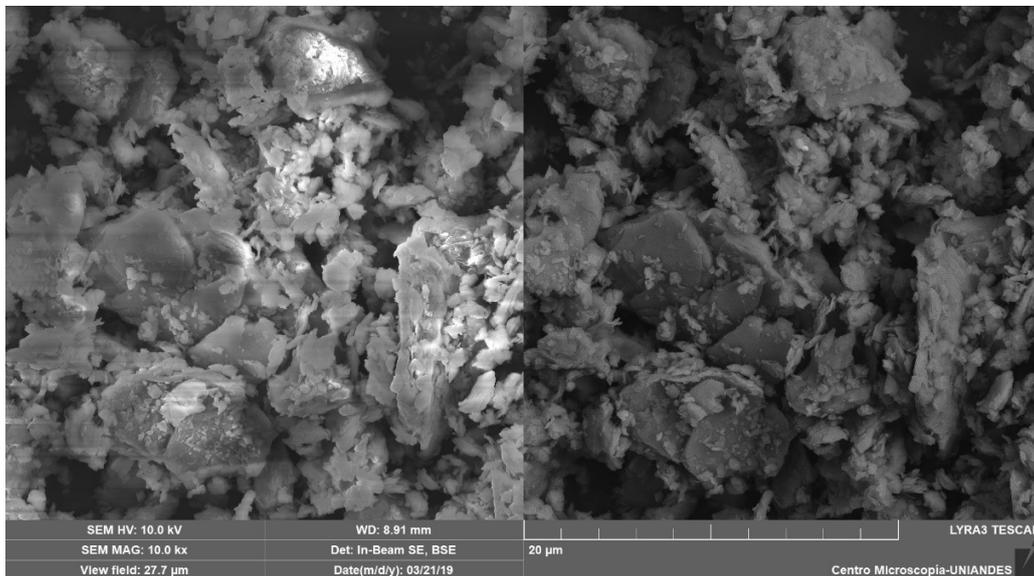


Figura 56. Muestra sin adición de microalgas, amplificación 10000x
Fuente: Elaboración propia, 2019.

5.2.2. Muestra con 10% de microalgas adicionadas.

A continuación, se presentan las imágenes de las muestras con adición de microalgas al 10%. En la figura 57, se continúa observando la misma microestructura de las muestras sin adición de microalgas, ya que el contenido aun es mínimo para que las mismas se perciban localizadas entre los microporos del material.

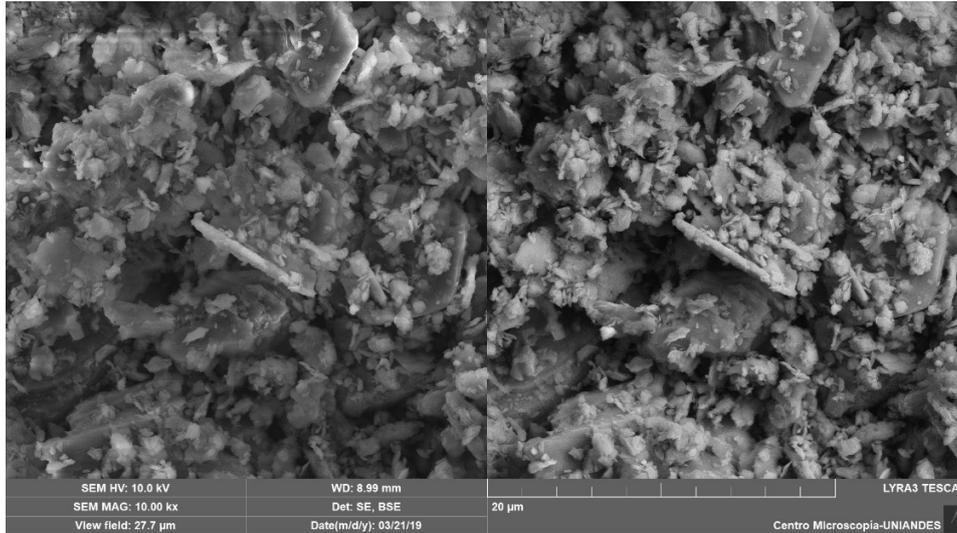


Figura 57. Material con adición de microalgas de 10%. Ampliación 10000x
Fuente: Elaboración propia, 2019.

5.2.3. Muestra con 40% de adición de microalgas.

A continuación, se presentan las imágenes de las muestras con adición de microalgas al 40%. En la Figura 57, ya en la primera aproximación para observar la superficie de la muestra, es evidente la presencia de las microalgas cilíndricas de diferentes tamaños y localizadas en diferentes configuraciones, de acuerdo con su posición. Esta especie se clasifica claramente como *Aulacoseira Granulata*, como fue observado por Caicedo et al (2019). Los orificios presentes en el cilindro pueden ser de 400 a 790 nanómetros de diámetro, por lo tanto, pueden ser llenados fácilmente por agua, mientras que las láminas de caolinita difícilmente puedan penetrar en ellos. Sin embargo, es posible que, eventualmente, puedan ingresar láminas de caolinita dentro del cilindro, lo que generaría una estructura más densa.

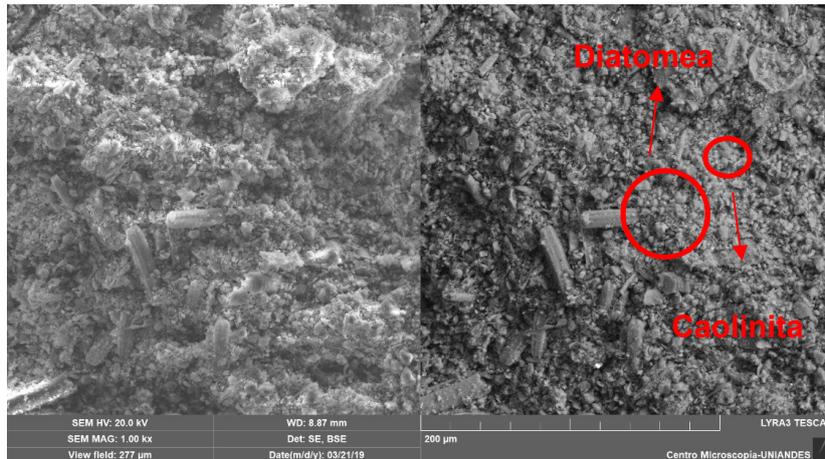


Figura 58. Muestra con 40% de adición de microalgas. Amplificación 1000x
Fuente: Elaboración propia, 2019.

La Figura 59 muestra una ampliación mucho mayor, en la que se observan claramente las diatomeas posicionadas dentro de la microestructura del caolín.

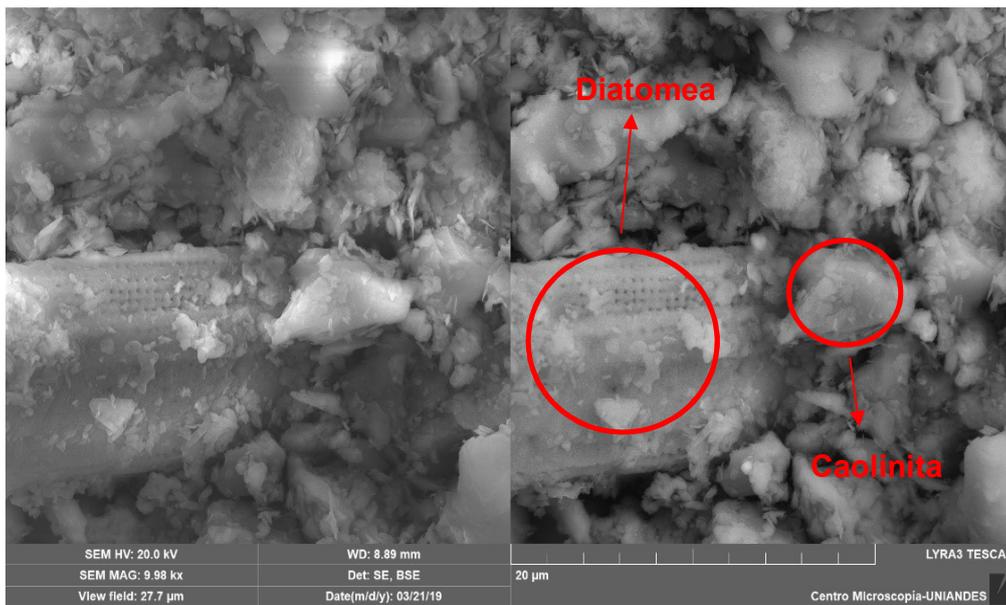


Figura 59. Muestra con 40% de adición de microalgas. Amplificación 9980x
Fuente: Elaboración propia, 19.

5.3. Curva SWCC Muestra inalterada

Para realizar una comparación de las curvas SWCC se construye la curva característica sin adición de microalgas fosilizadas, lo que permite generar una base confiable para efectuar el análisis de los efectos de la inclusión de microalgas.

Tabla 5 Resultados de ensayo de succión por el método de papel filtro

Muestra	Tipo Muestra	Humedad Suelo	Succión kPa
M1	Bolsa	0,0601	89070,6775
M2	Bolsa	0,0957	37433,0113
M3	Bolsa	0,1040	49129,3757
M4	Bolsa	0,0917	30619,6710
M5	Bolsa	0,1029	9635,4520
M6	Bolsa	0,1119	3159,8519
M7	Bolsa	0,1200	3508,5439
M8	Bolsa	0,1272	694,9690
M9	Bolsa	0,1411	71,8159
M10	Bolsa	0,1484	47,8242

M11	Bolsa	0,1582	16,3266
M12	Bolsa	0,1645	33,2454
M13	Bolsa	0,1728	7,1712
M14	Bolsa	0,1766	23,2855
M15	Bolsa	0,1910	12,9477

Nota: Elaboración propia, 2019.

Para construir la curva característica se realizaron 15 mediciones de succión con el método del papel filtro. La totalidad de los ensayos se presentan en el apéndice 1.

En la Figura 60 se presenta el resultado de la curva característica SWCC.

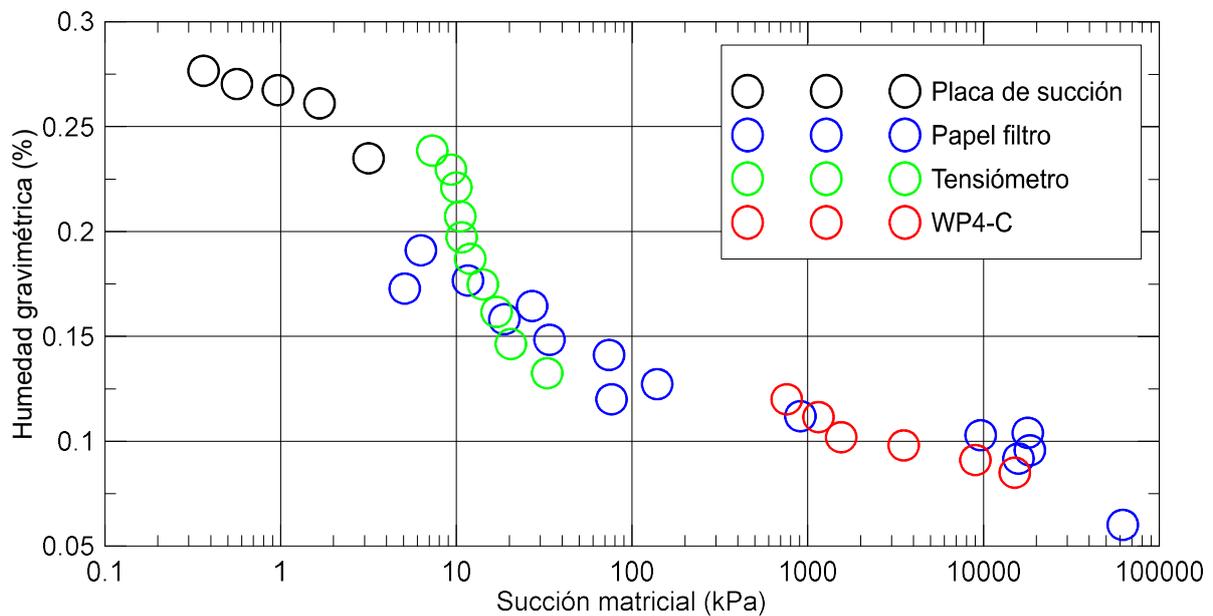


Figura 60. Curva característica para un suelo Caolín y Arena de Guamo.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Analizando la curva original, se pueden identificar 3 secciones: La primera sección, la cual se encuentra entre las abscisas 7 y 70 kPa, y genera una curva; la segunda sección asemeja una línea recta y se encuentra en las abscisas 70 y 9500 kPa, y la última sección correspondiente entre las abscisas 9500 y 85000 kPa la cual es una curva.

Adicionalmente se usa el método anteriormente mencionado para ajustar la curva mostrada en la Figura 61, utilizando los parámetros para general la curva dados por el programa SWRC Fit así:

```
=== VG model ===  
 $\theta_s = 0.33$   
 $\theta_r = 0.05$   
 $\alpha = 3.2132$   
 $n = 1.21527$   
 $R^2 = 0.99680$ 
```

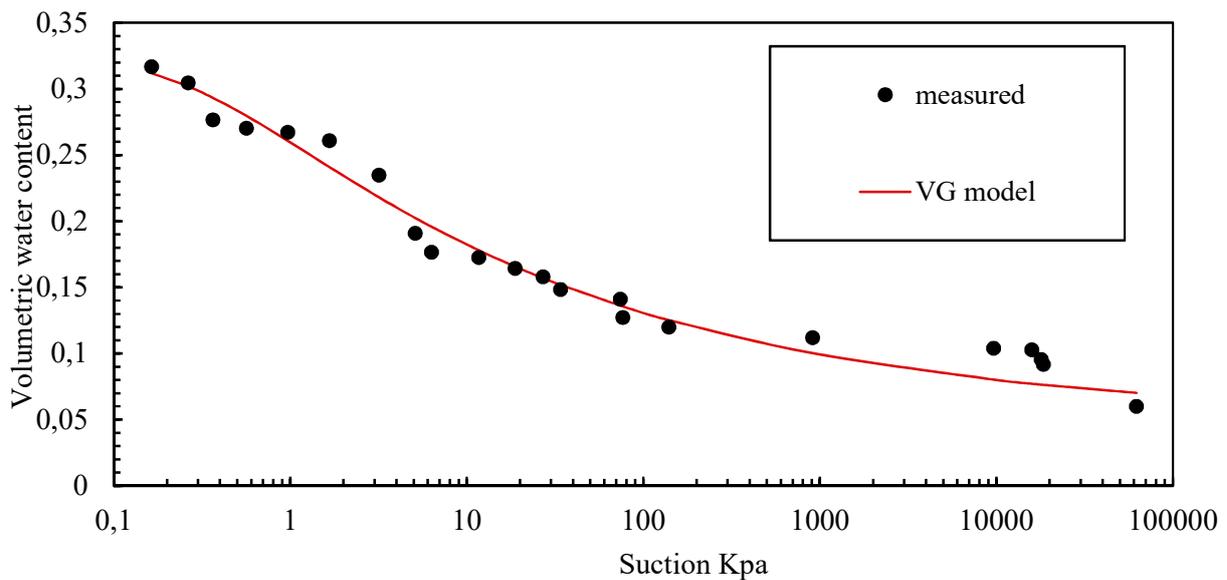


Figura 61. Curva característica para muestra inalterada ajustada por el modelo Van Genuchten
Fuente: Programa SWRC FIT_ Bajo GNU General Public License_Autor katsutoshi Seki_ <http://swrcfit.sourceforge.net/>

Según el resultado de la curva ajustada con la ecuación de Van Genuchten, se puede observar que aunque la curva puede predecir los valores en la regresión mostrada, la dispersión de los datos no permite observar el valor aproximado de entrada de aire, sin embargo para esta curva, la dispersión de los datos no está muy alejada de la regresión obtenida por la ecuación considerando que debe tener un coeficiente de determinación entre el 0,98 y el 0,99.

5.4. Curvas con variaciones en el contenido de microalgas fosilizadas

Una vez obtenida la primera curva sobre una muestra inalterada, se procede a generar curvas con variaciones en el contenido de microalgas, para analizar la posible incidencia en el comportamiento del suelo mezclado con microalgas fosilizadas.

5.4.1 Curva característica con adición del 5% de microalgas fosilizadas

Inicialmente se analiza el comportamiento de la curva con un contenido de microalgas del 5%. Para determinar la curva SWCC se utilizaron 2 metodologías, papel filtro y placa de succión. En la Figura 62 se presenta la curva SWCC con una adición de microalgas fosilizadas del 5%.

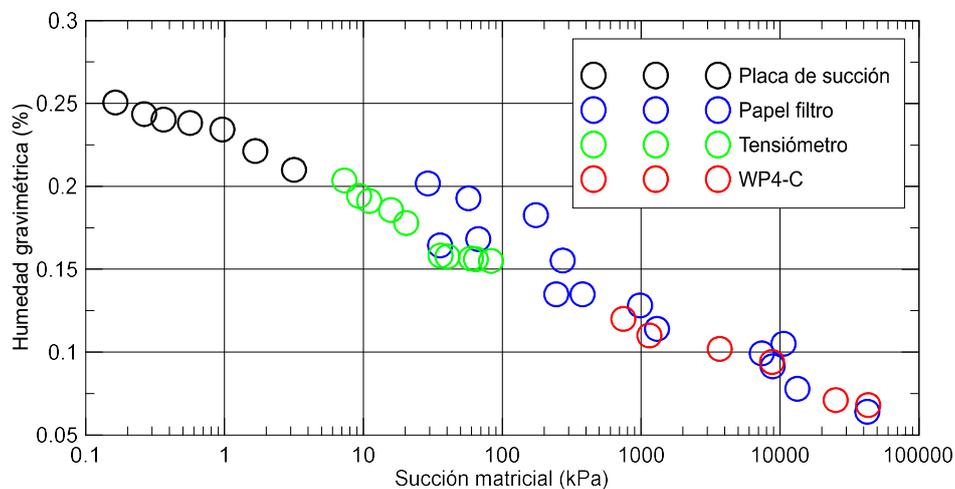


Figura 62. Curva SWCC para una mezcla de arena de guamo y 5% de microalgas fosilizadas

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Si comparamos el comportamiento de esta curva con la curva original, podemos observar que la inclusión de microalgas tiende a linealizar el comportamiento de la misma.

En la Figura 63 se presenta la regresión aplicada a los datos obtenidos con la inclusión de diatomeas fosilizadas, utilizando la ecuación de Van Genuchten, utilizando los parámetros para general la curva dados por el programa SWRC Fit así:

=== VG model ===

$\theta_s = 0.26$

$\theta_r = 8.2341e-08$

$\alpha = 5.2132$

$n = 1.0847$

$R^2 = 0.99680$

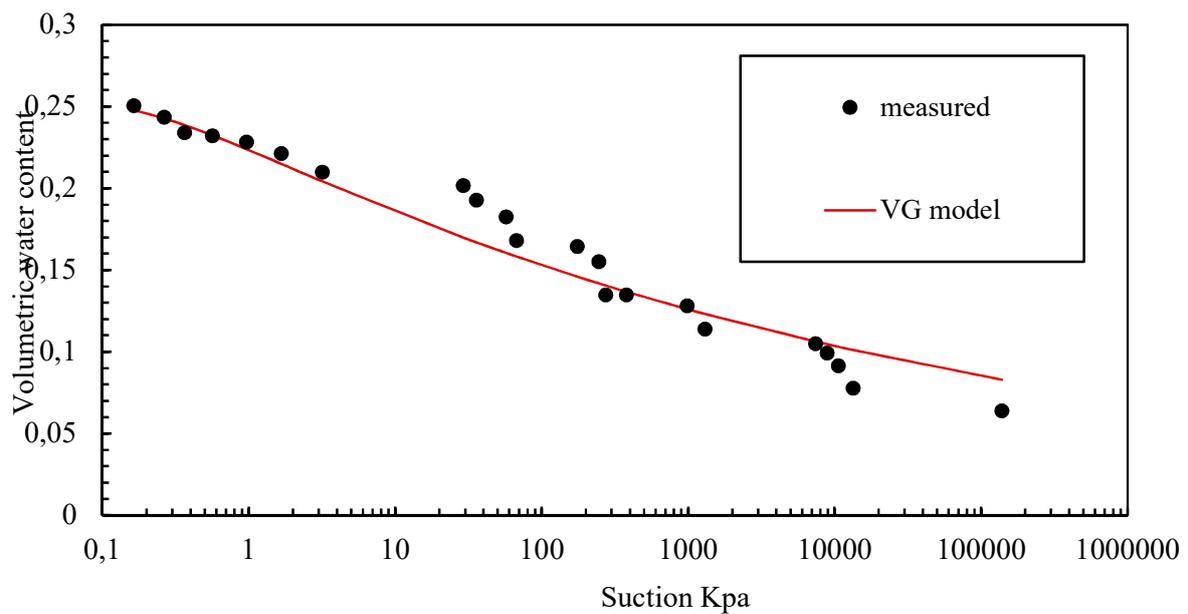


Figura 63. - Curva característica para muestra con la inclusión de 5% de diatomeas al suelo, ajustada por el modelo Van Genuchten

Fuente: Programa SWRC FIT_ Bajo GNU General Public License_Autor katsutoshi Seki_ <http://swrcfit.sourceforge.net/>

La regresión obtenida por la ecuación de Van Genuchten, utilizando el programa anteriormente mencionado presenta una regresión muy ajustada para valores altos de humedad, cercanos a la saturación, pero no para los valores de mediana y baja saturación los cuales muestran una separación representativa para coeficientes de determinación muy bajos entre 0,60 y 0,70.

5.4.2. Curva característica con adición del 10% de microalgas fosilizadas.

Al aumentar el contenido de diatomeas, se evidencia un cambio en la gráfica, generando una brecha que se encuentra entre los valores 3 y 50 kPa, como se puede notar en la Figura 64.

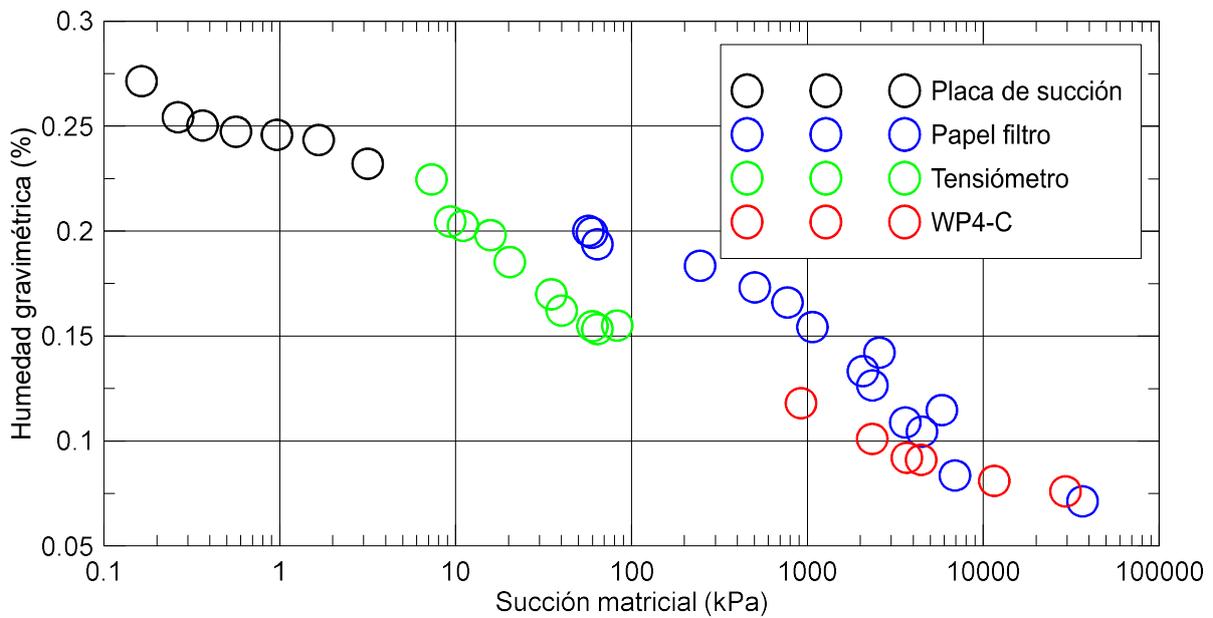


Figura 64. Curva característica con 10% de adición de microalgas fosilizadas
Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la Figura 65, se presenta la regresión aplicada a los datos obtenidos con la inclusión de diatomeas fosilizadas, utilizando la ecuación de Van Genuchten, utilizando los parámetros para general la curva dados por el programa SWRC Fit así:

=== VG model ===
 $\theta_s = 0.28$
 $\theta_r = 0.05$
 $\alpha = 6.2132$
 $n = 1.0927$
 $R^2 = 0.99680$

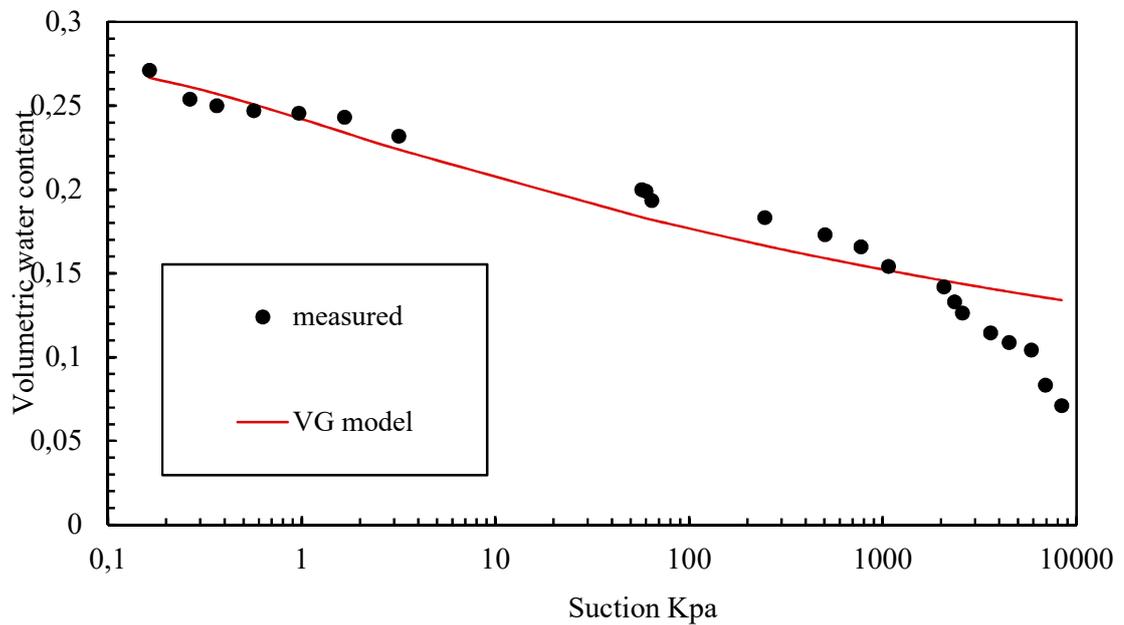


Figura 65. Regresión generada para una mezcla de arena de Guamo y 10% de microalgas fosilizadas, ajustada por el modelo Van Genuchten
Fuente: Programa SWRC FIT_ Bajo GNU General Public License_Autor katsutoshi Seki_ <http://swrcfit.sourceforge.net/>

La regresión obtenida por la ecuación de Van Genuchten no se ajusta a los datos obtenidos en laboratorio, por la dispersión tan alta que hay entre los datos, por ello no fue posible ajustar la misma. Se considera que esta curva debe tener un coeficiente de determinación entre 0,50 y 0,60.

5.4.3. Curva característica con adición del 20% de microalgas fosilizadas

Al incluir un porcentaje de microalgas fosilizadas al suelo, se ha visto una linealización de la curva característica con porcentajes bajos 5% y 10%, al aumentar el porcentaje al 20%, puede observarse como se obtiene una curva de retención casi perfecta donde la ecuación de Van Genuchten se ajusta a los datos obtenidos en laboratorio, se nota un incremento en la brecha en los resultados dados por los ensayos de papel filtro y placa de succión, esto se hace notorio en la Figura 66, la cual presenta una brecha entre 3 y 400 kPa.

Analizando la gráfica, al incluir un porcentaje tan alto no linealiza la curva, razón por la cual no se realizó una regresión, ya que se obtiene un factor "R²" de 0.67.

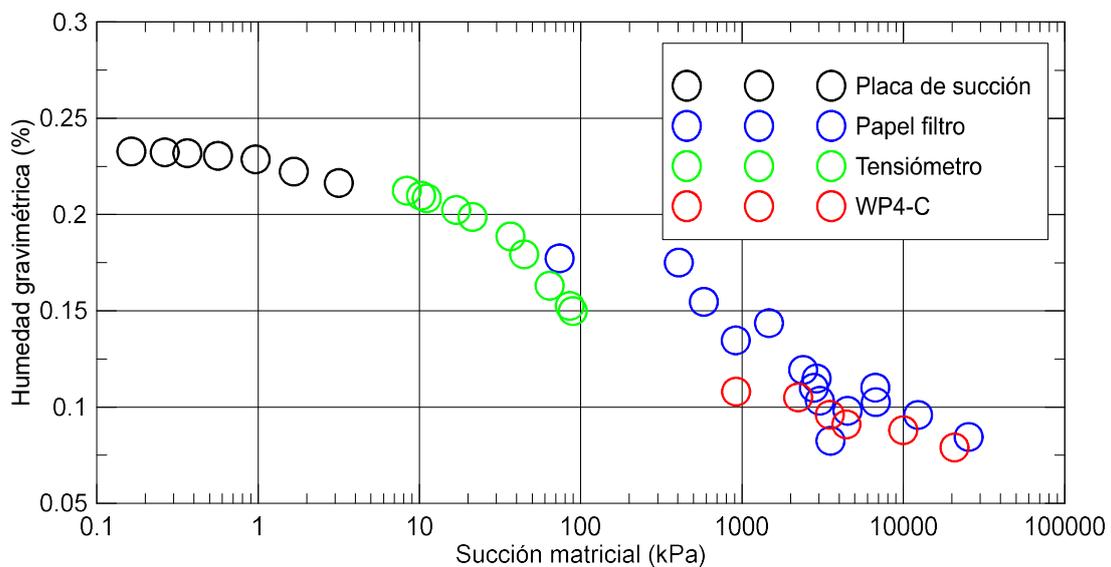


Figura 66. Curva característica para un suelo con una adición de microalgas fosilizadas del 20%
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 67, se presenta la regresión aplicada a los datos obtenidos con la inclusión de diatomeas fosilizadas, utilizando la ecuación de Van Genuchten, utilizando los parámetros para general la curva dados por el programa SWRC Fit así:

=== VG model ===
 $\theta_s = 0.23$
 $\theta_r = 8.2341e-08$
 $\alpha = 8.2132e-04$
 $n = 1.3527$
 $R^2 = 0.99680$

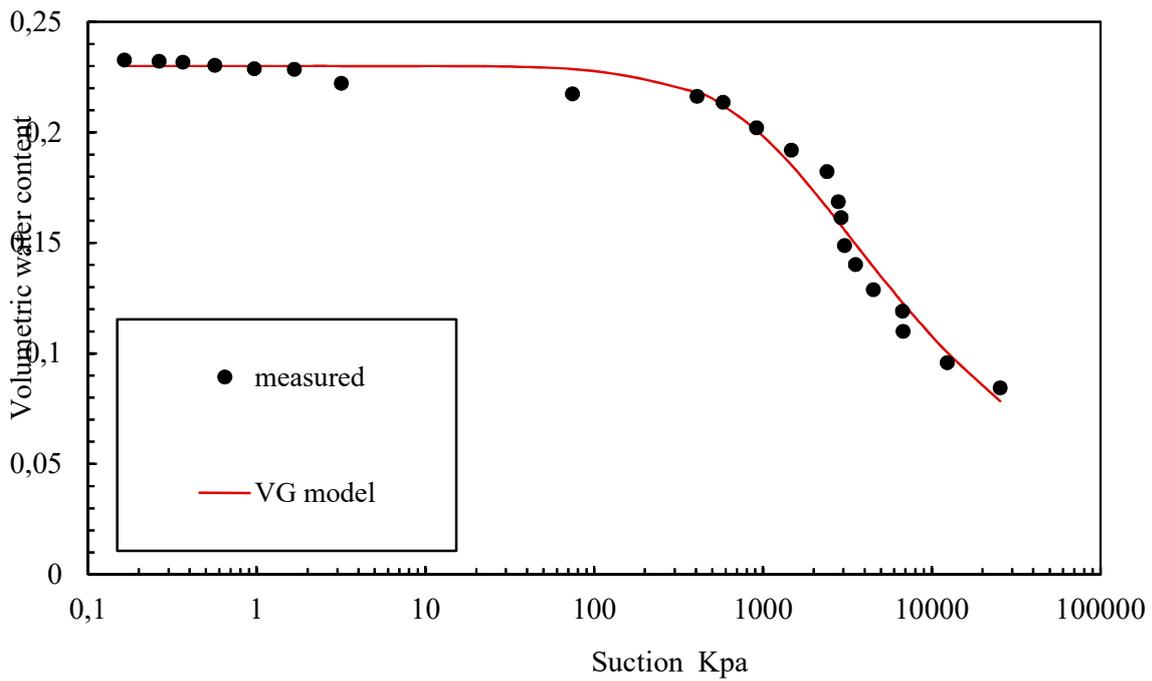


Figura 67 Regresión generada para una mezcla de arena de Guamo y 20% de microalgas fosilizadas, ajustada por el modelo Van Genuchten

Fuente: Programa SWRC FIT_ Bajo GNU General Public License_Autor katsutoshi Seki_ <http://swrcfit.sourceforge.net/>

La regresión obtenida por la ecuación de Van Genuchten se ajusta perfectamente a los datos obtenidos en laboratorio, sin embargo la curva muestra un solo dato que evidencia una dispersión considerable entre los datos. La regresión obtenida por la ecuación indica que esta curva es

confiable para los valores obtenidos, en la que claramente se puede obtener el valor aproximado de entrada de aire. Se considera un coeficiente de determinación de 0,99.

5.4.4. Curva característica con adición de 40% de microalgas fosilizadas

A diferencia del comportamiento notado con una adición del 20% de microalgas fosilizadas, la curva característica, con una adición del 40% de microalgas, mostrada en la Figura 68, presenta un comportamiento muy similar al encontrado en la muestra inalterada. Este comportamiento se evidencia al superponer las gráficas generadas para una muestra inalterada y la muestra con adición del 40%.

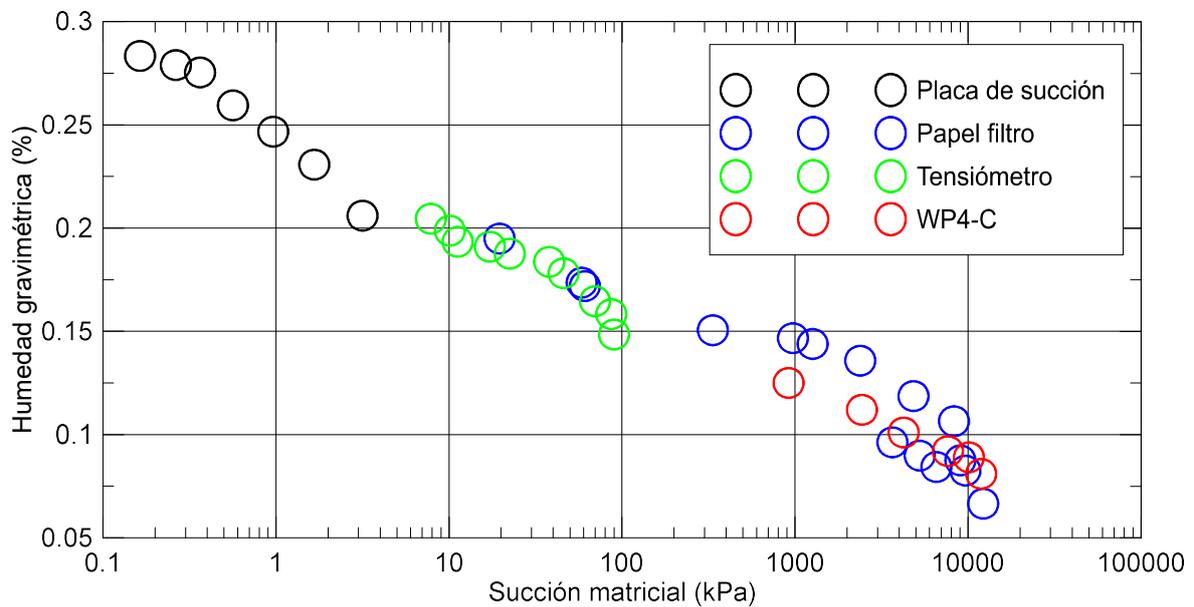


Figura 68. Curva característica para un suelo con una adición del 40% de microalgas fosilizadas

Fuente: *Elaboración propia*, 2019.

Figura 69, se presenta la regresión aplicada a los datos obtenidos con la inclusión de diatomeas fosilizadas, utilizando la ecuación de Van Genuchten, utilizando los parámetros para general la curva dados por el programa SWRC Fit así:

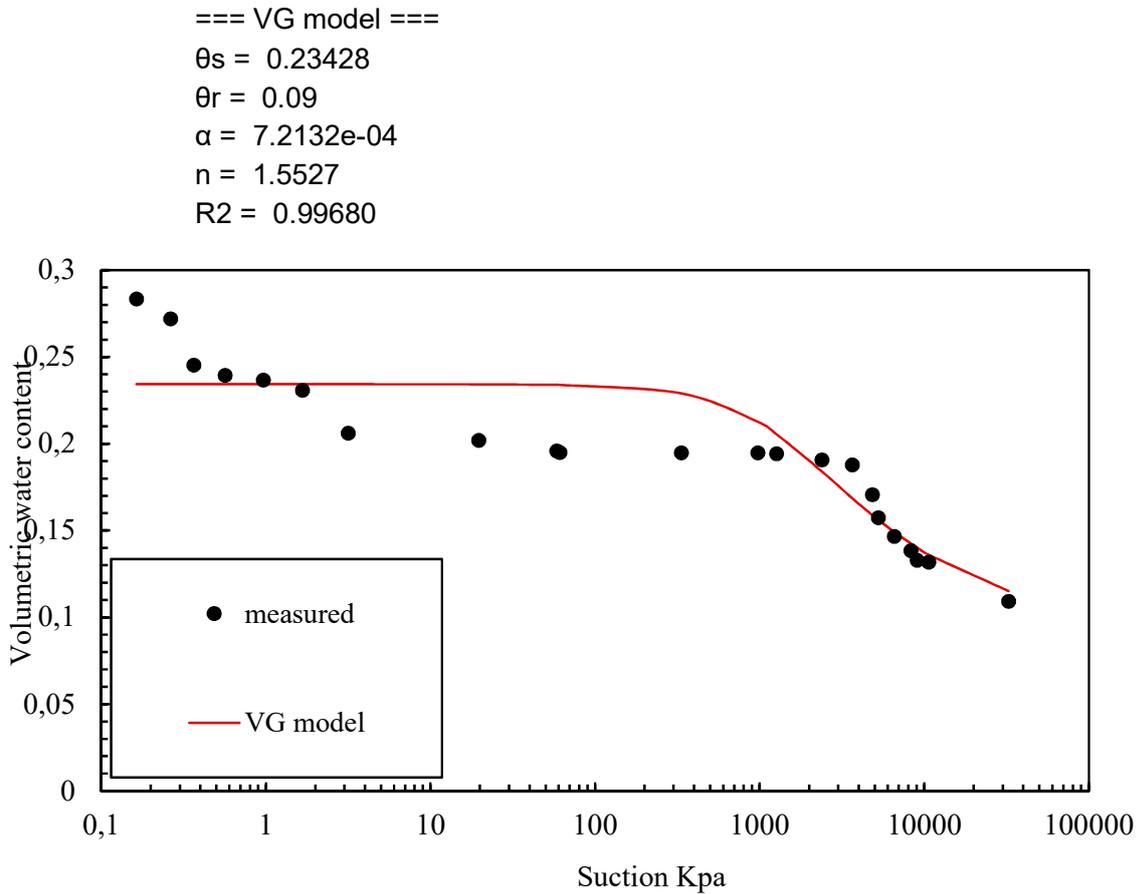


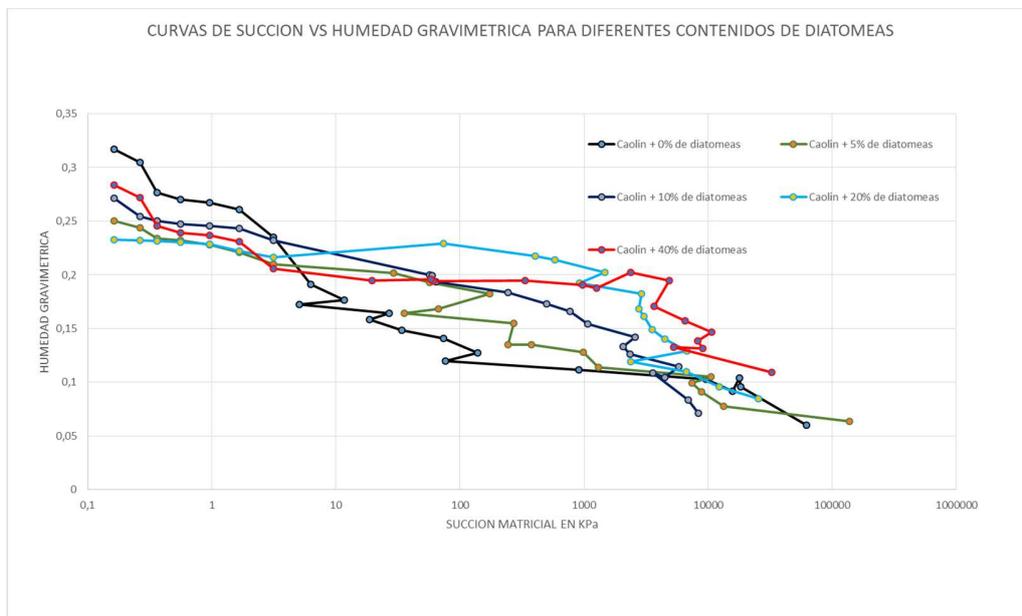
Figura 69 Regresión generada para una mezcla de arena de Guamo y 40% de microalgas fosilizadas, ajustada por el modelo Van Genuchten

Fuente: Programa SWRC FIT_ Bajo GNU General Public License_Autor katsutoshi Seki._<http://swrcfit.sourceforge.net/>

La regresión obtenida por la ecuación de Van Genuchten no se ajusta a los datos obtenidos en laboratorio, vale la pena mencionar que la curva muestra que los datos cercanos a valores de

suelo seco se ajustan a la curva, lo que indica que esta regresión para valores de humedad mínima es relativamente confiable e incluso en la curva se puede determinar un valor aproximado de entrada de aire. El coeficiente de determinación para esta regresión es muy bajo considerando que podría llegar al 0,65.

5.4.5. Grafico Representativo para todos los porcentajes 0%, 5%, 10%, 20% y 40% de adición de diatomeas en suelos caoliníticos.



Fuente: Elaboración propia

La grafica anterior presenta la distribución de los datos obtenidos en laboratorio para los diferentes métodos con las diferentes cantidades de diatomeas adicionadas artificialmente, se puede observar como algunos de los datos obtenidos se repiten entre una curva y otra teniendo en cuenta que los porcentajes de diatomeas son diferentes.

Conclusiones

Considerando el objetivo general del trabajo de grado, éste se logró efectivamente. Se generaron las curvas de retención de agua para suelos caoliníticos, considerando la variación en el contenido de microalgas fosilizadas. Las curvas fueron obtenidas mediante cuatro métodos, con el fin de reducir la incertidumbre en el trazado de la curva, por medio de técnicas que puede ser redundantes en los resultados.

En cuanto a la caracterización de los materiales involucrados, fueron realizados ensayos de Difracción de Rayos X que permitieron conocer la composición mineralógica para las muestras de caolín sin adición de diatomeas y con adición del 40%. Se pudo analizar que el mayor porcentaje de mineral obtenido en las muestras iniciales sin adición se refieren a la caolinita, mientras que las muestras de 40% de diatomeas revelan aumentos en sílice, lo cual es esperado debido a la fosilización de las microalgas en el tiempo.

El análisis imagenológico fue extremadamente útil, en el sentido visual de observar la presencia de las diatomeas de la especie *Aulacoseira Granulata*, la cual es identificada por su configuración cilíndrica. De acuerdo con esta observación y con el estado del conocimiento, de acuerdo con el cual los valores de los orificios en su estructura fluctúan entre 400 a 790 nm, es poco probable que láminas de caolinita puedan penetrar estos orificios. No obstante, los huecos mayores del cilindro si pueden ser rellenados de material caolinítico. Esto puede significar que la estructura presente algún tipo de rigidez con la presencia de microalgas, dada esta configuración, lo cual puede influenciar en los valores altos de ángulos de fricción de suelos blandos.

Una vez determinadas las curvas SWCC podemos concluir que:

1. El comportamiento de la curva SWCC inalterada, arroja tres tendencias acentuadas: La primera sección se encuentra entre las abscisas 7 y 70 kPa la cual corresponde a las succiones bajas (humedades cerca de la saturación) obtenidas mediante la placa de succión; la segunda sección asemeja una línea recta donde fueron estimadas las succiones medias mediante los tensiómetros y se encuentra en las abscisas 70 y 9500 kPa, y la última sección correspondiente entre las abscisas 9500 y 85000 kPa, correspondientes a las succiones altas

cuando el suelo está cerca de estar seco, obtenidas mediante el método de papel filtro e higrómetro de punto de rocío.

2. Para la muestra inalterada, la curva SWCC según la regresión obtenida con el método empírico de Van Genuchten muestra una tendencia lineal de los resultados, en la cual no es posible obtener una lectura de valor aproximado de entrada de aire, no obstante los datos presentan un coeficiente de determinación de 0,98 a 0,99.

3. Al incluir un porcentaje pequeño de microalgas fosilizadas (5%), la curva SWCC según la regresión obtenida con el método empírico de Van Genuchten se puede determinar que aunque esta sigue una tendencia lineal, se evidencia una dispersión importante en los datos, lo que indica un coeficiente de determinación muy bajo que podría estar aproximadamente entre 0,60 y 0,70. Muestra la mayor parte de dispersión de datos en succiones altas, es decir cuando el suelo está relativamente seco.

4. Al superar el 10% de contenido de microalgas fosilizadas, se puede apreciar un vacío entre los resultados obtenidos por los métodos de placa de succión y papel filtro, esta falta de resultados se ve al adicionar el 20% de microalgas, pero no se produce al adicionar el 40% de microalgas fosilizadas.

5. Al aumentar el porcentaje de microalgas fosilizadas, se nota una brecha entre los resultados arrojados por los diferentes métodos de ensayo (Placa de succión y papel filtro) lo cual disminuye el factor R^2 de la regresión, dando a entender que esta brecha es directamente proporcional al contenido de microalgas fosilizadas que se incluyan

6. Al incluir un porcentaje de microalgas fosilizadas (20%), la curva SWCC según la regresión obtenida con el método empírico de Van Genuchten se puede determinar que el modelo matemático se ajusta perfectamente a los datos experimentales obtenidos en laboratorio, lo cual claramente indica la confiabilidad del modelo utilizado permitiendo incluso obtener el valor aproximado de entrada de aire y reflejando en el gráfico un coeficiente de determinación del 0,99.

7. Al incluir porcentajes de 5%, 10% y 40% de microalgas fosilizadas, según la regresión obtenida con el método empírico de Van Genuchten se puede determinar que a medida que se aumentaron los porcentajes de diatomeas adicionadas artificialmente al suelo a partir del 5%, se observó una mayor dispersión entre los datos. lo que impide un ajuste óptimo de la curva de

succión por el modelo de Van Genuchten, situación diferente se presenta al adicional el 20% de diatomeas donde el parámetro es ampliamente confiable para la curva característica

8. Los resultados obtenidos indican, que un porcentaje óptimo para determinar un comportamiento predictivo de la curva SWCC está cercano al 20%, ya que los resultados obtenidos generan una regresión lineal.

En resumen, los métodos implementados permitieron estimar de manera apropiada la curva de retención de agua. Cada uno de ellos cubre una franja de rangos de succión, por lo cual son complementarios y disminuyen la incertidumbre cuando existen tramos de la curva vacíos generados al usar uno o dos métodos solamente. No obstante, los puntos de conectividad entre las metodologías pueden presentar variaciones. Esto se puede explicar por la diferencia de concepto físico usado en cada técnica y posiblemente, que en dos de los cuatro procedimientos el valor directo obtenido es la succión total y no la matricial.

El uso de más de dos métodos no solo es interesante para la reducción de la posible incertidumbre; si se obtienen datos confiables al comparar las técnicas, no solo en la redundancia de resultados, también en el punto de unión entre cada metodología. Es importante en cualquier caso considerar siempre metodologías que actúen cerca de la saturación, ya que normalmente es el tramo más difícil de reproducir en la WRC. En este caso, la placa de succión fue útil para obtener valores de succión bajos.

En las curvas se observó que la adición de diatomeas disminuye el potencial de succión en el suelo. El tamaño de grano de las diatomeas es similar al de una arena fina, es claro que los suelos granulares tienen bajos niveles de succión, porque la adición termina disminuyendo esta propiedad en el suelo.

Con este estudio se dio respuesta a la pregunta problema planteada ¿Es posible generar una curva de retención confiable de un suelo caolínico con contenidos diatomeicos, mediante el desarrollo de ensayos de laboratorio y metodologías matemáticas? Dando como resultado que si es posible general la curva característica y es especial una de ellas es altamente confiable y corresponde a la adición del 20% de diatomeas.

Referencias Bibliográficas

- Almeida, E. L., (2005). Filter paper method for the determination of the soil water retention curve, International Journal of Engineering Research and General Science.
- ASTM, Designation D5298-10. (s.f.) Standard test method for measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.
- Boltovskoy, D. (1998) Classification and distribution of South Atlantic recent polycystine radiolarian. *Paleontología Electrónica* Vol. 1 (2).
- Bradbury, Jane, (2004). Nature's Nanotechnologists: Unveiling the Secrets of Diatoms, Plos Biology
- Bradbury, JP., (1999), Continental diatoms as indicator of long-term environmental change. In the Diatoms: applications for the environmental and earth sciences. Cambridge University Press, Cambridge. Pp 169-182.
- Brooks y Corey, (1964). Hydraulic Properties Of Porous Media.
- Bryant, W. R. y Rack, F. R. (1990). Consolidation characteristics of Weddell Sea sediments: results of ODP LEG 113, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 113, pp 211-223.
- Bulut, R, Lyton RL y Wray W.K., (2001). Soil suction measurements by filter paper.
- Burger, C.A. y Shackelford, C.D. (2001). Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil-water characteristic curve functions. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 53–66
- Caicedo, B., (2019). Geotechnics of Roads: Fundamentals. Leiden, The Netherlands : CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group, London, UK

- Caicedo, B., Mendoza, C. (2018). Comportamiento mecánico de suelos con diatomeas en el depósito lacustre de la ciudad de Bogotá. In: IV Seminario Internacional de Ingeniería Sismogeotécnica y XVI Congreso Colombiano de Geotécnica, 2018, Paipa. XVI Congreso Colombiano de Geotécnica, 2018. v. 1. p. 1-10.
- Caicedo, B., Mendoza, C., Lopez, F., y Lizcano, A. (2018). Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. V. 10(2), p. 367-379.
- Caicedo, B., Mendoza, C., Lopez, F., y Lizcano, A. (2019). Some contributions to mechanical behaviors of lacustrine deposit in Bogotá, Colombia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 11(4), p. 1-25.
- Caicedo, B., Zuluaga D. y Slebi C., (2016). Characterization parameters and mechanical response in diatomaceous soil depending on species. Bogotá D.C.
- Caicedo, B., Zuluaga D. y Slebi C., (2019). Effects of micro-features of fossil diatom on the macroscopic behaviour of soils. *Géotechnique Letters*, 9(2), 1–21. doi:10.1680/jgele.18.00204
- Cevat-Catana, M., (2006). Compaction and Water Retention Characteristics of Champlain Sea Clay. MS thesis. University of Ottawa, Canada.
- Charbeneau, R. J. (2000). *Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Chen, M.P., Juang, J. y Ladd, J., (1993). Physical properties, compresional wave velocity and consolidation characteristics of slope sediments Townsville trough, Northeast Australia. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 133, pp. 625-632.
- Day, R.W., (1995). Engineering properties of diatomaceous fill. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.121, pp. 908-910.

- Decagon Devices Inc., (2014). Dew Point Potential Meter WP4, Operators Manual.
- Decagon Devices Inc., (2015). Generator a Soil Moisture Characteristic Using the WP4C, Application Note
- Díaz Rodríguez, JA y Santamaria, J.C., (2001). Mexico City, Soil Behavior at different strain: Observation and physical interpretation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Díaz-Rodríguez, J.A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 6, No. 2, pp. 111-130.
- Díaz-Rodríguez, J.A. y Martínez-Vázquez (2008). One-dimensional consolidation testing of lacustrine soil from Mexico City. *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Burns, Mayne and Santamarina eds.
- Díaz-Rodríguez, J.A., Leroueil, S. y Alemán, J.D. (1992). Yielding of Mexico City clay and other natural clays. *Journal of the Geotechnical Engineering*. Vol. 118, No. 7, pp. 981-995.
- Díaz-Rodríguez, J.A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E., y Girón, P. (1998). Physical, chemical and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*. 35: 600-610
- Feuerharmel, C y David Suits, L & Sheahan, TC & Gehling, W & Bica, AVD. (2006). The Use of Filter-Paper and Suction-Plate Methods for Determining the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils. *Geotechnical Testing Journal*
- Fredlum, M., (1999). The role of Unsaturated Soil Property Functions in practice of Unsaturated Soil Mechanics. PhD Thesis. University of Saskatchewan, Canada.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equation for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), 521 –523. ISSN 1208-6010.

- Fredlund, D. G., y Rahardjo, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. New York (1993)
- Fredlund, M., (1999). The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics. PhD thesis. University of Saskatchewan, Canada
- Hill, P.R. and Marstest, J.C., (1990). Controls on physical properties of Peru continental margin sediments and their relationship to deformation styles. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 112
- Holler, P.R., (1992). Consolidation Characteristics and permeabilities of sediments from the Japan Sea. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 127/128, pp. 1123-1133.
- Hong, Z., Tateishi, Y. y Han, J. (2006). Experimental study of macro and micro behavior of natural diatomite. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 132, No. 5, pp. 603-610.
- Hosagasi-Fuselier, T., (2006). Evaluation of Soil Water Characteristic Curves and Permeability Functions for Modelling of Seepage in Unsaturated Soils. MS thesis. Tufts University
- Khilnani, K. y Capik, M.L., (1997). Engineering properties of diatomaceous fill (discussion). Journal of the Geotechnical and the Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 589-592.
- Khilnani, K. y Capik, M.L. (1989). Diatomaceous soils: a new approach. Civil Engineering, ASCE, Vol. 59, No. 2, pp. 68-70.
- Ladd, J., Moran, K., Kroon, D., Jarrad, R., Chen, M., Palmer-Julson, A. y Gleen C. (1993). Porosity variation and consolidation on the Northeastern Australian margin. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 133, pp. 617-623.

- Lee, H.J., Kayen, R.E. y McArthur W.G. (1990). Consolidation, triaxial shear-strength and index-property characteristics of organic-rich sediment from the Peru continental margin: Results from leg 112. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 112, pp. 639-651.
- Lo, K.Y. (1962). Shear strength properties of a sample of volcanic material of the Valley of Mexico, *Géotechnique*, Vol. 12, No. 4
- López Molina, J.A. (2009). Tesis Comportamiento Cíclico de los suelos diatomáceos, Universidad Autónoma de Mexico
- López, P.J., Desclés, J., Allen, A.E. and Bowler, C. (2005). Prospects in diatom research. *Current Opinion in Biotechnology*. Vol. 16, pp. 180-186.
- Lu Ning y Likos, (2004). W.J, Unsaturated Soils Mechanics. Jhon Wiley & Sons Inc, New Jersey.
- Marsal, R.J. y Masari, Y.M. (1959). The subsoil of Mexico City. First Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City
- Marsters, J.C. y Christian, H.A. (1990). Hydraulic conductivity of diatomaceous sediment from the Peru continental margin. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 112, pp 633-638.
- McKillop, A.K., Moran, K., Jarrett, K., Farrell, J. y Murray, D. (1995). Consolidation properties of Equatorial Pacific Ocean sediments and their relationship to stress history and offsets in the leg 138 composite depth sections. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 138, pp 357-369.
- Mesri, G., Rokhsar, A. y Bohor B.F (1975). Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay. *Géotechnique*, Vol. 25, No. 3

- Meter Group AG. (2016). Operation Manual HYPROP 2. Obtenido de: http://library.metergroup.com/Manuals/18263_HYPROP_Manual_Web.pdf [consultado en: septiembre de 2019]
- Meter Group AG. (2017). Meter Environment. Obtenido de. Fuente: <https://www.metergroup.com/environment/products/hyprop-2/>
- Miller, C.J., Yesiller, N., Yaldo, K., y Merayyan, S. (2002). Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 128, No. 9
- Moya J.E., Rodriguez J.A. (1987). "The subsoil of Bogotá and the problems in Foundations". VIII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cartagena.
- Ng, C.W.W., y Pang, Y.W. (2000). Influence of Stress State on Soil-Water Characteristic and Slope Stability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 126, No. 2.
- Otálvaro I.F. (2011). Características de la curva de retención de suelos de agua en un suelo tropical compactado. Geotechnical conference. Obtenido de: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper439.pdf> [consultado en: septiembre de 2019]
- Pérez García, Natalia, (2008). Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. Publicación Técnica No. 313 Sanfandila, Qro. México.
- Pittenger A., Taylor, E. y Bryant W.R., (1989). The influence of biogenic silica on the geotechnical stratigraphy of the Voring Plateau, Norwegian Sea. Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific Results, Vol. 104, pp 923-940.
- Rack, F. R. y Palmer-Julson A. (1992). Sediment microfabric and physical properties record of late Neocene polar front migration, site 751, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 120, pp. 179-205.

- Rajasekaran, G. (2006). Influence of microfossils and pyrites on the behavior of ocean bed sediments. *Ocean Engineering*. Vol. 33, pp. 517-529.
- Rutledge, A.K., Roberts, J.A., Orsi, T.H., Bryant, W.R. y Kotilainen, A.T. (1995). Geotechnical properties and consolidation characteristics of North Pacific sediments. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 145, pp. 525-546.
- Schindler U., Mueller L., von Unold G., Durner W., Fank J., (2016). Emerging Measurement Methods for Soil Hydrological Studies. In: Mueller L., Sheudshen A., Eulenstein F. (eds) *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Springer Water. Springer, Cham
- Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M. y Locat, J. (2002). Influences of diatom microfossils on engineering properties of soils. *Soils and Foundations*, Vol. 42. No. 3, pp. 1-17.
- Sugii, T., Yamada, K. and Kondou, T. (2002). Relationship between soil-water characteristic curve and void ratio. *Unsaturated Soils. Proc. 3rd Int. Conf. On Unsaturated Soils (UNSAT 2002)*, Recife. Brazil (ed. Jucá. J.F.T., de Campos. T.M.P., and Marinho. F.A.M.), Vol. 1, 209-214.
- Talliaferro, (1933). The relation of volcanism to diatomaceous and associated sediments: *Bulletin of the university of California Depart of Geological Sciences*.
- Tanaka, H. y Locat, J. (1999). A microstructural investigation of Osaka Bay Clay: impact of microfossils on its mechanical behavior. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 493-508.
- Tanaka, H., Locat, J., Shibuya, S., Thiam Soon, T. y Shiwakoti, D.R. (2001). Characterization of Singapore, Bangkok and Ariake clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 38, No. 2, pp. 378-400.
- Thomé, J.F. (1993). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. *Centro de Estudios y Experimentación en Obras Públicas*.

- Universidad de los Andes (s.f.) Microscopía de barrido de electrones – MEB. Vicerrectoría de Investigaciones. Obtenido de: <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-meb/> [consultado en: septiembre de 2019]
- Van Genuchten (1993). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. Centro de Estudios y Experimentación en Obras Públicas.
- Vanapalli, S. K., (1994). Simple Test Procedures and their Interpretation in Evaluating the Shear Strength of an Unsaturated Soil. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Verdugo, R. (2008). Singularities of geotechnical properties of complex soils in seismic regions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 134, No 7, pp. 982-991.
- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E.-C., y Dredlund, D. G. (2004) Factors Affecting Drying and Wetting Soil-Water Characteristic Curves of Sandy Soils. Canadian Geotechnical Journal. 41:908-920
- Zeevaert, L. (1949). An investigation of the engineering characteristics of the volcanic lacustrine clay deposits beneath Mexico City. PhD. thesis, University of Illinois.

6. Apéndices

- 6.1. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 5% de diatomeas**
- 6.2. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo**
- 6.3. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 10% de diatomeas**
- 6.4. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 20% de diatomeas**
- 6.5. Curva Característica SWCC para una muestra de suelo inalterado compuesto por Caolín + Arena del Guamo + 40% de diatomeas**