

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA PREDICCIÓN DE LAS CURVAS
CARACTERÍSTICAS SUELO-AGUA EMPLEANDO LOS MODELOS DE
PERERA Y MODIFICADO DE KOVÁCS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

NEHEMIAS EDILSON SÁNCHEZ LOZADA

ASESOR:

JEFERSON EVER MENACHO CASO

Lima, Octubre, 2021

RESUMEN

En la tesis se expone la comparativa entre los modelos de predicción de Perera et al. (2005) y el Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003), los cuales predicen la Curva Característica Suelo-Agua en base a los resultados de ensayos de granulometría o límites de Atterberg. La comparativa se ha realizado con cuatro muestras de suelo, de las cuales se han obtenido sus Curvas Características Suelo-Agua, a través de los modelos de predicción, y estas han sido comparadas eligiendo la Curva que mejor represente al tipo de muestra de suelo estudiado. Luego con la Curva Característica elegida para cada una de las muestras, se ha realizado un ajuste con el modelo de Fredlund & Xing (1994). Como resultado del ajuste se han obtenido cinco parámetros, los cuales se han usado como datos de entrada para realizar el modelo de infiltración en el programa SEEP/W. En el modelado, se presentan dos casos de estudio, el primero es el análisis del caudal de agua, aplicando propiedades del suelo no saturado, como su Curva Característica y Curva de conductividad hidráulica. En el segundo modelo, se ha realizado la evaluación con las propiedades del suelo en un estado saturado, aplicando los conceptos estudiados en la mecánica clásica para el suelo saturado. Finalmente, se han comparado los caudales de agua de ambos modelos en un mismo punto de estudio, ubicado dentro del botadero, obteniendo como resultado un menor caudal en el modelo con propiedades del suelo no saturadas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por cuidarme y bendecirme en todo momento.

A GeoPUCP por los buenos amigos que me ha brindado

e introducirme a la rama de la geotecnia

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres

A mi familia y amigos que brindaron su apoyo

para alcanzar este logro tan anhelado

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Contenido.....	3
1.5 Alcances y limitaciones	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	5
2.1. Suelos no saturados.....	5
2.1.1. Fenómeno de capilaridad.....	7
2.1.1.1. Tensión superficial.....	8
2.1.1.2. Altura capilar	8
2.1.1.3. Presión negativa del agua en un tubo capilar	10
2.1.2. Succión	10
2.1.2.1. Succión matricial	11
2.1.2.2. Succión osmótica	12
2.1.3. Curva Característica Suelo-Agua	14
2.2. Modelos para estimar y ajustar una Curva Característica suelos-agua	17
2.2.1. Modelos para estimar una Curva Característica	18
2.2.1.1. Modelo de Perera et al. (2005).....	18
2.2.1.2. Modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003).....	22
2.2.2. Modelo para ajustar una Curva Característica	27
2.2.2.1. Modelo de Fredlund & Xing (1994).....	27
2.3. Modelos para estimar la curva de conductividad hidráulica	30
2.3.1. Modelo de Van Genuchten (1980)	31
2.3.2. Modelo de Fredlund & Xing (1994).....	32
2.4. Software para modelado: SEEP/W	33
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	34
3.1. Características de las muestras de suelo consideradas en el estudio	34
3.2. Estimación de la Curva Característica Suelo-Agua	36
3.2.1. Modelo de Perera et al. (2005)	36
3.2.1.1. Datos para aplicar el modelo.....	36
3.2.1.2. Procedimiento para obtener la Curva Característica	37
3.2.1.3. Flujograma para obtener la Curva Característica	37
3.2.2. Modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003)	37

3.2.2.1.	Datos para aplicar el modelo	37
3.2.2.2.	Procedimiento para obtener la Curva Característica	38
3.2.2.3.	Flujograma para obtener la Curva Característica	38
3.3.	Elección de la Curva Característica Suelo-Agua	39
3.3.1.	Flujograma para elegir la Curva Característica	39
3.4.	Ajuste de la Curva Característica.....	39
3.4.1.	Modelos de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980)	40
3.4.1.1.	Flujograma para ajustar la Curva Característica.....	40
3.5.	Modelado en el programa SEEP/W	41
3.5.1.	Flujograma de modelado en SEEP/W	41
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		42
4.1.	Comparativa de los resultados del modelo de Perera y Modificado de Kovács	42
4.2.	Curvas de conductividad hidráulica.....	53
4.3.	Modelado en programa SEEP/W	56
4.3.1.	Modelo con propiedades de los suelos en estado no saturado	56
4.3.1.1.	Definición de análisis y propiedades de los materiales	56
4.3.1.2.	Geometría de modelado y asignación de materiales.....	59
4.3.1.3.	Condiciones de borde.....	60
4.3.1.4.	Resultados.....	61
4.3.2.	Modelo con propiedades de los suelos en estado saturado	63
4.3.2.1.	Propiedades de los materiales	63
4.3.2.2.	Condiciones de borde.....	64
4.3.2.3.	Resultados.....	64
4.3.3.	Análisis de los resultados para el modelo saturado y no saturado	66
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		69
5.1.	Conclusiones	69
5.2.	Recomendaciones.....	70
REFERENCIAS		72
ANEXOS		76

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Zonas de un suelo saturado y no saturado. D. G. Fredlund (2000)</i>	7
<i>Figura 2.2. Fuerzas de cohesión y adhesión (Chang, 2013)</i>	8
<i>Figura 2.3. Ilustración de la altura capilar (a) y su correspondiente con la Curva Característica Suelo-Agua (Lu & Likos, 2004)</i>	9
<i>Figura 2.4. Altura de agua en tubos capilares de varios diámetros en equilibrio hidrostático (Lu & Likos, 2004)</i>	10
<i>Figura 2.5. (b) altura de agua debido a la adsorción y capilaridad (c) presión de agua en los poros, succión matricial y perfil SSP (Zhang & Lu, 2019)</i>	12
<i>Figura 2.6. Superficie capilar en agua pura (a) y solución sal-agua (b) (Miller & Nelson, 2006)</i>	13
<i>Figura 2.7. Curva Característica típica (López & Mendoza, 2016)</i>	15
<i>Figura 2.8. Variables de la Curva Característica Suelo-Agua (Zhai & Rahardjo, 2012)</i>	16
<i>Figura 2.9. Fases de una SWCC: secado y humedecimiento (Pham et al, 2003)</i>	17
<i>Figura 2.10. Contribución de la saturación por capilaridad y adhesión en la succión total para un suelo granular (Aubertin et al., 2003)</i>	26
<i>Figura 2.11. Contribución de la saturación por capilaridad y adhesión en la succión total para un suelo cohesivo (plástico) (Aubertin et al., 2003)</i>	26
<i>Figura 2.12. Ajuste de curva usando respecto a datos experimentales usando Van Genuchten (D. Fredlund & Xing, 1994)</i>	28
<i>Figura 2.13. Ajuste de curva usando respecto a datos experimentales usando Fredlund & Xing (1994)</i>	28
<i>Figura 2.14. Solución gráfica de los tres parámetros (a, n, m) (D. Fredlund & Xing, 1994)</i>	29
<i>Figura 2.15. Curva de conductividad hidráulica (D. G. Fredlund & H. Rahardjo, 2012)</i>	31
<i>Figura 3.1. Curvas granulométricas de las cuatro muestras estudiadas. Fuente: Propia.</i>	36
<i>Figura 4.1. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra A. (Fuente Propia)</i>	42
<i>Figura 4.2. Curva Característica de Perera versus Curva Característica experimental (Fuente propia)</i>	43
<i>Figura 4.3. Ajuste de la Curva Característica con Fredlund & Xing (1994) y van Genuchten (1980) para la muestra A.</i>	44
<i>Figura 4.4. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra B. (Fuente Propia)</i>	45
<i>Figura 4.5. Data experimental de la Curva Característica y ajuste de la curva para una arena (D. G. Fredlund, 2000)</i>	46
<i>Figura 4.6. Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra B.</i> .	47
<i>Figura 4.7. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra C. (Fuente Propia)</i>	48
<i>Figura 4.8. Medida de la Curva Característica de los suelos en el estudio de Krisdani et al. (2009)</i>	50
<i>Figura 4.9. Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra C.</i> .	51
<i>Figura 4.10. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra D. (Fuente Propia)</i>	51
<i>Figura 4.11 Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra D.</i>	53

<i>Figura 4.12. Curva de conductividad hidráulica, muestra A. (Fuente Propia)</i>	54
<i>Figura 4.13. Curva de conductividad hidráulica, muestra B. (Fuente Propia)</i>	54
<i>Figura 4.14. Curva de conductividad hidráulica, muestra C. (Fuente Propia)</i>	55
<i>Figura 4.15. Curva de conductividad hidráulica, muestra D. (Fuente Propia)</i>	55
<i>Figura 4.16. Propiedades asignadas a los materiales. (Fuente Propia)</i>	56
<i>Figura 4.17. Asignación de parámetros para la Curva Característica. (Fuente Propia)</i>	57
<i>Figura 4.18. Definición de la curva de conductividad hidráulica. (Fuente Propia)</i>	58
<i>Figura 4.19. Estimación de la curva de conductividad hidráulica. (Fuente Propia)</i>	58
<i>Figura 4.20. Definición de propiedades de materiales. (Fuente Propia)</i>	59
<i>Figura 4.21. Geometría del modelo. (Fuente Propia)</i>	59
<i>Figura 4.22. Asignación de materiales al modelo. (Fuente Propia)</i>	60
<i>Figura 4. 23. Condiciones de borde. (Fuente Propia)</i>	60
<i>Figura 4.24. Condiciones de borde. (Fuente Propia)</i>	61
<i>Figura 4.25. Resultados de líneas de flujo. (Fuente Propia)</i>	62
<i>Figura 4.26. Resultados del caudal de agua en el punto A del botadero para un caudal de lluvia de 0.000029 litros/seg/m² o de 75 mm en precipitación. (Fuente Propia)</i>	62
<i>Figura 4.27a. Resultados de caudal de agua punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)</i>	63
<i>Figura 4.27b. Resultados de caudal de agua punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)</i>	63
<i>Figura 4.28. Asignación de parámetros para el estado saturado. (Fuente Propia)</i>	64
<i>Figura 4.29. Resultados de líneas de flujo para estado del suelo saturado. (Fuente Propia)</i>	65
<i>Figura 4.30. Resultados de caudal de agua en la zona del pie del botadero, punto B, para una precipitación de lluvia de 75 mm. (Fuente Propia)</i>	65
<i>Figura 4.31a. Resultados de caudal de agua punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)</i>	66
<i>Figura 4.31b. Resultados de caudal de agua punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)</i>	66
<i>Figura 4.32a. Resultados de caudal de agua en punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm para los casos en estado no saturado y saturado (Fuente Propia)</i>	67
<i>Figura 4.32b. Resultados de caudal de agua en el punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm para los casos en estado no saturado y saturado (Fuente Propia)</i>	68

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Ensayos para determinar la succión y sus rangos medidos (Meza, 2012).....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.2. Base de datos usada en el análisis (Perera et al., 2005).....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2.3. Porcentaje de error asociado a los métodos para obtener una SWCC</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4.1. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra A.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4.2. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra B.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.3. Propiedades del suelo estudiado y un suelo extraído de la literatura (Krisdani et al., 2009)</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4.4. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra C.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.5. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra D.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.6. Resumen de modelos de predicción y de ajuste para las cuatro muestras estudiadas.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 4.7. Casos de caudales de lluvia. (Fuente Propia).....</i>	<i>61</i>

CAPÍTULO 1. Introducción

En 1960, en Estados Unidos y Canadá, se identificaron a los denominados “suelos problemas”, llamados así porque ocasionaban pérdidas millonarias anuales debido a daños en las estructuras, como en viviendas, terraplenes de carretera, alcantarillas, entre otras. Estas pérdidas eran ocasionadas por asentamientos diferenciales que las estructuras experimentaban cuando se producían cambios climáticos severos, característicos de la zona. Algunos de los suelos considerados “suelos problemas” eran los suelos expansivos, colapsables y suelos residuales, todos ellos relacionados a la teoría de suelos no saturados, teoría que explica cómo varía el comportamiento del suelo a medida que experimenta cambios en su contenido de humedad.

Algunos de los primeros investigadores que realizaron publicaciones en el estudio de los suelos no saturados fueron Delwyn Fredlund, Alan W. Bishop, A. M. Ridley, K. Dineen (Meza, 2012). Otros quienes siguieron el desarrollo fueron Anqing Xing, Van Genuchten, Y. Y. Perera, Claudia Zapata. Dichos investigadores realizaron publicaciones para entender el comportamiento del suelo ante variaciones en su contenido de humedad. Este trabajo fue complejo, ya que hasta ese momento solo se estudiaba el comportamiento de los suelos en un estado saturado.

Para entender y predecir el comportamiento de un suelo en estado no saturado, es necesario conocer sus propiedades. Para lograr ello, es necesario obtener su Curva Característica Suelo-Agua, la cual representa de manera gráfica la relación entre el contenido de humedad y la succión del suelo. Para determinar dicha curva se realiza ensayos como el de Papel Filtro, Placa de succión, Ensayo con Tensiómetro, entre otros. Otra forma es a través de los modelos de predicción, como los que se desarrollan en la presente tesis.

1.1 Motivación

Obtener una Curva Característica Suelo-Agua, a través de ensayos de laboratorio, demanda una alta inversión de tiempo, dinero, profesionales y equipos calificados para su ejecución. Una alternativa para reducir los costos y el tiempo de ejecución, son los modelos de predicción. Es esta una de las motivaciones de la presente tesis, la cual consiste en estudiar dos modelos de predicción, con los cuales se logren determinar la Curva Característica mediante los resultados de ensayos de caracterización física o límites de Atterberg, tratando de superar la dificultad que conlleva realizar los ensayos.

Los suelos no saturados implican el entendimiento de nuevos conceptos y la variación de algunos de ellos, desarrollados inicialmente bajo la teoría de la mecánica de suelos clásica. Su estudio demanda una mayor cantidad de tiempo para entender estos nuevos conceptos; es tal vez esta una de las razones por la cual, en distintas universidades peruanas, no se enseñan ni se incentiva a su investigación en una etapa de pregrado, desarrollándose investigaciones en maestrías y doctorados. Otra de las motivaciones de la tesis es la difusión de los conceptos fundamentales de los suelos no saturados y de esta manera fomentar al desarrollo de investigaciones, referente al tema, en una etapa de pregrado.

1.2 Hipótesis

El modelo de Perera et al. (2005) predecirá mejor la Curva Característica, ya que presenta una mayor cantidad de ensayos realizados y recolectados, 154 muestras de suelos no plásticos y 63 suelos plásticos, a comparación del modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003), el cual presenta ensayos de 36 muestras de suelo plástico y 27 muestras sin plasticidad.

En el modelado del botadero con cobertura de limo, el modelo realizado asignando las propiedades al suelo, considerando su estado no saturado, presentará un menor caudal de infiltración, que con el modelo en el cual se ha asignado al suelo propiedades del estado saturado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar y analizar las Curvas Características Suelo-Agua predichas por los modelos de Perera et al. (2005) y Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003), usando resultados de ensayos granulométricos y límites de consistencia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Predecir y estudiar las Curvas Características de los cuatro tipos de suelo según el método de Perera et al. (2005).
- Predecir y estudiar las Curvas Características de los cuatro tipos de suelo, con el modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003).
- Comparar y analizar las Curvas Características obtenidas, para las cuatro muestras, con ambos modelos de predicción.
- Elegir la curva más cercana, en forma y valores, a la obtenida por publicaciones de investigadores, a excepción de la primera muestra, la cual cuenta con un ensayo de laboratorio que la mide directamente.
- Evaluar la influencia de las Curvas Características predichas, en un análisis de infiltración para una cobertura de cierre de un botadero de desmonte de mina con el software SEEP/W y compararlo con el mismo modelo pero asignando propiedades del suelo en estado saturado.

1.4 Contenido

El presente trabajo de investigación se compone de 5 capítulos:

- El capítulo 1 es la introducción, donde se describe la motivación, la hipótesis, el objetivo general y los específicos, además de los alcances y limitaciones para realizar la investigación.
- El capítulo 2 consta de una revisión de la literatura, en donde se describe los conceptos de los suelos no saturados, los modelos de predicción y los de ajuste para la Curva Característica Suelo-Agua.
- En el capítulo 3 se presenta la metodología de la investigación, en la cual se presentan los pasos para determinar la Curva Característica mediante los métodos de Perera et al.

(2005) y el Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003) a través de flujogramas. Además de los modelos de ajuste y el modelado en el programa SEEP/W, también en flujogramas.

- El capítulo 4 contempla el análisis y resultados de las Curvas Características obtenidas por el método de Perera et al. (2005) y Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003). Además, incluye un modelo de infiltración con el software SEEP/W.
- En el capítulo 5 se presenta las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

1.5. Alcances y limitaciones

Los resultados de los ensayos, *Temple Cell* y de caracterización física de los suelos fueron brindados por el asesor de la tesis. Se presenta solo un ensayo que mide directamente la Curva Característica, ensayo es *Temple Cell*, el cual ha sido realizado para la muestra A. Para las tres muestras restantes, se han obtenido las Curvas Características de ensayos realizados y publicados por investigadores del tema, procurando que las propiedades físicas sean semejantes a las muestras de suelo estudiadas.

La trayectoria de la Curva Característica Suelo-Agua para un mismo tipo de suelo varía si el ensayo es realizado adicionando agua, llamado mojado o *wetting*, o si esta es extraída, llamado secado o *drying*. Para las Curvas de Predicción de la investigación, la trayectoria en la que se ha obtenido corresponde al de secado o *drying*.

CAPÍTULO 2. Revisión de la Literatura

2.1. Suelos no saturados

Las primeras investigaciones sobre los suelos no saturados o parcialmente saturados se desarrollaron en los años de 1960 y 1970, donde una de las principales motivaciones era explicar el comportamiento de los suelos ante una variación en su contenido de humedad, la cual generaba asentamientos diferenciales en construcciones como las de viviendas, pavimentos, alcantarillas, entre otras estructuras. Algunos de estos problemas se estudiaron principalmente en Estados Unidos y Canadá, zonas en las cuales predomina la existencia de suelos arcillosos. Se observó que este tipo de suelo presentaba un cambio volumétrico a medida que variaba su contenido de humedad, al generarse esta variación del contenido de humedad, el suelo pasaba de un estado saturado o seco a un estado no saturado. En la década de 1970 y 1980 se organizaron una serie de conferencias mundiales con el objetivo de entender mejor el comportamiento de los suelos no saturados, desarrollando investigaciones no solo en suelos expansivos, sino también en suelos compactados, suelos colapsables y suelos residuales (Meza, 2012).

Un suelo no saturado presenta tres fases: sólida, líquida y aire (D. G. Fredlund & H. Rahardjo, 2012). Otros investigadores como Fredlund & Morgenstern (1977) consideraron una cuarta fase, llamada interfase aire-agua o membrana contractiva. Cabe resaltar que la mecánica de suelos tradicional o clásica ha desarrollado diversas investigaciones considerando al suelo en un estado completamente saturado o seco, es decir, solo con dos fases sólido-agua o sólido-aire, respectivamente. Adicionar una o dos fases al suelo, a las fases ya existentes, como lo son la fase gaseosa y la fase agua-aire, hace más complejo entender y explicar su comportamiento como su resistencia al corte, la conductividad hidráulica, los esfuerzos efectivos, entre otros.

D. G. Fredlund (2000) propuso una representación de los suelos en sus diferentes estados. Estos estados son clasificados principalmente por su grado de saturación (S), dividiendo los suelos saturados y no saturados por una línea llamada nivel freático. La línea punteada, ver figura 2.1, representa dicho nivel freático, debajo de esta línea el suelo se encuentra en un

estado saturado ($S = 100\%$), es decir, todos los espacios vacíos están siendo ocupados por agua. Este contenido de agua ejerce una fuerza de igual magnitud en todas las direcciones, la cual representa a la presión de agua en los poros (u_w), y esta se encuentra a una presión positiva (Meza, 2012).

Por encima del nivel freático se encuentra la franja capilar, la cual está cercana al 100% de la saturación, esta zona está principalmente influenciada por el fenómeno de capilaridad, ya que el suelo asciende debido a este fenómeno, el cual será explicado a detalle en el ítem 2.1.1. En dicha zona se presentan la fase líquida continua y la fase gaseosa discontinua (D. G. Fredlund, 2000). En esta zona, el aire se encuentra alojado en distintas zonas de la matriz del suelo, pero en volúmenes discretos, esto ocurre entre la zona por encima del nivel freático y la zona por debajo de la llamada zona de dos fases.

La zona de dos fases es aquella zona intermedia donde se presenta una continuidad de la fase líquida y gaseosa. En su matriz, el suelo presenta un grado intermedio de saturación la cual oscila entre un 20% a 80%. Debido a que el grado de saturación disminuye, los volúmenes de aire van aumentando, siendo estos ya continuos en la matriz del suelo, al mismo tiempo el contenido de agua aún es considerable, por lo que presenta una continuidad en sus redes de flujo, pero en menor cantidad que la zona cercana al nivel freático. Esta zona es la de mayor estudio en la mecánica de suelos no saturada (D. G. Fredlund, 2000).

En la zona cercana a la superficie, el suelo se encuentra en un estado seco y con una saturación cercana al 0%. En esta fase, los volúmenes de aire predominan en toda la matriz del suelo, presentando un bajo o nulo contenido de agua. En esta zona se presenta una fase gaseosa continua y la posible existencia de una fase líquida, pero en un estado discontinuo (D. G. Fredlund, 2000).

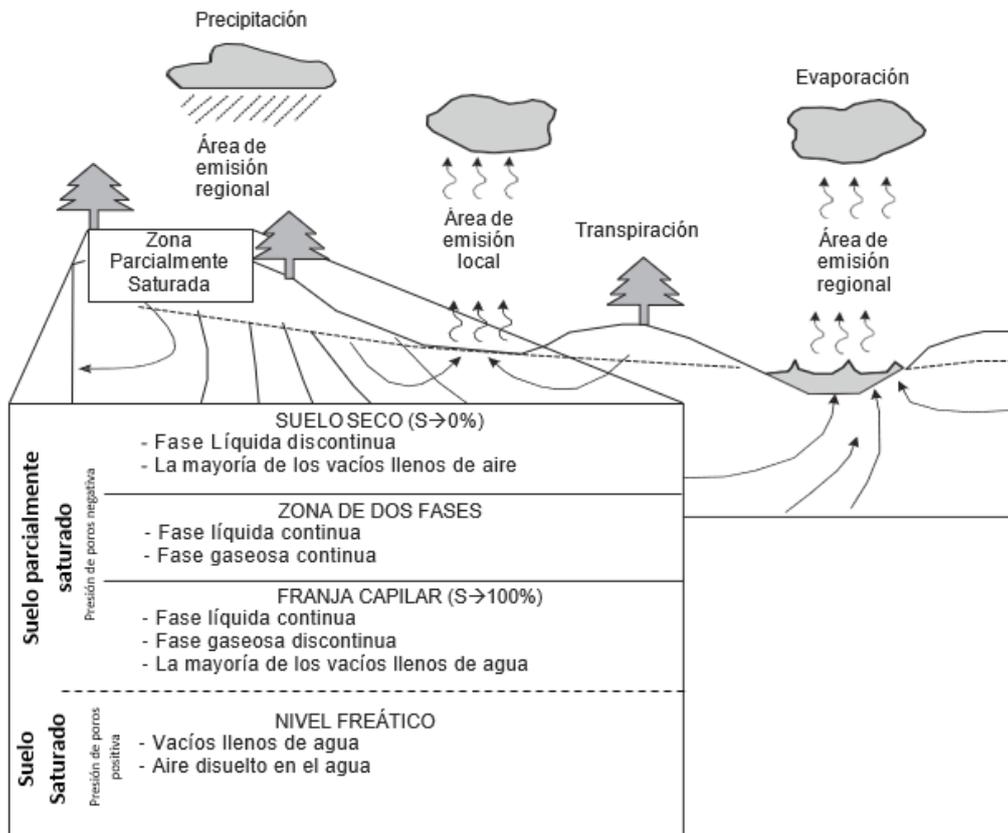


Figura 2.1. Zonas de un suelo saturado y no saturado. D. G. Fredlund (2000)

2.1.1. Fenómeno de capilaridad

El fenómeno de capilaridad es explicado mediante un tubo capilar; el agua contenida en dicho tubo asciende, en contra de la gravedad, hasta una altura conocida como la altura capilar. Existen diversas ecuaciones que relacionan a la altura capilar con el diámetro del tubo, el ángulo del menisco capilar, entre otros. Sin embargo, en el caso de los suelos, la geometría de su estructura es variable, como los distintos tamaños y formas, lo cual hace más complejo determinar su altura capilar.

Entender el fenómeno de capilaridad es muy importante en el estudio de los suelos no saturados, ya que explica el comportamiento del agua en la matriz del suelo. En las siguientes secciones se detallan los conceptos más relevantes de capilaridad, relacionado con los suelos.

2.1.1.1. Tensión superficial

La tensión superficial se genera en la interfase agua-aire o también conocida como membrana contráctil. En la figura 2.2 se observa dos moléculas de agua; la molécula A se encuentra rodeada de partículas de agua, generando fuerzas de cohesión entre ellas y de igual magnitud, como consecuencia de ello, la resultante de todas las fuerzas es cero, ya que se igualan en todas las direcciones. Caso particular ocurre con la partícula B, donde las fuerzas de cohesión dan como resultante una fuerza vertical, dirigida hacia abajo, ya que en la parte superior de la molécula B no existen moléculas de agua que equilibren dichas fuerzas. Además, las fuerzas en dirección horizontal forman un enlace entre ellas, lo que se conoce como la tensión superficial de los líquidos.

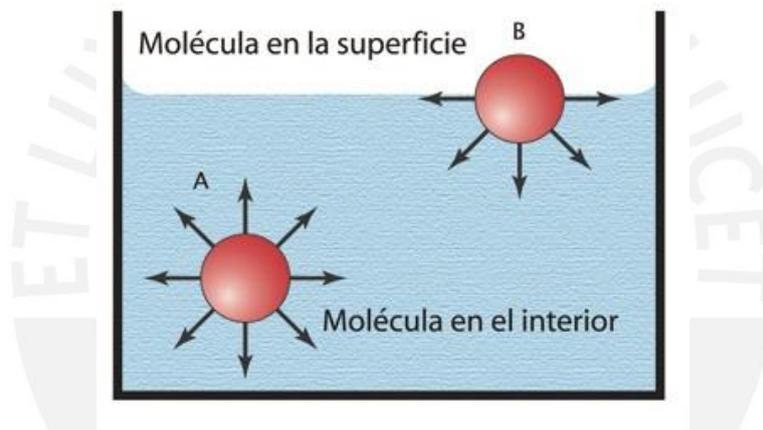


Figura 2.2. Fuerzas de cohesión y adhesión (Chang, 2013)

2.1.1.2. Altura capilar

El modelo del tubo capilar uniforme es usado para describir la altura capilar en los suelos no saturados. El concepto de tubos perfectamente uniformes no es representativo en el estudio de los suelos, las franjas o “dedos” de agua que se genera sobre el nivel freático puede ser conceptualizado como tubos agrupados de varios diámetros. Esto se ve conceptualizado en la figura 2.3a, donde se puede observar la presencia de diferentes alturas y diámetros de las franjas capilares. Además, en la figura 2.3b se muestra la curva de retención agua del suelo o SWCC, la cual muestra la relación existente en el contenido volumétrico de agua con el valor de succión (Lu & Likos, 2004).

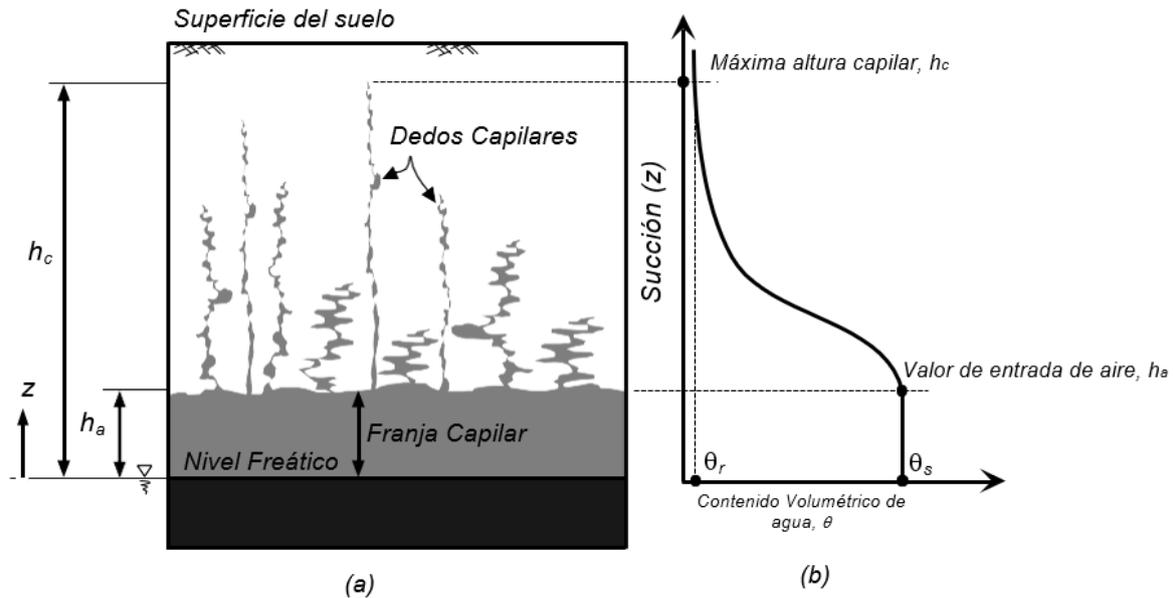


Figura 2.3. Ilustración de la altura capilar (a) y su correspondiente con la Curva Característica Suelo-Agua (Lu & Likos, 2004).

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando ecuaciones empíricas las cuales relacionan la altura capilar con las propiedades del suelo. Estas ecuaciones asumen al suelo en un estado inicialmente seco, luego experimenta un proceso de humedecimiento o mojado, debido al nivel freático (Lu & Likos, 2004). La ascensión de agua, responsable de humedecer al suelo, ubicado por encima del nivel freático, ocurre debido a la presencia de las fuerzas de adhesión. Esta fuerza de adhesión se genera entre las moléculas de agua y la superficie interior de los dedos capilares, ubicados en la matriz del suelo, de forma análoga a lo que ocurre en un tubo capilar, donde el agua asciende debido a la adhesión entre las moléculas de agua y la superficie interior del tubo, como se muestra en la figura 2.4.

En la figura 2.3b, se observa dos puntos de contenido volumétrico, el primero es el contenido volumétrico de agua saturado, θ_s , este punto representa a la zona del suelo ubicada debajo del nivel freático, en la cual no se presenta un contenido de aire. A medida que el agua va ascendiendo por encima del nivel freático, se van generando los vacíos de aire en la matriz del suelo, ocasionando en la gráfica un cambio en la curvatura, la cual es llamada el valor de entrada de aire. El agua que logra seguir subiendo, forma los llamados dedos capilares, y estos llegan hasta una altura llamada "máxima altura capilar, h_c ". Alcanzado este punto, el contenido de agua volumétrico que le corresponde es el denominado, contenido volumétrico residual, θ_r .

2.1.1.3. Presión negativa del agua en un tubo capilar

La figura 2.4 muestra tres tubos capilares con diferentes diámetros, se observa que, cuando el tubo presenta un menor diámetro la altura capilar es mayor, h_1, h_2, h_3 . Si se realiza un equilibrio hidrostático con nivel de referencia en el nivel de agua superficial, donde la presión de agua es cero, la presión que correspondería a un punto ubicado por debajo de dicho nivel tendrá un valor positivo. Caso contrario ocurre con la presión de un punto ubicado por encima de la superficie de agua, u_{w0} , en la zona de alturas capilares, donde en este caso las presiones presentan un valor negativo (Lu & Likos, 2004).

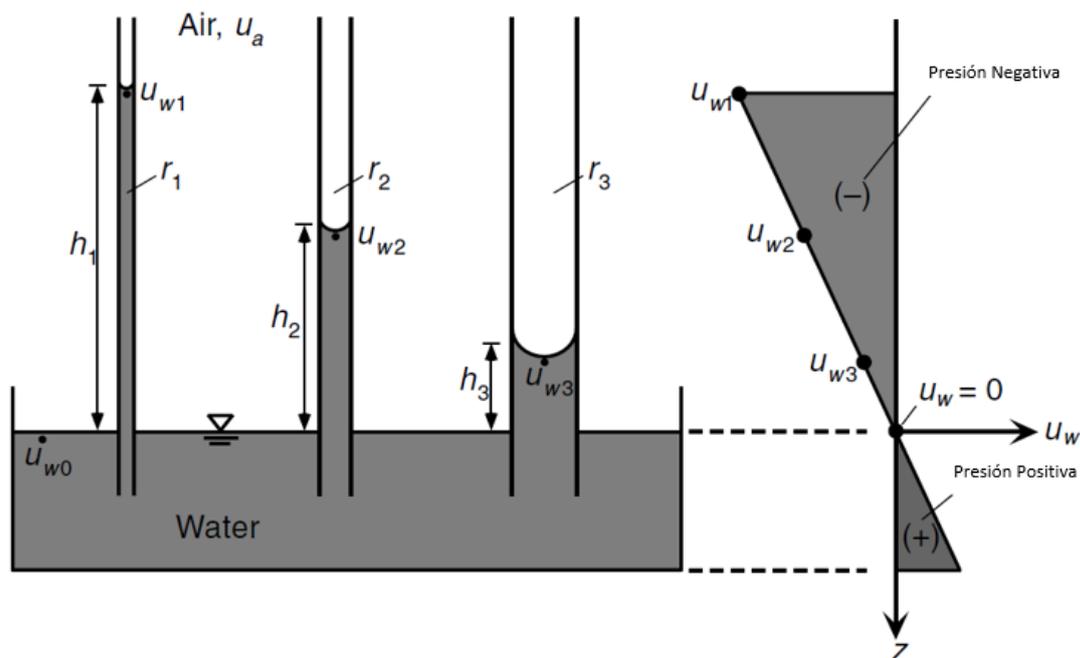


Figura 2.4. Altura de agua en tubos capilares de varios diámetros en equilibrio hidrostático (Lu & Likos, 2004)

2.1.2. Succión

Los parámetros principales que explican el comportamiento de un suelo no saturado es la succión (total, matricial u osmótica) y el contenido de agua en el suelo (humedad volumétrica, gravimétrica o saturación).

Ridley (1993) menciona que la succión es la energía que se necesita para remover una molécula de agua, ubicado en la matriz del suelo, mediante la evaporación. La succión total (Ψ) es la suma de dos componentes, la primera es la succión matricial (Ψ_m), la cual está

directamente relacionada con la capilaridad en los suelos y la segunda es la succión osmótica (π), la cual es dependiente de las sales disueltas en el agua, contenidas en el suelo. La siguiente expresión es la forma matemática de representar lo anteriormente mencionado.

$$\Psi = \Psi_m + \pi$$

2.1.2.1. Succión matricial

La succión matricial es una variable fundamental que gobierna el comportamiento de los suelos, como en su resistencia al corte, esfuerzos efectivos, conductividad térmica, presión de hinchamiento, entre otros. El valor de la succión matricial presenta una relación directa con el contenido de agua, que se encuentra por encima del nivel freático. Esta se define como la diferencia entre la presión de aire en los poros y la presión de agua en los poros ($u_w - u_a$). Debido a que el agua asciende por el fenómeno de capilaridad, la presión del agua en cualquier punto por encima del nivel freático presentará un valor negativo.

Como se ha mencionado, el contenido de agua por encima de la superficie freática es debido al fenómeno de capilaridad; sin embargo, Zhang & Lu (2019) afirman que solo el agua capilar no explica todo el fenómeno físico de la succión matricial, ya que se estaría ignorando la variación en el nivel de agua debido al fenómeno de adsorción, como se muestra en la figura 2.5. El contenido de agua debido a la adsorción está presente por encima de la superficie del grano de suelo, y por encima de este contenido de agua se encuentra el agua debido a la capilaridad. El contenido de agua debido a la adsorción es el que observamos cuando humedecemos al suelo, este se tornará de un color marrón oscuro y opaco, de presentarse un mayor contenido de agua, en nuestro caso debido a la capilaridad, dejaría el tono opaco y se observaría en un tono brillante, debido al agua ahora cubre la superficie del suelo.

La figura 2.5 explica de manera gráfica a los componentes de la succión matricial, debido a la capilaridad (franja celeste) y debido a la adsorción del agua (franja azul). Se observa que, la succión matricial es definida como la diferencia entre la presión de aire en los poros con la presión de agua en los poros ($u_w - u_a$), además se le resta la succión debido a la adsorción, tal como lo propone y explica Zhang & Lu (2019).

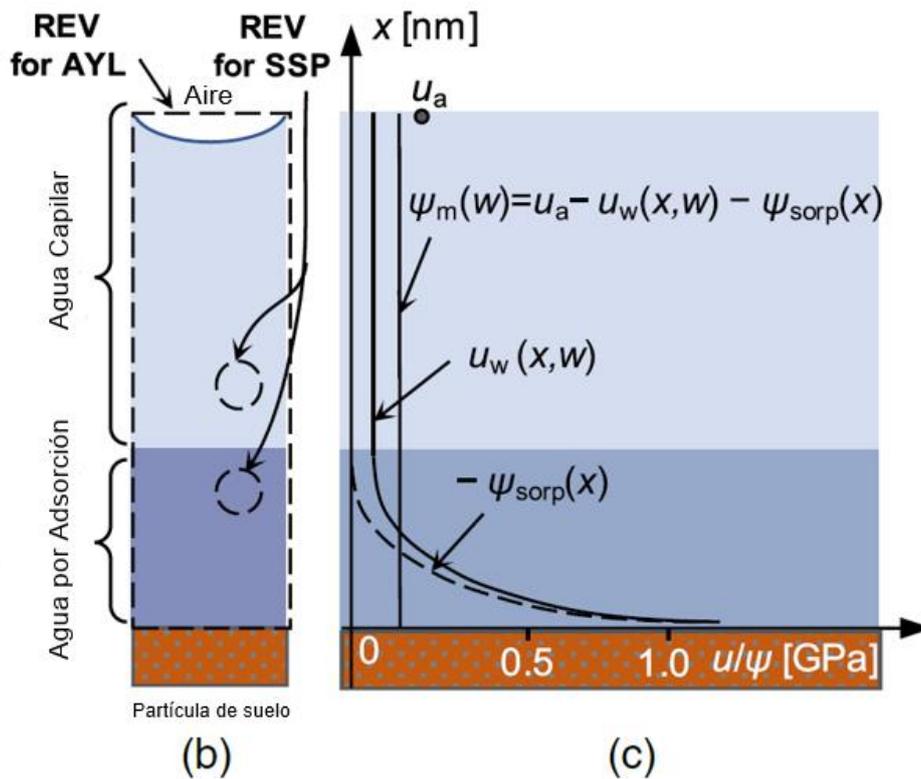


Figura 2.5. (b) altura de agua debido a la adsorción y capilaridad (c) presión de agua en los poros, succión matricial y perfil SSP (Zhang & Lu, 2019)

2.1.2.2. Succión osmótica

La sal en forma de cristal está compuesta por átomos de sodio (Na) y cloro (Cl), al mezclarse con el agua, un solvente, se genera una solución homogénea. Esta solución llamada solución salina, esta solución presentará una mayor temperatura de ebullición si la comparamos con la necesaria para ebullición el agua en estado puro, ya que las moléculas de agua y los iones Na^+ y Cl^- forman una unión muy fuerte entre ellos, mediante enlaces. En consecuencia, si se somete a la solución salina y al agua pura a una misma energía, se necesitará mucha más en la solución salina que en el agua pura. De forma análoga ocurre en los suelos, cuando estos presentan sales disueltas la energía que se necesita para extraer el mismo contenido de agua será mayor que cuando el suelo no presenta sales disueltas, a esta energía adicional es la que se conoce como la succión osmótica (Meza, 2012).

Miller & Nelson (2006) explican de manera gráfica lo anteriormente mencionado, en la figura 2.6 (a) se muestra la altura capilaridad con el agua pura (A) y en la parte (b) la altura para la solución salina (A+B). Se observa como varía la posición del menisco capilar, esta variación se debe principalmente a la fuerza intermolecular generada en la superficie del

líquido, dicha fuerza aumenta cuando se presenta una solución salina, por la atracción entre moléculas de agua y los iones de sodio (Na⁺) y cloro (CL⁻), esto genera una reducción en la presión de vapor si la comparamos con la presión en el caso del agua pura, ya que ante una misma energía aplicada en la solución salina, se presentará una menor cantidad de vapor de agua (Miller & Nelson, 2006).

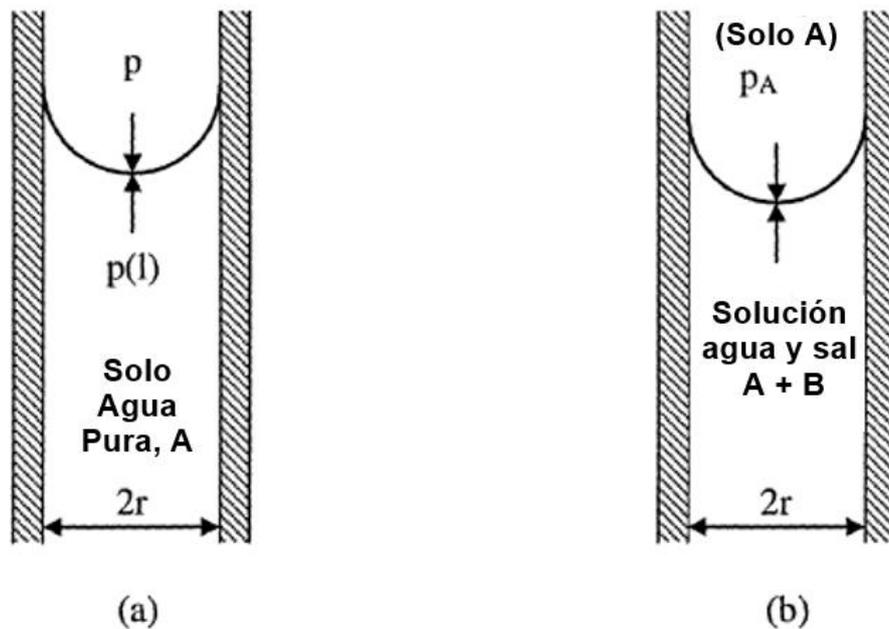


Figura 2.6. Superficie capilar en agua pura (a) y solución sal-agua (b) (Miller & Nelson, 2006)

El equilibrio entre las presiones se explica mediante la ecuación de Kelvin, con variaciones para los casos (a) y (b), como se muestra en las siguientes líneas.

$$p = p^0 \exp \left[-\frac{2T_s V_m}{rRT} \right] \dots \dots \dots (a)$$

Donde, p = presión de vapor por encima del menisco capilar, p⁰ = presión normal de vapor por encima de una superficie líquida plana, V_m = volumen molar de la fase líquida, T_s = tensión superficial en la interfase (menisco), r = radio de curvatura del menisco, R = constante del gas por mole, y T = temperatura (K°).

$$p_A = p_A^* \exp \left[-\frac{2T_s V_m}{rRT} - x_B \right] \dots \dots \dots (b)$$

Donde, p_a = presión de vapor por encima del menisco capilar influenciado por la solución sal-agua, p_A^* = presión de vapor del solvente puro (A), X_B = fracción molar de soluto (sal) en la solución.

Finalmente, se muestra algunas formas de medir la succión osmótica, la primera es en base a la estimación de la concentración de NaCl en el agua, con la fórmula de Lange, y la otra forma es la diferencia entre la succión total y la succión matricial ($(\Psi) - (u_w - u_a)$) (Miller & Nelson, 2006).

2.1.3. Curva Característica Suelo-Agua

La Curva Característica Suelo-Agua (*Soil-Water Characteristic Curve, SWCC por sus siglas en inglés*) es una propiedad fundamental en la solución de los problemas relacionados a los suelos no saturados, como los suelos expansivos y colapsables. Además, la Curva es la información principal requerida para análisis de filtración, esfuerzos cortantes, cambios volumétricos, flujos de aire en el suelo y flujos de calor (D. G. Fredlund & H. Rahardjo, 2012).

La Curva Característica Suelo-Agua relaciona a la succión y al contenido de humedad del suelo, es decir, define el comportamiento del suelo ante cambios en la succión o contenido de humedad, como se muestra en la figura 2.7. La succión que suele utilizarse en resultados de laboratorio es la succión matricial; sin embargo, también pueden ser interpretadas en términos de succión osmótica o la succión total, la cual es la suma de la succión matricial y osmótica. El contenido de agua en el suelo, es representado por la humedad volumétrica (θ), gravimétrica (ω) o el grado de saturación del suelo (S), siendo el contenido de humedad gravimétrico (ω) el más usado en ingeniería geotécnica, para el caso de la SWCC el más usado es el contenido de agua volumétrico (θ).

$$\text{Humedad gravimétrica: } \omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\text{Humedad volumétrica: } \theta = \frac{V_w}{V}$$

$$\text{Saturación: } S = \frac{V_w}{V_v}$$

Donde:

W_w / W_s : peso de agua y peso de sólidos, respectivamente.

V_w / V : Volumen de agua y volumen total, respectivamente.

El comportamiento de la SWCC va a depender principalmente de la distribución del tamaño de partículas, porosimetría, estructura y textura del suelo (Umbarila & Rodríguez, 2019). Además, la SWCC tiene una importancia en los estudios de los suelos no saturados, ya que está relacionada con otras propiedades del suelo como la permeabilidad, esfuerzo cortante y cambios volumétricos (M. Fredlund & D. G. Fredlund, 1997).

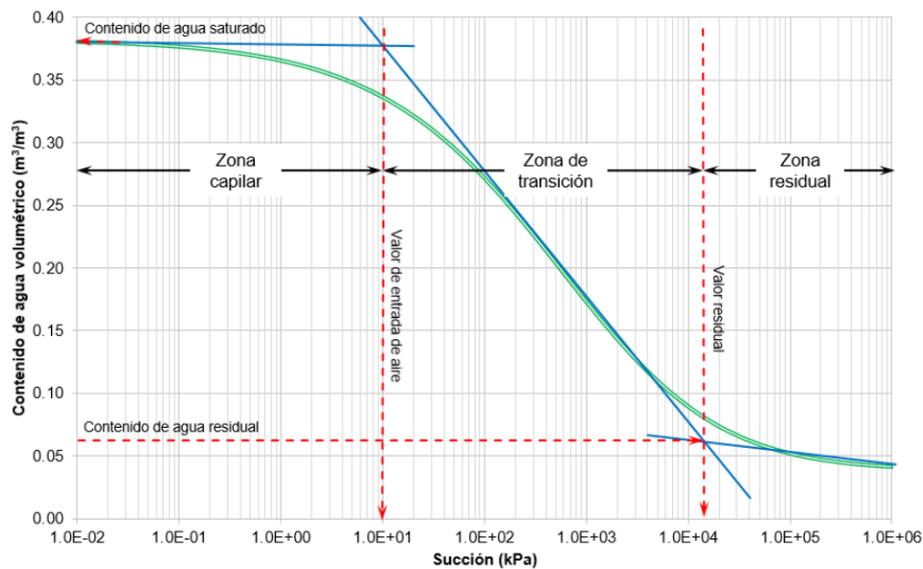


Figura 2.7. Curva Característica típica (López & Mendoza, 2016)

De la figura 2.7 se puede observar que una SWCC está dividida en tres zonas, estas son la zona capilar o zona de efecto de borde, la zona de transición y la zona residual o zona de saturación residual. En la primera zona, el suelo se encuentra en un estado saturado, y termina con el valor de succión llamado valor de entrada de aire, en esta zona se presenta una continuidad de la fase líquida y una discontinuidad de la fase gaseosa (D. G. Fredlund, 2000). En la segunda zona, el desplazamiento del agua es debido al ingreso de aire en los poros, esta zona termina en el contenido de humedad residual (θ_r); además de ello, en dicha zona la permeabilidad empieza a disminuir de manera considerable y se presenta una discontinuidad del agua en los poros (López & Mendoza, 2016), esta zona es también la conocida como la de dos fases, ver figura 2.1 . En la tercera zona, se presentan succiones altas donde la remoción del agua puede ser solamente por evaporación, además de ello la curva empieza a tener una

pendiente casi horizontal, se puede interpretar esto como, para un pequeño cambio del contenido de humedad se requiere un gran cambio en la succión (Hosagasi, 2006).

En la figura 2.8 se muestran las variables o puntos de una SWCC. El valor de entrada de aire (*AEV*: *Air-entry value* (Ψ_b, θ_s)) es el punto donde se inicia la desaturación del suelo, es decir el agua ubicada en los poros más grandes empieza a salir (López & Mendoza, 2016), gráficamente se define como la intersección entre, la línea tangente a la porción de línea recta de la SWCC y una línea horizontal a través del contenido de agua saturado (Walshire & Robbins, 2017). El valor residual (Ψ_r, θ_r) es aquel donde la fase líquida empieza un estado discontinuo y la fase de aire empieza a ser continua (Meza, 2012), de forma gráfica es definida como la intersección entre la línea tangente del tramo recto de la SWCC y la línea tangente al tramo de la curva donde esta empieza a caer linealmente, rango de succión alta (Walshire & Robbins, 2017).

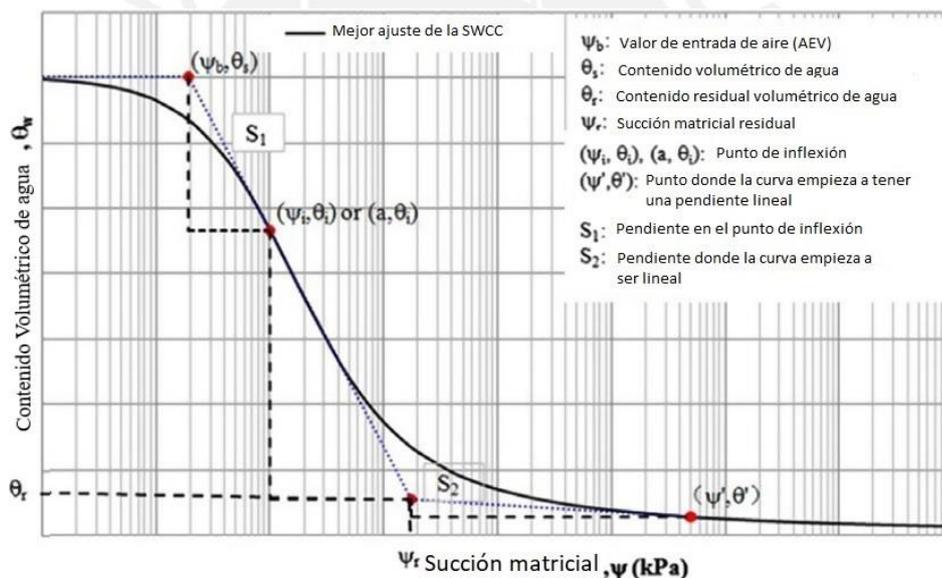


Figura 2.8. Variables de la Curva Característica Suelo-Agua (Zhai & Rahardjo, 2012).

En la figura 2.9 se puede observar que se presenta dos direcciones de las curvas, una de estas es la curva obtenida por el proceso de secado (*drying*) y la otra por el proceso de humedecimiento (*wetting*). Este desfase que existe entre ambas trayectorias de las curvas es la que se conoce como el fenómeno de histéresis, fenómeno debido al atrapamiento de agua en el suelo. Esto indica que no existe una única SWCC, sino que se generan infinitas curvas intermedias entre las trayectorias iniciales de humedecimientos y secado; sin embargo, son las curvas primarias, curvas iniciales de secado y humedecimiento, las más relevantes en la mecánica de los suelos no saturados (D. G. Fredlund, 2006).

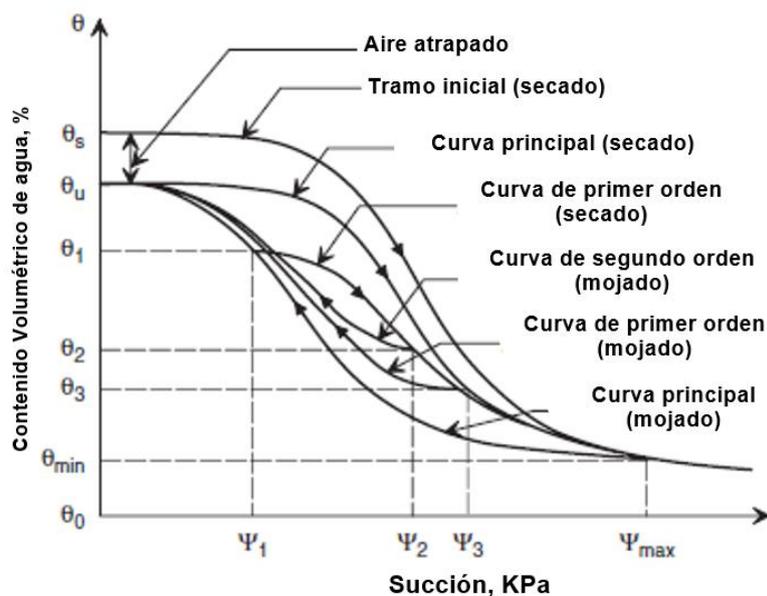


Figura 2.9. Fases de una SWCC: secado y humedecimiento (Pham et al, 2003)

2.2. Modelos para estimar y ajustar una Curva Característica suelos-agua

La determinación de las Curvas Características es muy importante para conocer el comportamiento de un suelo en dicho estado. En las últimas décadas, se han realizado diversas investigaciones para poder obtener las Curvas Características, presentado así a la comunidad geotécnica diferentes tipos de ensayos de campo o laboratorio que logren cuantificar la succión de los suelos, ya sea la succión matricial y/o la succión total. En la tabla 2.1 se muestra un resumen de los tipos de ensayos, los cuales están relacionados con el tipo de succión que miden y el rango para los cuales dan resultados de mayor precisión.

Tabla 2.1. Ensayos para determinar la succión y sus rangos medidos (Meza, 2012)

Componente de succión medida	Técnica/sensor	Rango de succión medido en kPa	Ensayo de campo o laboratorio
Succión matricial	Tensiómetros	0-100	Campo y laboratorio
	Técnicas de traslación de ejes	0-1,500	Laboratorio
	Sensores de conductividad eléctrica y conductividad térmica	0-400	Campo y laboratorio
	Papel filtro en contacto	Rango completo	Campo y laboratorio
Succión total	Psicrómetros termopares	100-8,000	Campo y laboratorio
	Técnica de espejo enfriado	1,000-450,000	Laboratorio
	Papel filtro en "no contacto"	1,000-500,000	Campo y laboratorio

La succión obtenida por ensayos, como el de papel filtro, arrojan datos puntuales del contenido de humedad versus la succión. Es decir, se obtiene una cantidad de puntos que bosquejan la trayectoria de la Curva Característica. Investigadores como Brooks & Corey (1964), Van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) desarrollaron ecuaciones empíricas para ajustar los datos de laboratorio y de esta manera poder obtener una función matemática para todo el rango de succión de la SWCC (de 0 a 10^6 kPa). Estos ajustes se han ido mejorando con el tiempo siendo las más conocidas y aceptadas las de Van Genuchten (1980) y la de Fredlund & Xing (1994), las cuales han sido aplicadas en el presente trabajo de tesis.

Los ensayos mostrados en la tabla 2.1 requieren de un equipamiento especializado, así como también de un personal altamente calificado para poder obtener resultados confiables. Estos factores hacen que realizar estos ensayos sean caros y en muchos casos fuera del alcance económico del proyecto. Es por ello, que diversos investigadores han realizado esfuerzos para poder generar una Curva Característica sin la necesidad de realizar ensayos de laboratorio o campo. Investigadores como M. Fredlund et al. (1997), Zapata et al. (2000), Aubertin et al. (2003), Perera et al. (2005) desarrollaron modelos que permitan generar una SWCC sin la necesidad de realizar ensayos, ya que observaron la relación existente entre las propiedades índice de un suelo (granulometría y relaciones masa-volumen) y su índice de plasticidad (IP) con la Curva Característica.

2.2.1. Modelos para estimar una Curva Característica

Para el presente trabajo de tesis, se han usado dos modelos de predicción, estos son el modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003) y el modelo de Perera et al. (2005).

2.2.1.1. Modelo de Perera et al. (2005)

Perera et al. (2005) postularon una ecuación que permita predecir la SWCC usando resultados de ensayos de las propiedades físicas del suelo, como la granulometría y el índice de plasticidad. La data para la ecuación propuesta fue de 154 suelos no plásticos y 63 suelos plásticos; es por ello que la ecuación es aplicable tanto para suelos plásticos como no plásticos. Adicional a ello, cada curva obtenida para cada tipo de suelo fue realizada mediante el ensayo de placa de succión, el cual permite obtener una medida continua de la humedad y un monitoreo en el cambio de volumen. De los 154 suelos no plásticos y los 63 plásticos, 134 curvas (entre plásticos y no plásticos) fueron tomados de la publicación de Zapata et al. (2000). En la tabla

2.2 se muestra la data resumida de los ensayos, la data NCHRP 9-23 es la ejecutada por Perera et al. (2005).

Tabla 2.2. Base de datos usada en el análisis (Perera et al., 2005)

Base de datos	Tipo de Suelo	
	No-Plástico	Plástico
Proyecto NCHRP 9-23	36	47
Publicación de Zapata (2000)	118	16
Total	154	63

Ya con las Curvas Características obtenidas de los ensayos, se realizaron los trabajos para obtener la ecuación que relacione los resultados de los ensayos de propiedades índices del suelo o índice de plasticidad con la succión y contenido volumétrico de agua del suelo. Los parámetros que Perera et al. (2005) proponen para su ajuste de curva (a_f , b_f , c_f , h_{rf}) fueron relacionados, mediante análisis de regresiones, con su granulometría e índice de plasticidad.

En la ecuación 2, se muestra la formulación del factor de ajuste para una curva característica, propuesto por Fredlund & Xing (1994). Este ajuste consta de una ecuación que relaciona la succión matricial versus el grado de saturación, en la cual Perera et al. (2005) cambian los parámetros de Fredlund & Xing (1994) e introducen sus parámetros los cuales están en función de las propiedades físicas del suelo.

$$\theta_w = C(h)x \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right] \quad (1)$$

Donde:

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_{rf}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_{rf}} \right)} \right] \quad (2)$$

S = Contenido de agua volumétrico (grado de saturación).

h = Succión matricial en kPa.

a_f = Parámetro de ajuste, el cual es una función del valor de entrada de aire (AEV).

b_f = Parámetro de ajuste, el cual es una función de la tasa de extracción del suelo una vez que el valor de entrada de aire (AEV) ha sido excedido.

c_f = Parámetro de ajuste, el cual es una función del contenido residual de agua (θ_r).

h_{rf} = Parámetro de ajuste, el cual es una función de la succión en la cual inicia el contenido de agua residual.

$C(h)$ = Factor de corrección el cual es función de la succión matricial, obliga a la curva a llegar a un contenido volumétrico de cero para una succión igual a 10^6 kPa.

A continuación, se muestran las ecuaciones para cada parámetro de ajuste, tanto para suelos plásticos como para no plásticos.

- Ecuación es para suelos no plásticos

$$a_f = 1.14a - 0.5 \quad (3)$$

Donde:

$$a = -2.79 - 14.1 \log(D_{20}) - 1.9 \times 10^{-6} P_{200}^{4.34} + 7 \log(D_{30}) + 0.055 D_{100}$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]}$$

$$m_1 = \frac{30}{[\log(D_{90}) - \log(D_{60})]}$$

Nota (Perera et al., 2005):

Existen casos extremos donde el valor de a_f es negativo, lo cual conllevaría a resultados erróneos. Es por ello que el valor de a_f ha sido limitado a 1.0.

$$b_f = 0.936b - 3.8 \quad (4)$$

Donde:

$$b = \left\{ 5.39 - 0.29 \ln \left[P_{200} \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0.57} + 0.021P_{200}^{1.19} \right\} m_1^{0.1}$$

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{m_2} + \log(D_{30}) \right]}$$

$$m_2 = \frac{20}{[\log(D_{30}) - \log(D_{10})]}$$

$$c_f = 0.26e^{0.758c} + 1.4D_{10} \quad (5)$$

Donde:

$$c = \log m_2^{1.15} - \left(1 - \frac{1}{b_f} \right)$$

$$h_{rf} = 100 \quad (6)$$

- Ecuación es para suelos plásticos

$$a_f = 32.835 \ln(wPI) + 32.438 \quad (7.1)$$

$$b_f = 1.421 wPI^{-0.3185} \quad (7.2)$$

$$c_f = -0.2154 \ln(wPI) + 0.7145 \quad (7.3)$$

$$h_{rf} = 500 \quad (7.4)$$

$$wPI = P_{200} (\text{decimales}) \times PI (\text{porcentaje}) \quad (7.5)$$

Donde:

P_{200} = Porcentaje que pasa la malla #200

$D\%$ = Diámetro de la partícula en mm

wPI = Es el ponderado del índice de plasticidad ($PI = Plasticity index$, expresado en porcentaje) con P_{200} (expresado en decimales).

Perera et al. (2005) obtuvieron los porcentajes de error, con herramientas estadísticas, los cuales fueron comparados con el método de Zapata et al. (2000). Los resultados entre los porcentajes de error con ambos métodos son considerables, ver tabla 2.3, esto se debe principalmente a la mayor cantidad de muestras estudiadas.

Tabla 2.3. Porcentaje de error asociado a los métodos para obtener una SWCC

Parámetros estadísticos	Suelos No Plásticos		Suelos Plásticos	
	Perera (2005)	Zapata (2000)	Perera (2005)	Zapata (2000)
eal _g	8.6%	88.5%	0.1%	20.4%
eab _s	14.8%	88.5%	9.2%	23.9%
Se/Sy	0.65	1.01	0.70	0.91
R ² Ajustado	0.58	-0.02	0.51	0.18

2.2.1.2. Modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003)

Como se mencionó en líneas anteriores, la Curva Característica Suelo-Agua depende de factores como la distribución del tamaño de partículas, porosimetría, estructura y textura del suelo; además de ello, de su composición química del agua intersticial. También se habló de las diferentes trayectorias de la Curva Característica, secado y humedecimiento. Ya repasado brevemente estos términos se presenta el Modelo de Kovacs (Aubertin et al., 2003).

El primer modelo, desarrollado por Kovács (1981), asumió que el agua es retenida por las fuerzas capilares y las fuerzas adhesivas; sin embargo, este modelo no se acopló a la ingeniería práctica, ya que presentaba muchas inconsistencias en sus parámetros propuestos. Aubertin et al. (2003) publicaron un artículo, basado en el modelo de Kovács (1981), en el cual realizó correcciones al método, ampliando incluso su aplicación a suelos plásticos. El modelo fue denominado modelo Modificado de Kovács (MK), dicho modelo relacionó la succión del suelo con su grado de saturación, S_r , que a su vez contiene a dos componentes, la saturación debida a la capilaridad, S_c , y la saturación debida a la adhesión, S_a .

Antes de mostrar los parámetros y ecuaciones del modelo Modificado de Kovács (MK), se mencionan algunas de las limitaciones del modelo. El modelo MK ha sido desarrollado solo para materiales homogéneos e isotrópicos, bajo un camino drenado. Además, factores como la microestructura interna, anisotropía y cambios de volumen no han sido tomadas en cuenta. A

continuación, se muestran las relaciones propuestas por Aubertin et al. (2003) para determinar la succión del suelo y en consecuencia su Curva Característica Suelo-Agua.

La ecuación 8 depende de componentes como la saturación por capilaridad, S_c , y la saturación por adhesión, S_a . La primera es una función de la distribución del tamaño de los poros, granulometría; la segunda está relacionada a las fuerzas de atracción de Van Der Waals, fuerzas que se generan entre la superficie de los granos y los dipolos de agua. Las saturaciones S_c y S_a tienen mayor relevancia en rango de succión bajo y alto, respectivamente. El grado de saturación, S_r , es expresado de manera matemática como se muestra en la ecuación 8.

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (8)$$

Donde:

S_r = Grado de saturación

θ = Contenido de agua volumétrico

n = Porosidad, relación entre el volumen de vacíos y volumen total

S_c = Contenido de agua volumétrico ocasionado por fuerzas capilares

S_a^* = Contenido de agua volumétrico ocasionado por la adhesión S_a

En la ecuación 8 el término S_a^* es reemplazado por S_a , la cual fue usado en el modelo original. Este cambio es para garantizar que la componente de adhesión no exceda a la unidad ($0 \leq S_a^* \leq 1$). Esta componente es expresada en la ecuación 9.

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad (9)$$

Donde la expresión $\langle \rangle$ representa los paréntesis de Macauley, definido como se muestra en la ecuación 10.

$$\langle y \rangle = 0.5(y + |y|) \quad (10)$$

Entonces para $S_a \geq 1$, $S_a^* = 1$; y para $S_a < 1$, $S_a^* = S_a$.

La contribución de los componentes de capilaridad y adhesión al grado total de saturación son definidas como una función de h_{co} y ψ usando las ecuaciones 11, 12 y 13.

El valor de S_a es determinado con la ecuación 11.

$$S_a = a_c C_\psi * \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (11)$$

Donde:

a_c = Coeficiente de adhesión. Los valores para suelos granulares y finos (plástico-cohesivos) son de 0.01 y 7×10^{-4} , respectivamente.

C_ψ = Parámetro tomado de Fredlund and Xing, ecuación 12

h_{co} = Altura o ascensión capilar equivalente, ver ecuación 11.1.

ψ_n = Parámetro introducido para las consistencias de unidades, cuando ψ_n es igual a 1cm este corresponde a 10^{-3} atmósferas.

e = Relación de vacíos, volumen de vacíos entre volumen de solidos

ψ = Succión

La expresión para el término h_{co} depende si el suelo es granular (h_{coG}) o cohesivo (h_{coP}) se expresa como se muestra en la ecuación 11.1 y 11.2.

$$h_{coG} = \frac{b(cm^2)}{eD_{10}(cm)} \quad (11.1)$$

$$h_{coP} = \frac{\xi W_L^{1.75}}{e} \quad (11.2)$$

Donde:

W_L es el término que hace referencia al límite líquido y D_{10} al diámetro de la partícula, en cm, que sea igual o mayor que el 10% en peso del suelo.

De las ecuaciones 11.1 y 11.2 se observan dos nuevos términos (b y ξ), lo cuales son definidos en la ecuación 11.1a y 11.2a. Dichas ecuaciones están relacionadas al coeficiente de uniformidad, C_u , y a la densidad de la partícula, ρ_s , respectivamente.

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log(C_u) + 1} \quad (11.1a)$$

$$\xi \approx 0.15\rho_s \quad (11.2a)$$

A su vez la variable C_ψ es obtenida del modelo de Fredlund & Xing (1994) y se calcula como se muestra en la ecuación 12.

$$C_\psi = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)} \right] \quad (12)$$

Donde:

ψ_r corresponde a la succión residual y es calculado según sea el tipo de suelo.

La ecuación 12.1 corresponde a los suelos granulares

$$\psi_r = 0.86h_{co,G}^{1.2} \text{ o } \frac{0.42}{(eD_H)^{1.26}} \quad (12.1)$$

La ecuación 12.2 corresponde a los suelos finos (plásticos-cohesivos)

$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1.2} W_L^{1.74} \quad (12.2)$$

La ecuación 13 proporciona la expresión para evaluar la succión por capilaridad la cual está en un rango mínimo de cero y máximo de uno. La expresión muestra su influencia de la distribución del tamaño de los poros a través del parámetro “m”. Además, dicho parámetro influye en el valor de entrada de aire (AEV) y es calculado como la inversa el coeficiente de uniformidad ($m = 1/C_u$), para el caso de suelos granulares, y para el caso de suelos cohesivos-plásticos toma un valor de 3×10^{-5} .

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 \right] \quad (13)$$

En la figura 2.10 se muestra la curva obtenida con el modelo Modificado de Kovács, ilustrando la contribución de S_c y S_a^* para suelos granulares. En la figura 2.11 se muestran las curvas para suelos plásticos-cohesivos. Los valores de ψ_{90} y ψ_{95} corresponden a la succión para un grado de saturación de 90% y 95%, respectivamente. Además, ψ_a y ψ_r corresponden a la succión en el valor de entrada de aire y al contenido residual de agua, respectivamente.

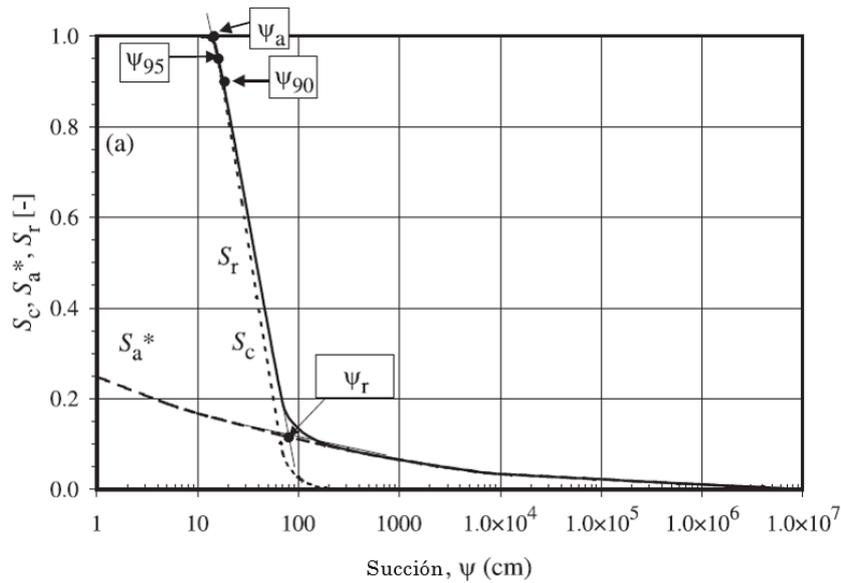


Figura 2.10. Contribución de la saturación por capilaridad y adhesión en la succión total para un suelo granular (Aubertin et al., 2003).

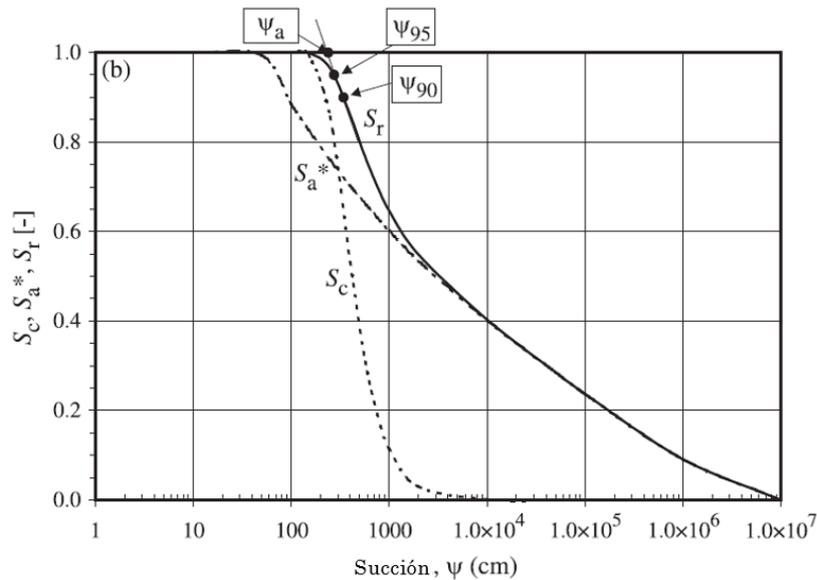


Figura 2.11. Contribución de la saturación por capilaridad y adhesión en la succión total para un suelo cohesivo (plástico) (Aubertin et al., 2003).

2.2.2. Modelo para ajustar una Curva Característica

En la literatura existen una gran variedad de modelos para el ajuste de una curva como los de Fredlund & Xing (1994), Van Genuchten (1980), Brooks & Corey (1964), entre otros. Para el presente trabajo de tesis, se ha usado el métodos de ajuste propuesto por Fredlund & Xing (1994)

2.2.2.1. Modelo de Fredlund & Xing (1994)

Fredlund & Xing (1994) desarrollaron una ecuación que relaciona el contenido volumétrico de agua con la succión de un suelo. Esta ecuación permite tener la función de la Curva Característica en un rango de 0 a 10^6 kPa, ya que al momento de realizar ensayo solo se obtenían puntos que bosquejaban la curva, pero no la graficaban en su totalidad. La principal contribución de esta ecuación, comparada con el método de Van Genuchten (1980), es que introduce un factor de corrección, el cual ocasiona que, ante un valor de succión de 10^6 kPa, el contenido de humedad llegue al valor de cero. Esto debido a que, según diversos ensayos realizados, todas las curvas obtenidas no continúan en valores de succión por encima de 10^6 kPa.

En la figura 2.12 se puede observar la curva que se genera con las ecuaciones de ajuste de Van Genuchten (1980), como se mencionó anteriormente, la curva pasa el rango de 10^6 kPa, pero los resultados de laboratorio muestran que para dicho valor de succión el grado de saturación es casi cero. En la figura 2.13 se muestra la curva ajustada con la ecuación de Fredlund & Xing (1994).

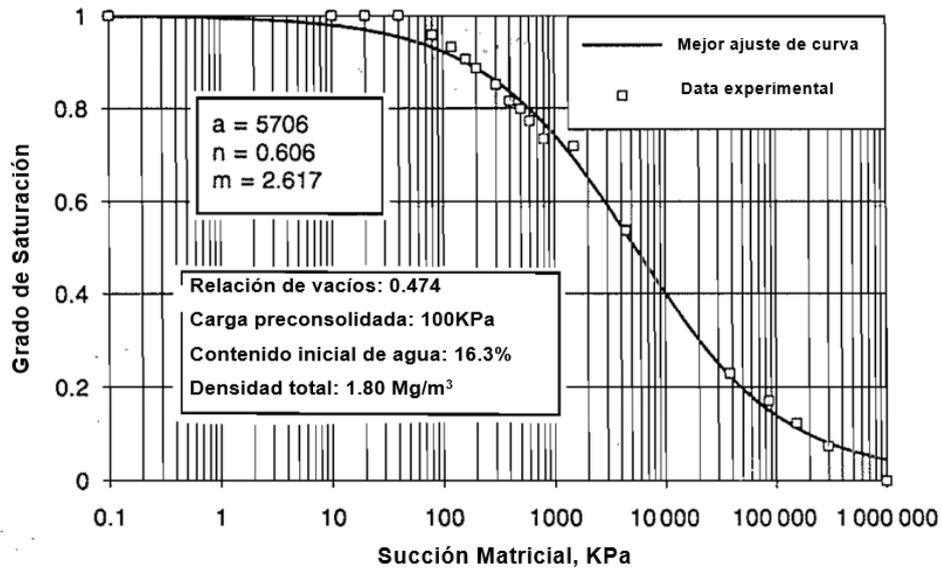


Figura 2.12. Ajuste de curva usando respecto a datos experimentales usando Van Genuchten (D. Fredlund & Xing, 1994)

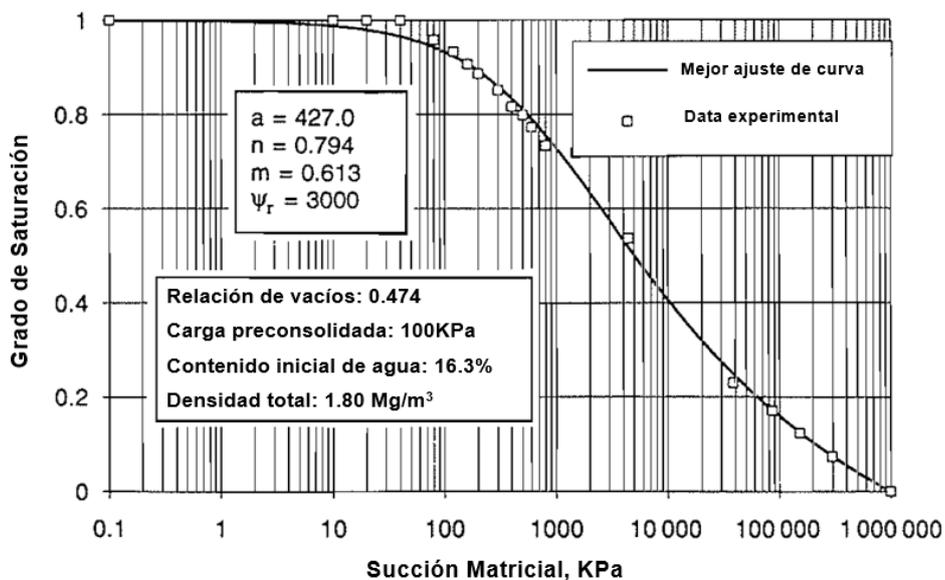


Figura 2.13. Ajuste de curva usando respecto a datos experimentales usando Fredlund & Xing (1994)

En la ecuación 14 se presenta la relación entre el contenido volumétrico de agua y la succión, posterior a ello se detalla el significado de cada término que conforma la ecuación.

$$\theta_{(\psi,a,n,m)} = C_{(\psi)} \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (14)$$

Donde:

$C_{(\psi)}$ representa la función de corrección definida por Fredlund & Xing (1994)

$$C_{(\psi)} = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\psi_r})} \right] \quad (15)$$

θ_s = Contenido volumétrico de agua

e = Relación de vacíos, volumen de vacíos entre volumen de sólidos

ψ = Succión

$a = \psi_i$, parámetro de ajuste que corresponde al valor de entrada de aire

$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i$, parámetro que depende de la velocidad de desaturación

$m = 3.67 \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right)$, parámetro con una relación directa con el contenido de agua residual

$s = \frac{\theta_i}{\psi_p - \psi_i}$, representa la pendiente de la línea tangente a la curva, ver figura 2.14.

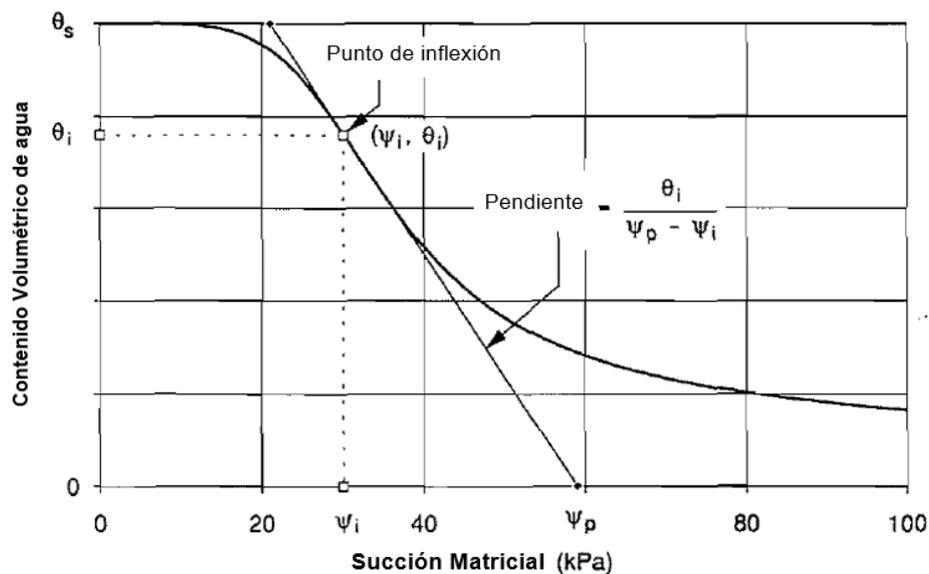


Figura 2.14. Solución gráfica de los tres parámetros (a , n , m) (D. Fredlund & Xing, 1994).

2.3. Modelos para estimar la curva de conductividad hidráulica

Como se mencionó en párrafos anteriores, la Curva Característica Suelo-Agua permite entender el comportamiento de los suelos no saturados. Además de ello, en casos como en el diseño de una presa, la cual es construida con distintos tipos de suelo, es importante también entender el comportamiento del flujo a través de la matriz del suelo. Para entender ello, es importante determinar la curva de conductividad hidráulica de los suelos no saturados, ya que esta describe la dependencia de la cantidad relativa de fluido en los poros del sistema (Fernández, 2015).

Fredlund & Xing (1994) mencionan que no existe una propiedad del suelo que pueda presentar una variación tan amplia como es el caso del coeficiente de permeabilidad. Para suelos no saturados, el coeficiente de permeabilidad puede variar en más de 10 órdenes de magnitud, cuando se considera suelos que van desde gravas hasta arcillas, este amplio rango ha demostrado ser el principal obstáculo en los análisis de infiltración. Es por ello que, en muchos casos, este rango de incertidumbre desencadena fallas por erosión interna en presas de suelos.

La conductividad hidráulica está en función de variables como la estructura de vacíos en la matriz del suelo, las características del fluido y la cantidad relativa del fluido en los poros (Fernández, 2015). Investigadores han desarrollado diversos métodos para predecir dicha curva de conductividad hidráulica, clasificándolas en un enfoque empírico y estadístico. Para el enfoque empírico, se necesitan realizar diversas mediciones de la permeabilidad y para el método estadístico, son necesarias la obtención de la Curva Característica Suelo-Agua y el coeficiente de permeabilidad en estado saturado, K_s (Fredlund et al., 1994).

La curva de conductividad hidráulica, ver figura 2.15, se representa como una relación entre la succión y el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica. Cuando el flujo de agua en la matriz del suelo disminuye, el flujo se vuelve discontinuo y la permeabilidad a través del suelo decrece (Hosagasi, 2006). Investigadores como Van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) han desarrollado modelos para predecir la función de conductividad hidráulica que se encuentran en función de la succión, conductividad hidráulica saturada, contenido volumétrico de agua y otros parámetros propios de cada modelo.

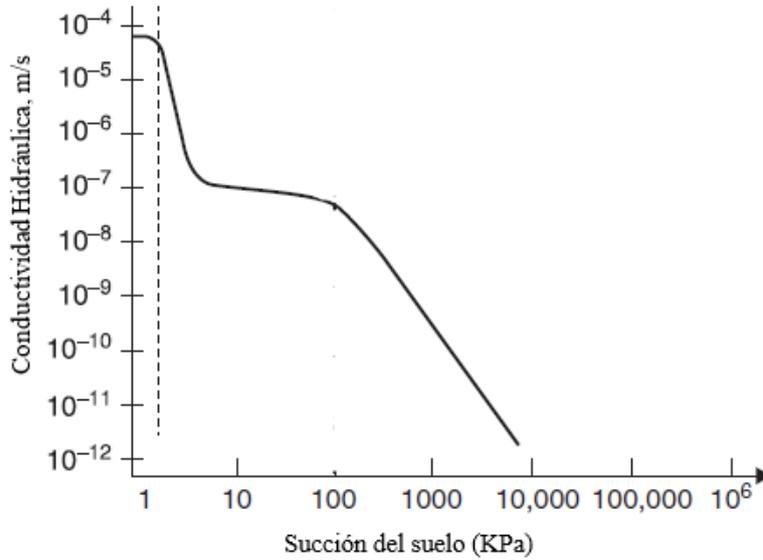


Figura 2.15. Curva de conductividad hidráulica (D. G. Fredlund & H. Rahardjo, 2012)

2.3.1. Modelo de Van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) propuso una ecuación de ajuste a la Curva Característica, este ajuste brinda una relación entre succión y contenido de humedad en un rango de 0 a 10^6 kPa, el cual se basa en los resultados de los ensayos realizados para medir directamente los puntos de la Curva Característica Suelo-Agua. Con dicho ajuste se obtienen parámetros que son característicos del modelo, los cuales también son usados por el autor para predecir la curva de conductividad hidráulica.

Se muestra, en la ecuación 16, la relación directa entre la succión y la conductividad hidráulica, también relaciona a los parámetros propios del modelo y a la conductividad hidráulica saturada.

$$K_w = K_s \frac{\left[1 - (a_\psi^{n-1})(1 + (a_\psi^n)^{-m})\right]^2}{\left((1 + (a_\psi^n)^{\frac{m}{2}})\right)} \quad (16)$$

Donde:

$K_s =$ Conductividad hidráulica saturada

$a, n, m =$ Parámetros de ajuste de la curva

$$n = \frac{1}{1 - m}$$

$\psi =$ *Succión*

2.3.2. Modelo de Fredlund & Xing (1994)

El modelo usado en Fredlund & Xing (1994) es del tipo estadístico, ya que se tiene la Curva Característica Suelo-Agua y el coeficiente de permeabilidad saturado. Además, el modelo asume que el cambio de volumen en la estructura del suelo es insignificante, con la finalidad de simplificar los cálculos y hacer más simple el modelo. En la ecuación 17 se presenta la relación propuesta por Fredlund & Xing (1994).

$$K_w = K_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (17)$$

Donde:

$K_s =$ *Coeficiente de permeabilidad saturada* $\left(\frac{m}{s}\right)$

$K_w =$ *Coeficiente de permeabilidad en función de la succión* $\left(\frac{m}{s}\right)$

$i =$ *Intervalo entre j y N*

j y $N =$ *Succión mínima y máxima, respectivamente*

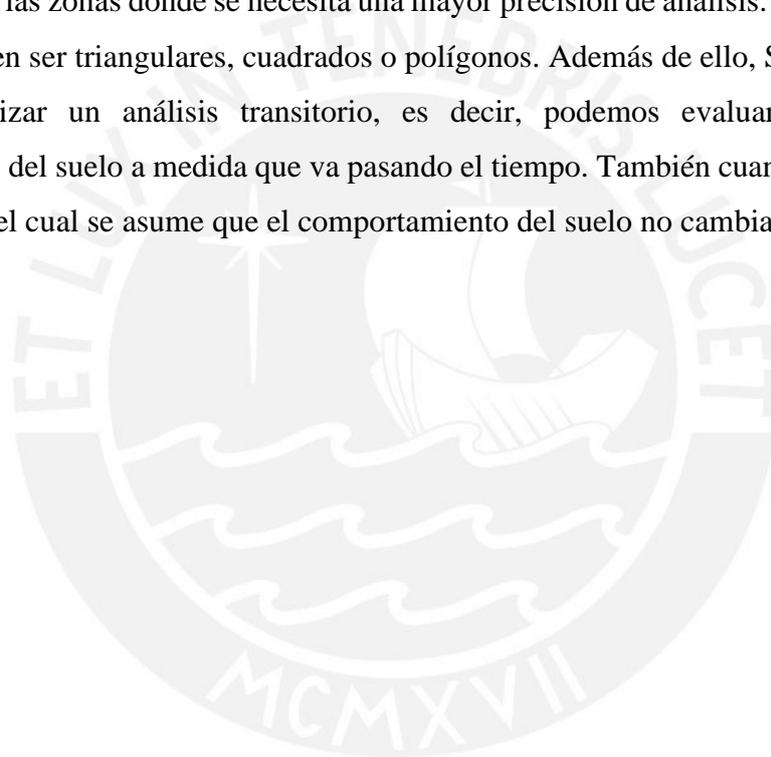
$\psi =$ *Succión correspondiente a j*

$\theta' =$ *Primera derivada de la ecuación (14)*

2.4. Software para modelado: SEEP/W

SEEP/W pertenece a un conjunto de productos geotécnicos, como SIGMA/W, SLOPE/W los cuales están contenidos en el programa GeoStudio. Esto último facilita al usuario integrar los diversos análisis, como infiltración, estabilidad de taludes, análisis tensión-deformación. Esta integración permite que se especifique más las condiciones de análisis de tal manera que se obtengan resultados más precisos.

SEEP/W usa el método de elementos finitos para obtener los resultados de un análisis. Los elementos finitos consisten en dividir el suelo en pequeños elementos, los cuales se van discretizando en las zonas donde se necesita una mayor precisión de análisis. La forma de estos elementos pueden ser triangulares, cuadrados o polígonos. Además de ello, SEEP/W brinda la opción de realizar un análisis transitorio, es decir, podemos evaluar como varía el comportamiento del suelo a medida que va pasando el tiempo. También cuenta con un análisis permanente, en el cual se asume que el comportamiento del suelo no cambia con el tiempo.



CAPÍTULO 3. Metodología de Investigación

En el capítulo de metodología se presenta los procedimientos para obtener la Curva Característica Suelo-Agua con dos modelos de estimación, el de Perera et al. (2005) y Aubertin et al. (2003). Además, se expone las propiedades de los suelos que se han estudiado, así como también los procedimientos para estimar la Curva Característica. Luego se muestra el procedimiento de ajuste de una Curva Característica con la finalidad de obtener los parámetros y realizar el modelado. Finalmente, se presenta los procedimientos para el modelado con SEEP/W, con un principal énfasis en los datos de entrada que requiere el programa, referente a los suelos no saturados.

3.1. Características de las muestras de suelo consideradas en el estudio

Muestra A:

El tipo de suelo es una grava arenosa bien gradada, ligeramente limosa (GW-GM) con un contenido de humedad natural del 6% y una gravedad específica de 2.61. Según el análisis granulométrico presenta un porcentaje de gravas, arenas y finos de 53%, 42% y 5%, respectivamente. Además, no presenta plasticidad y su contenido volumétrico de agua saturado es de 0.298.

Muestra B:

El tipo de suelo es una arena gravosa mal gradada, ligeramente limosa (SP-SM) con un contenido de humedad natural del 3% y una gravedad específica de 2.55. Según el análisis granulométrico presenta un porcentaje de gravas, arenas y finos de 42%, 49% y 9%, respectivamente. Esta muestra no presenta plasticidad.

Muestra C:

El tipo de suelo es una arena gravosa mal gradada (SP) con un contenido de humedad del 7% y con una gravedad específica de 2.63. Presenta un porcentaje de gravas, arenas y finos de 41%, 55% y 4%, respectivamente. No presenta plasticidad.

Muestra D:

El tipo de suelo es limo inorgánico de plasticidad baja o media (ML) con un contenido de humedad del 19% y una gravedad específica de 2.73. Presenta un porcentaje de gravas, arenas y finos de 1%, 31% y 68%, respectivamente. Además, su conductividad hidráulica saturada es de 7.99×10^{-5} cm/s y no presenta plasticidad.

En la figura 3.1 se muestra un compilado de curvas granulométricas que corresponden a las cuatro muestras estudiadas, estas fueron obtenidas de los resultados de los ensayos de laboratorio.

Ángulo de fricción:

Para las muestras A, B y C se realizaron ensayos de corte directo bajo esfuerzos normales de 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa, con muestras remoldeadas al 95% de su máxima densidad seca, de las curvas de ensayo Proctor estándar. Los ensayos realizados muestran un ángulo de fricción efectiva de 36° y una cohesión de cero.

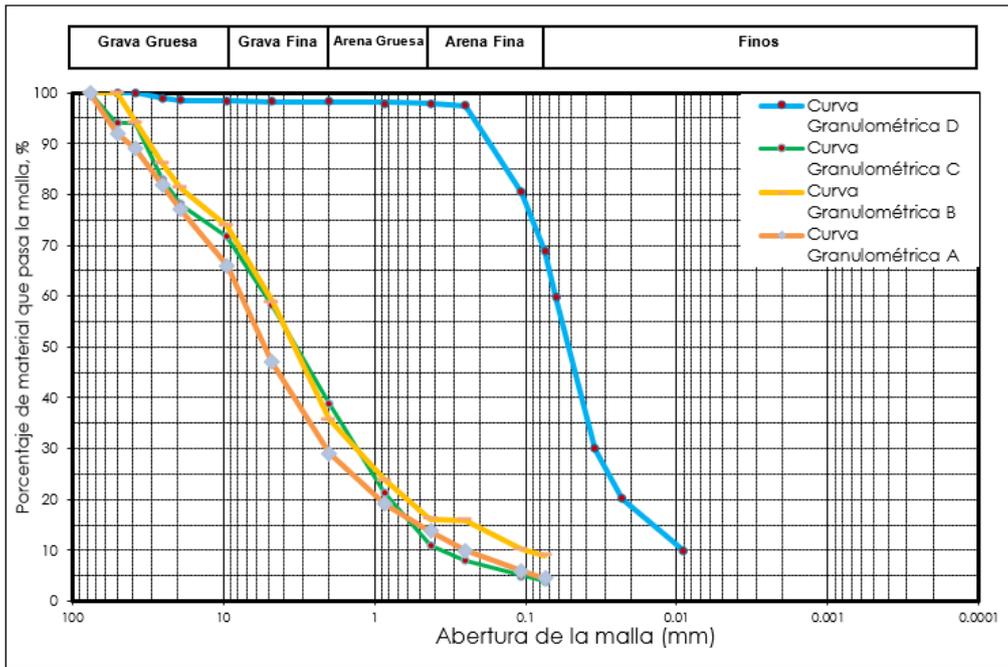


Figura 3.1. Curvas granulométricas de las cuatro muestras estudiadas. Fuente: Propia.

3.2. Estimación de la Curva Característica Suelo-Agua

Para estimar las Curvas Características se ha aplicado los modelos de Perera et al. (2005) y Aubertin et al. (2003). A continuación, se muestra los procedimientos realizados para obtener de la Curva Característica Suelo Agua.

3.2.1. Modelo de Perera et al. (2005)

3.2.1.1. Datos para aplicar el modelo

Como bien se mencionó en el capítulo 2, el método tiene como base de cálculo los resultados de los ensayos de caracterización física y límites de Atterberg. A continuación, se mencionan los procedimientos necesarios para obtener las Curvas Características.

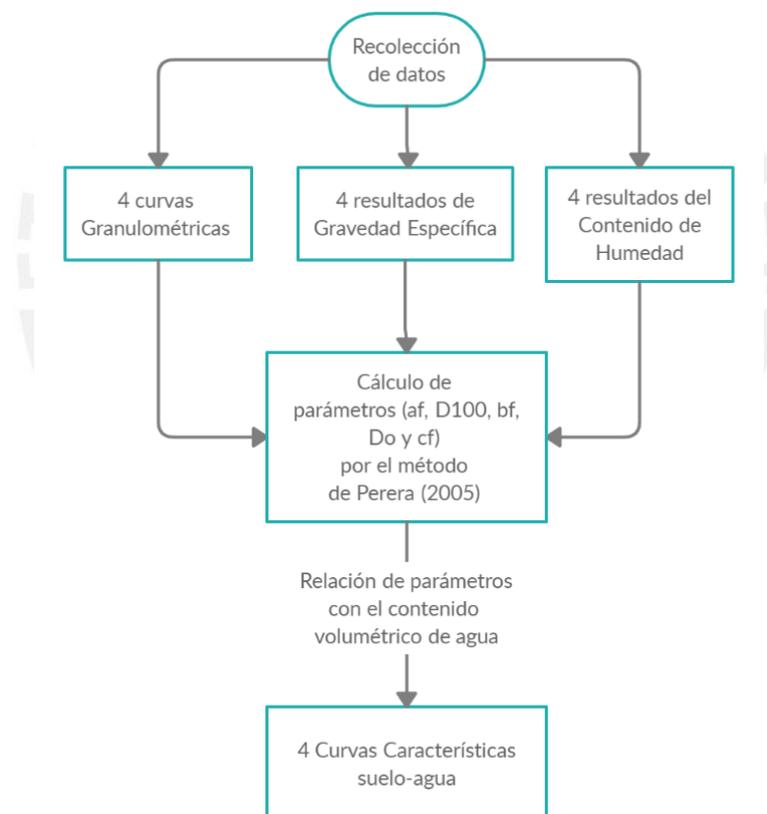
Para el caso de suelos granulares, uno de los datos necesarios es la curva granulométrica, de dicha curva se usó el porcentaje que pasa la malla 200 y los diámetros de la malla en los que pasa el 90%, 60%, 30%, 20% y 10% de la muestra del suelo. También se necesitó el contenido volumétrico de agua en estado saturado, el cual fue obtenido de los ensayos de laboratorio. La granulometría, la humedad del suelo, y la gravedad específica de todas las muestras fueron obtenidas de los resultados de laboratorio. Ya con los datos recolectados se realizaron los

cálculos necesarios para determinar la Curva Característica, como se detalla en los párrafos siguientes.

3.2.1.2. Procedimiento para obtener la Curva Característica

Los parámetros del modelo, a_f , D_{100} , b_f , D_0 y c_f fueron calculados con las fórmulas propuestas por Perera et al. (2005), detalladas en el capítulo 2 de la presente investigación. Estos parámetros son los que se relacionan directamente con el contenido de agua volumétrico, θ_w , que a su vez se relacionan con la succión del suelo, obteniéndose así la Curva Característica Suelo-Agua. El detalle del procedimiento para cada muestra se presenta en los **Anexos**.

3.2.1.3. Flujograma para obtener la Curva Característica



3.2.2. Modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003)

3.2.2.1. Datos para aplicar el modelo

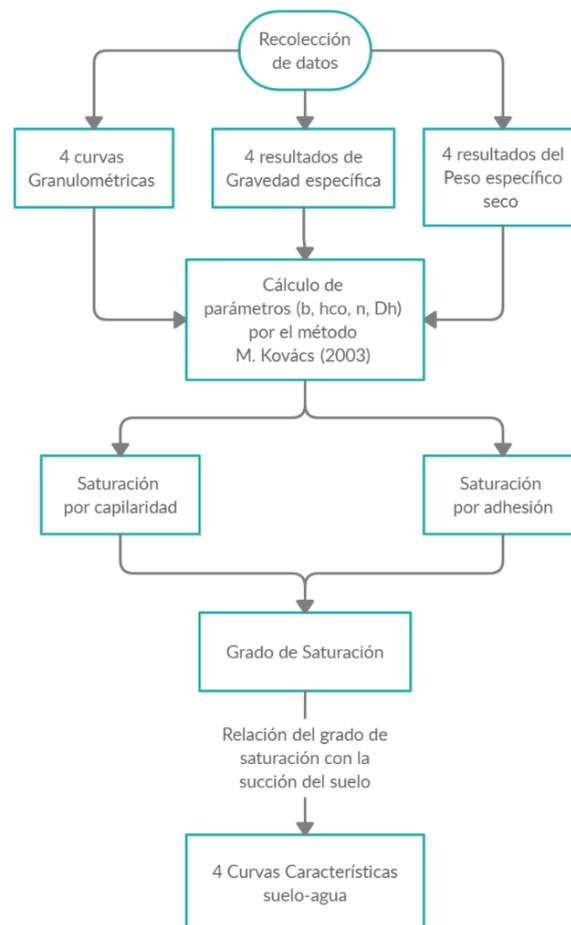
Uno de los datos necesarios para el cálculo de la Curva Característica con el modelo Modificado de Kovács es la curva granulométrica, de ella se extrae el diámetro en el cual pasa

el 60% y 10% de la muestra de suelo. También es necesario el valor de la relación de vacíos, la cual fue obtenida de los ensayos geotécnicos.

3.2.2.2. Procedimiento para obtener la Curva Característica

En base a los datos recolectados, se realizaron los cálculos para determinar los parámetros necesarios del modelo, $b, h_{co,G}, n, D_H, \psi_r$, las ecuaciones para determinar dichos parámetros han sido detalladas en el capítulo 2, los procedimientos y resultados se muestran en el anexo. Ya con los parámetros calculados, se determina la saturación debido a la capilaridad, la saturación debido a la adhesión y la saturación que relaciona ambas o también llamada el grado de saturación. El valor del grado de saturación es multiplicado con la porosidad del suelo para determinar el contenido volumétrico de agua. A su vez, este contenido volumétrico se encuentra relacionado con la succión del suelo, relación que permite graficar la Curva Característica, succión versus contenido volumétrico.

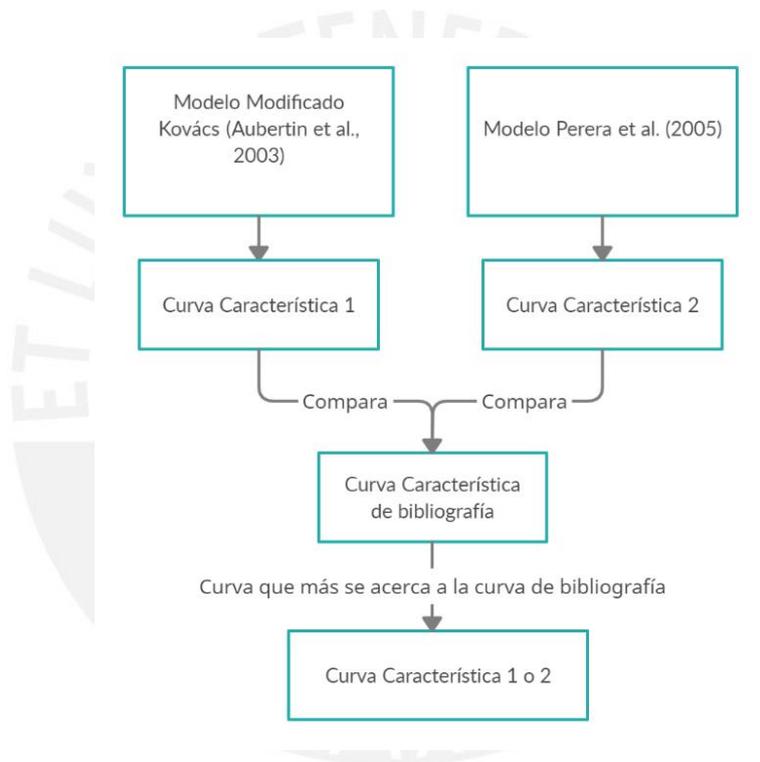
3.2.2.3. Flujograma para obtener la Curva Característica



3.3. Elección de la Curva Característica Suelo-Agua

Cada una de las dos curvas, obtenidas de los dos modelos de predicción, ha sido comparada con la Curva Característica, obtenida de ensayos que la miden directamente y publicadas en artículos científicos. La Curva Característica, obtenida de los modelos de predicción, que más se acerque en forma y valores a la curva obtenida de ensayos y elegida de referencias bibliográficas, será la elegida como la curva que mejor describa la muestra de suelo estudiada.

3.3.1. Flujograma para elegir la Curva Característica



3.4. Ajuste de la Curva Característica

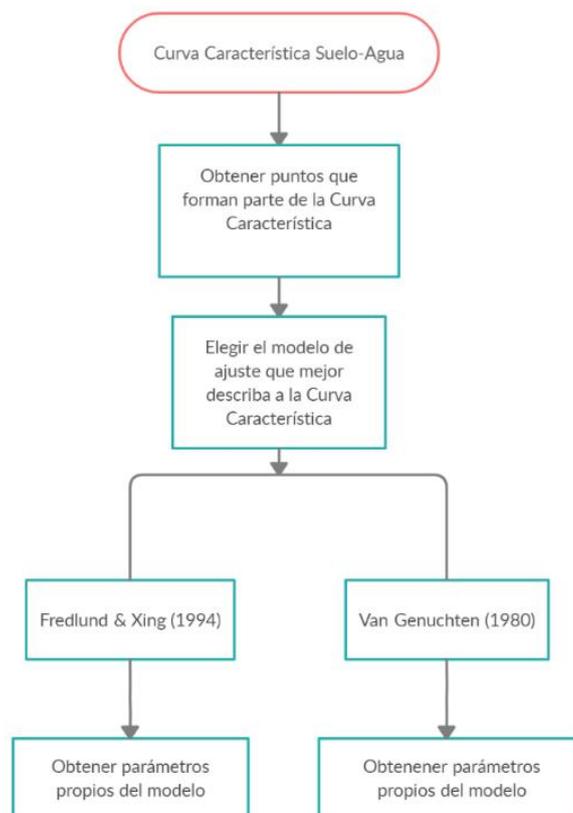
Luego de elegir el modelo de predicción adecuado para cada tipo de muestra, se realizará el ajuste de su Curva Característica, mediante los modelos de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980). A través de estos ajustes se obtienen parámetros propios de cada modelo, los cuales han sido usados como datos de entrada en el programa SEEP/W y con ello se realizó el modelado del botadero.

3.4.1. Modelos de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980)

El modelo teórico de ajuste con Fredlund & Xing (1994) o Van Genuchten consta en que, una vez obtenido los puntos que conforman la Curva Característica, succión versus contenido de humedad, y mediante regresiones no lineales, se obtiene una función que describe a la Curva Característica en todo su rango de valores de succión. Esta ecuación permite obtener el valor del contenido de agua para cada valor de succión y viceversa, es decir, la Curva Característica se resume en una sola función matemática, la cual posee constantes que se denominan “parámetros”. Estos parámetros son los que se utilizan el modelado en SEEP/W como datos de entrada para graficar la Curva Característica.

Para la presente investigación, los puntos que conforman la Curva Característica, obtenida de los ensayos, fueron reemplazados por los puntos de la Curva Característica, obtenida del modelo de predicción elegido. Con esos puntos se obtuvo la ecuación matemática de la Curva Característica, y con ello los parámetros usados para realizar el modelado en el programa SEEP/W.

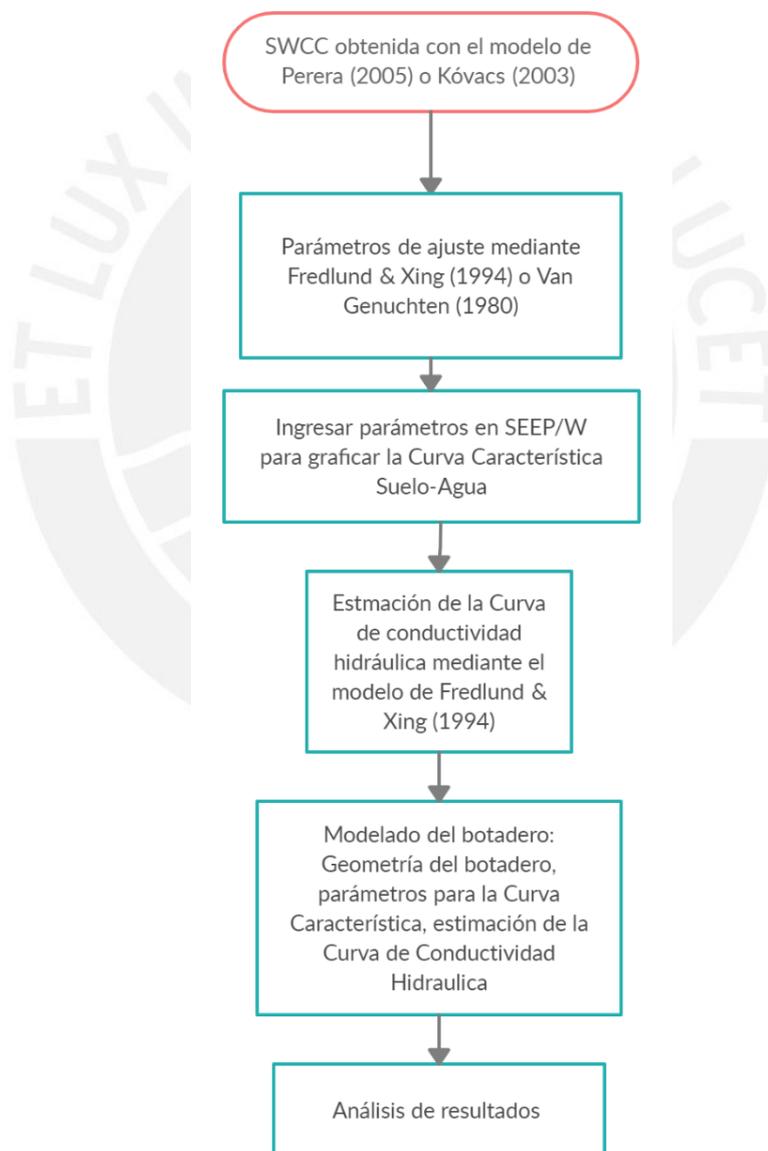
3.4.1.1. Flujograma para ajustar la Curva Característica



3.5. Modelado en el programa SEEP/W

Para el modelado en SEEP/W se han requerido de dos curvas, la Curva Característica Suelo-Agua y la Curva de Conductividad Hidráulica. La segunda curva ha sido estimada en base a la Curva Característica Suelo-Agua, con el modelo de predicción de Fredlund & Xing (1994) para curvas de conductividad hidráulica. El modelo de predicción para la Curva de Conductividad Hidráulica se encuentra desarrollada en el ítem 2.3 de la presente investigación.

3.5.1. Flujograma de modelado en SEEP/W



CAPÍTULO 4. Análisis de Resultados

4.1. Comparativa de los resultados del modelo de Perera y Modificado de Kovács

Para un mejor análisis comparativo de los resultados, se muestran dos curvas en un solo gráfico, las cuales han sido obtenidos por los dos modelos de predicción estudiados. A continuación, se muestran las Curvas Características de las cuatro muestras estudiadas.

Muestra A:

En la figura 4.1 se puede observar que la curva de Perera et al. (2005), color azul, presenta una menor pendiente que la curva del modelo Kovács (Aubertin et al., 2003), color rojo. Esto se interpreta como, la curva de Perera et al. (2005) presenta un mayor contenido volumétrico de agua que el modelo de Kovács (2003), para un mismo rango de valores de succión.

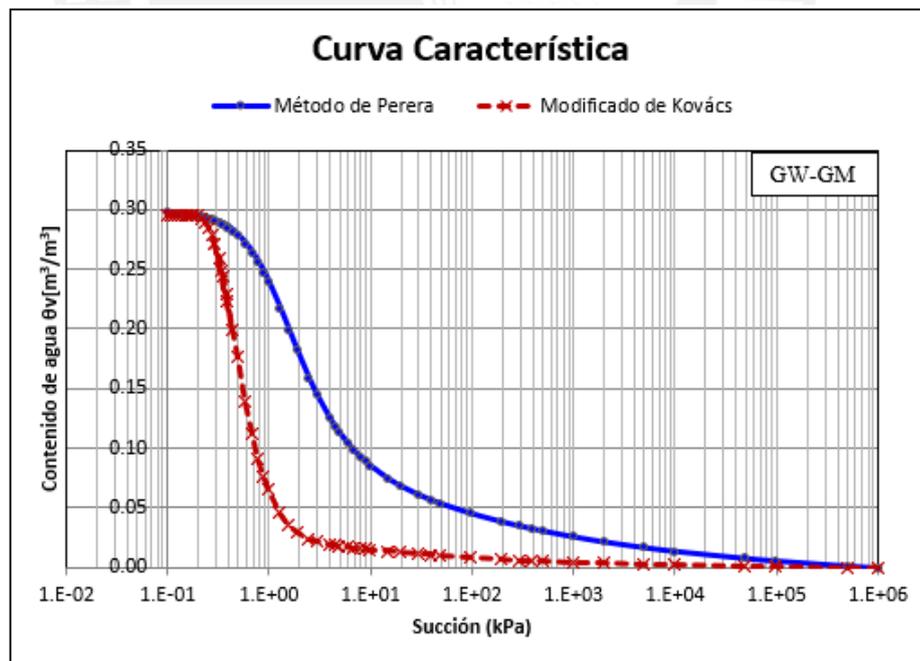


Figura 4.1. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra A. (Fuente Propia)

En la figura 4.2 se puede observar la Curva Característica, curva color rojo, obtenida mediante el ensayo de cámara de presión. Además, se observa que la forma de dicha curva es más cercana a la obtenida por el método de Perera et al. (2005) que por el modelo de Kovács

(Aubertin et al., 2003). Por ejemplo, en la curva de Perera et al. (2005), para los rangos de succión entre 1 y 100 kPa le corresponden los valores del contenido volumétrico entre 0.24 y 0.04, valores cercanos a los obtenidos por el ensayo de cámara de presión, para el mismo rango de succión, 0.24 y 0.07, ver figura 4.2. Con ello se puede afirmar que el modelo de Perera et al. (2005) describe de una mejor manera la curva experimental para este tipo de suelo (GW-GM).

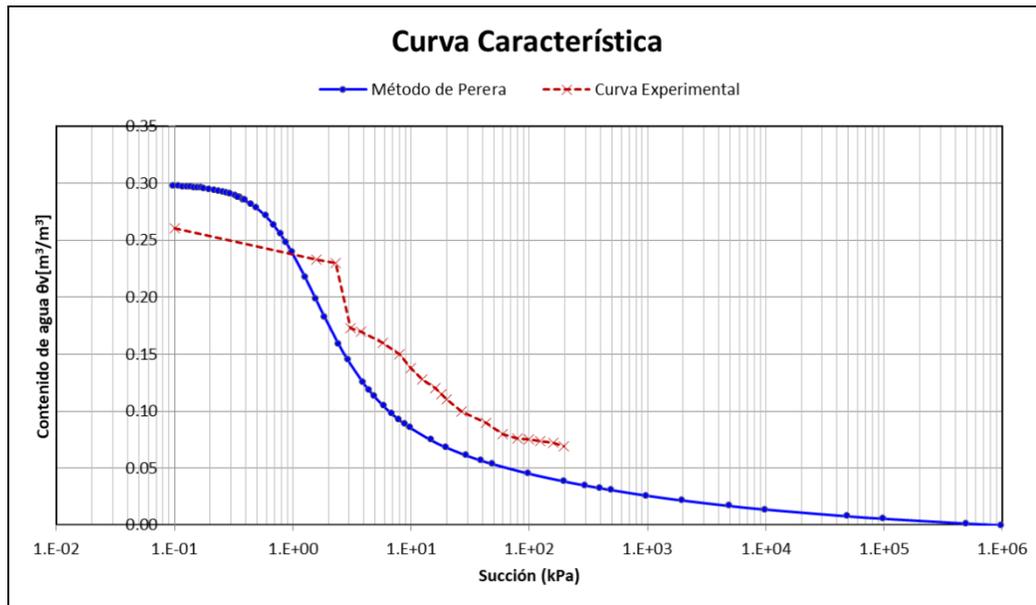


Figura 4.2. Curva Característica de Perera versus Curva Característica experimental (Fuente propia)

De la Curva Característica obtenida mediante el ensayo de cámara de presión, curva color rojo, se puede observar que, en los primeros rangos de succión, entre 0.1 y 10 kPa, el agua es extraída con una cantidad mínima de energía, ya que es más fácil extraer el agua de los granos gruesos que de los finos. Esto último se evidencia en el rango de succión mayor a 10 kPa, ya que son los granos de menor diámetro los que requieren de una cantidad de energía elevada para extraer el agua almacenada en su superficie y su matriz.

En la figura 4.3 se muestran dos curvas de ajuste, la de color rojo con el ajuste de Fredlund & Xing (1994) y la de color negro con el ajuste de Van Genuchten (1980). Como se ha explicado en el acápite 3.3 de la presente investigación, estos ajustes se basan en los datos puntuales que se obtienen de los ensayos de laboratorio. Para elegir el modelo que más se ajuste a la curva experimental, obtenida del ensayo de placa de succión, se han comparado los valores de succión y contenido volumétrico de agua para cada tramo de la curva, concluyendo que, el modelo de Fredlund & Xing (1994) no representa a la curva experimental, en los tramos

iniciales y finales. En el tramo inicial presenta un contenido volumétrico de agua elevado, poco característico de las curvas con suelo granular, además de ser respaldado por la curva experimental. En el último tramo el contenido de agua no llega a cero, comportamiento atípico en suelos granulares, ya que por presentar granos de gran tamaño, el agua es extraída casi en su totalidad para los valores de succión mayores a 10^6 kPa.

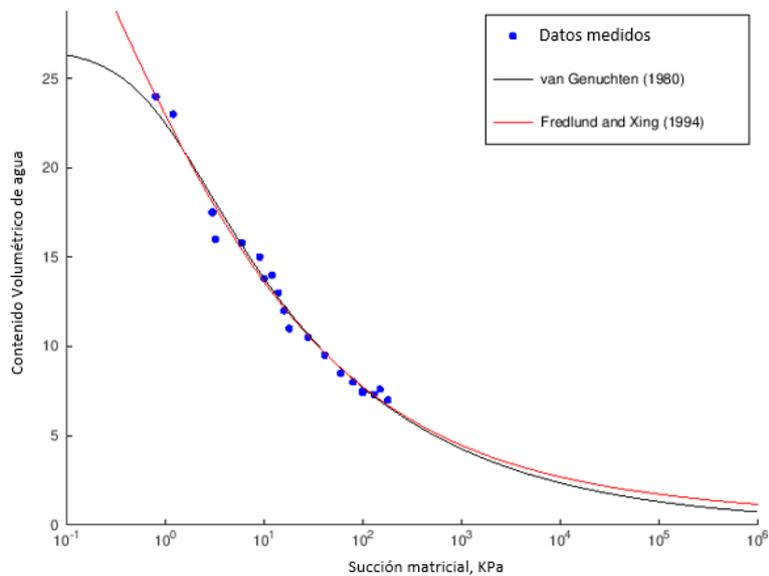


Figura 4.3. Ajuste de la Curva Característica con Fredlund & Xing (1994) y van Genuchten (1980) para la muestra A.

En la tabla 4.1 se muestran los parámetros de ajuste obtenidos con el programa web Seki Master para el modelo de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980). Los parámetros que calcula el programa han sido obtenidos con los fundamentos matemáticos y teóricos que han publicado los autores de dichos modelos de ajuste en sus papers. Los parámetros obtenidos del modelo de Van Genuchten han sido utilizados como datos de entrada para el modelado en el programa SEEP/W.

Tabla 4.1. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra A.

Modelo	Ecuaciones	Parámetros
Van Genuchten	$Se = \left[\frac{1}{a + (\alpha h)^n} \right]^m \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$	$\theta_s = 0.305$
		$\theta_r = 0.0169$
		$\alpha = 1.078$
		$n = 1.601$
Fredlund & Xing	$Se = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right] } \right]^m$	$\theta_s = 0.304$
		$\theta_r = 0.000$
		$\alpha = 1.0767$
		$m = 1.0208$
		$n = 1.522$

Muestra B:

En la figura 4.4 se observan las curvas obtenidas para la muestra B, una arena gravosa mal gradada, ligeramente limosa. Debido a que no se cuenta con resultados de laboratorio, para esta muestra y las dos restantes, estas han sido comparadas con referencias bibliográficas, de manera que se contraste los resultados obtenidos con los modelos de predicción, con las curvas publicadas en distintos artículos avalados por la comunidad científica.

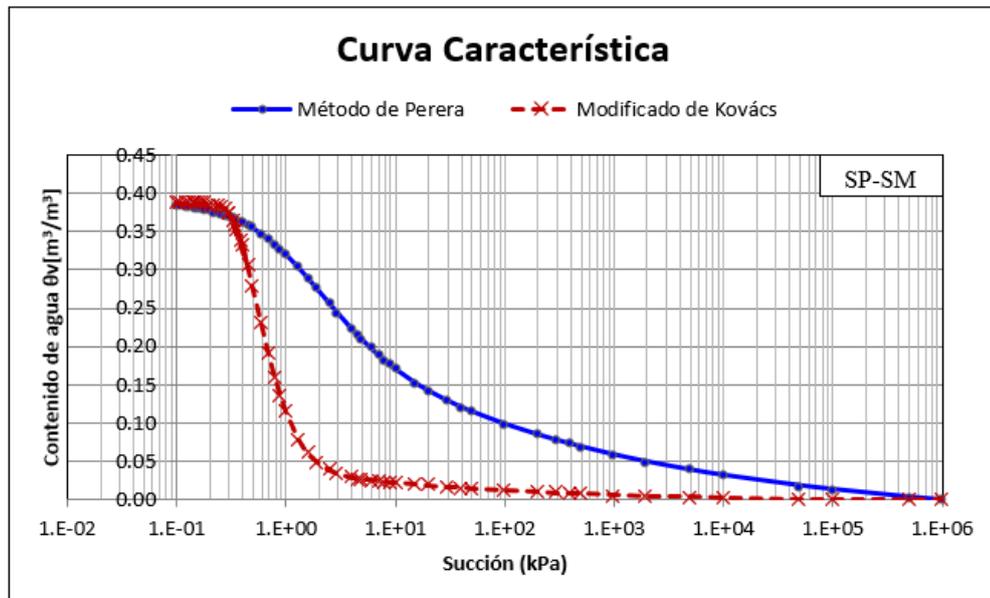


Figura 4.4. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra B. (Fuente Propia)

De la figura 4.4 se observa dos comportamientos distintos para cada modelo de predicción. Se observa que, para el valor de succión de 10 kPa el modelo de Perera et al. (2005) presenta un contenido volumétrico de agua aproximado de $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mientras que el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003) $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Es decir, el modelo de Perera et al. (2005) representa a una muestra con un alto contenido de finos, ya que el contenido de partículas finas genera que la muestra pierda gran parte de su contenido de agua con valores altos de energía o succión. Caso contrario ocurre con el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), ya que para el valor de 10 kPa esta ha perdido casi todo su contenido volumétrico de agua, es decir, representa a un suelo con un bajo contenido de finos, el cual no requiere de grandes cantidades de energía para extraer una cantidad considerable de agua.

La Curva Característica de la muestra de suelo, arenas, que se presenta en la figura 4.5, ha sido obtenida mediante ensayos y posteriormente publicada por D. G. Fredlund & H. Rahardjo (2012). Se observa que la curva presenta una pendiente pronunciada en el rango de

0.8 y 8 kPa, es decir, para este rango de succión la muestra de suelo ha perdido casi la totalidad de su contenido de agua. Con ello se respalda el comportamiento de la curva que teóricamente se esperaba, y se mencionaba en párrafos anteriores, que por ser una muestra de arena esta debe perder su contenido de agua con una baja cantidad de energía. Es por ello que la curva predicha por el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003) representa mejor a la muestra de suelo estudiada, quedando descartado el modelo de Perera et al. (2005).

La curva obtenida por D. G. Fredlund & H. Rahardjo (2012), figura 4.5, presenta para los rangos de succión entre 1 a 10 kPa valores de contenido volumétrico de agua entre 0.25 y 0.08 (m^3/m^3), respectivamente. Estos son cercanos a los obtenidos para la muestra B con el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), 0.10 y 0.03 (m^3/m^3). Afianzando que el modelo que Kovács (Aubertin et al., 2003) es el que mejor describe a este tipo de muestra de suelo.

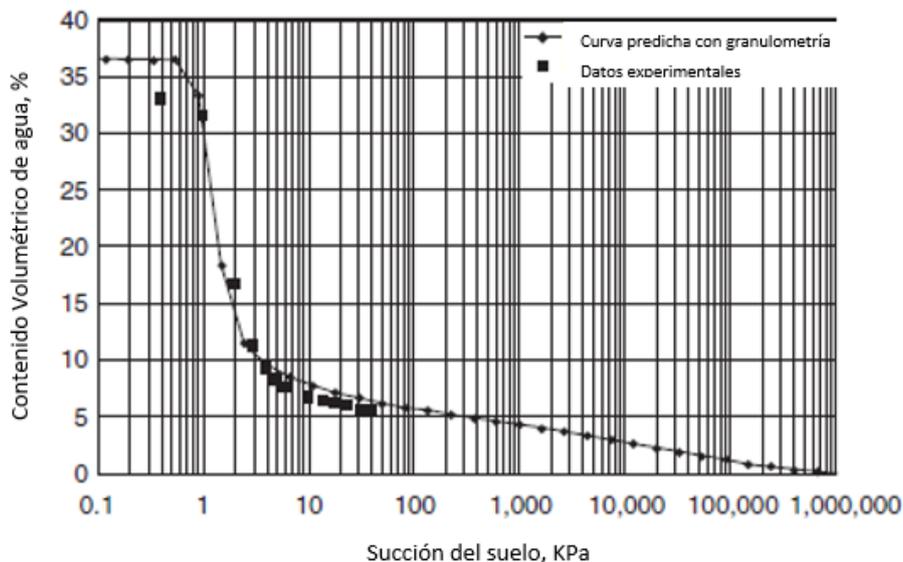


Figura 4.5. Data experimental de la Curva Característica y ajuste de la curva para una arena (D. G. Fredlund, 2000)

De la figura 4.4, para el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), se observa que, para valores menores a 0.8 kPa, la muestra se encuentra en un estado cercano al 100 % de su saturación. Pasado el valor de succión de 0.25 kPa, los vacíos empiezan a aparecer en la muestra de suelo, ya que se va drenando el agua debido a la succión aplicada a la muestra. También se observa que la pendiente cae de manera abrupta entre los rangos de succión de 0.3 y 1.8 kPa, pendiente característica para este tipo de suelos, ya que por ser una muestra granular, arena, el tamaño de los granos es relativamente grande, a comparación de los suelos finos, formando grandes espacios entre grano y grano. Por ello, no se necesitan valores altos de

energía para extraer, casi en su totalidad, su contenido de agua. Pasado el valor de 10 kPa, la pendiente se mantiene casi constante; esto se debe a que casi toda el agua de la matriz del suelo ha sido drenada. Sin embargo, el contenido de agua que se encuentra adherida a la superficie de los granos del suelo, es el que requiere de un alto valor de energía para ser extraído, lo que algunos autores denominan la succión por adhesión. Finalmente, para el rango de valores de 10^3 kPa en adelante, el contenido de agua en la superficie de las partículas ha sido extraída casi en su totalidad, por lo que se podría afirmar que el suelo está en un estado casi seco. Cabe resaltar que, aun aplicando un alto valor de energía, es difícil alcanzar un estado completamente seco del suelo.

En la figura 4.6 se observa los modelos de ajuste para la curva predicha por Kovács (Aubertin et al., 2003), usando los puntos obtenidos de dicho modelo de predicción. El modelo de ajuste que mejor representa es el modelo de Fredlund & Xing (1994), abarcando una gran cantidad de puntos en su modelo de ajuste.

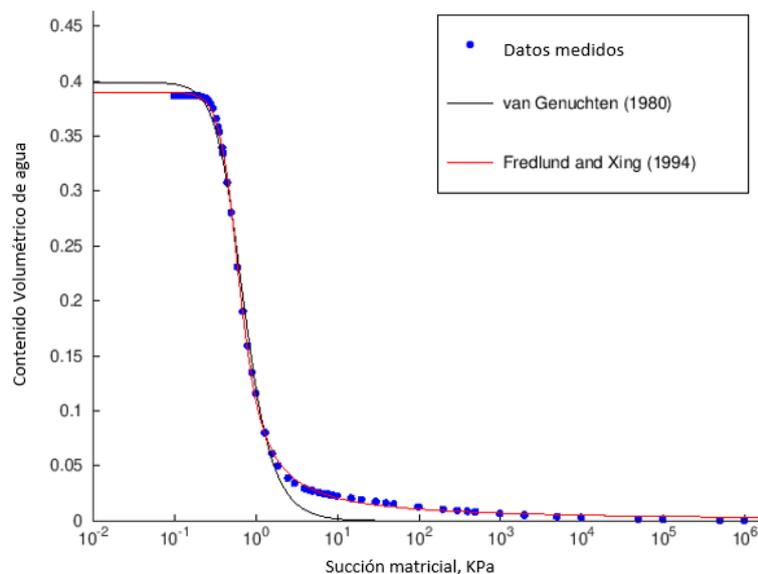


Figura 4.6. Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra B.

Las curvas obtenidas por ambos modelos de predicción dependen de los parámetros mostrados en la tabla 4.2. Es decir, son esos parámetros los que dan forma a las curvas de ajuste y son estos mismos los usados para realizar el modelado en el programa SEEP/W.

Tabla 4.2. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra B.

Modelo	Ecuaciones	Parámetros
Van Genuchten	$Se = \left[\frac{1}{a + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - \frac{1}{n})$	$\theta_s = 0.398$
		$\theta_r = 0.000$
		$\alpha = 1.776$
		$n = 2.894$
Fredlund & Xing	$Se = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0.389$
		$\theta_r = 0.000$
		$a = 0.497$
		$m = 1.184$
		$n = 3.994$

Muestra C:

En la figura 4.7 se muestra las dos curvas obtenidas por los modelos de predicción. Si observamos el comportamiento para el valor de succión de 1 kPa, el modelo de Perera et al. (2005) presenta un mayor contenido de agua, $0.28 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a comparación del modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$. En términos teóricos, la curva de Perera et al. (2005) advierte la presencia de un contenido de finos muy alto, caso contrario ocurre con el modelo de Kovacs (Aubertin et al., 2003) el cual ha perdido casi la totalidad de su contenido volumétrico con bajos valores de succión, comportamiento característico en suelo granulares con un bajo porcentaje de finos.

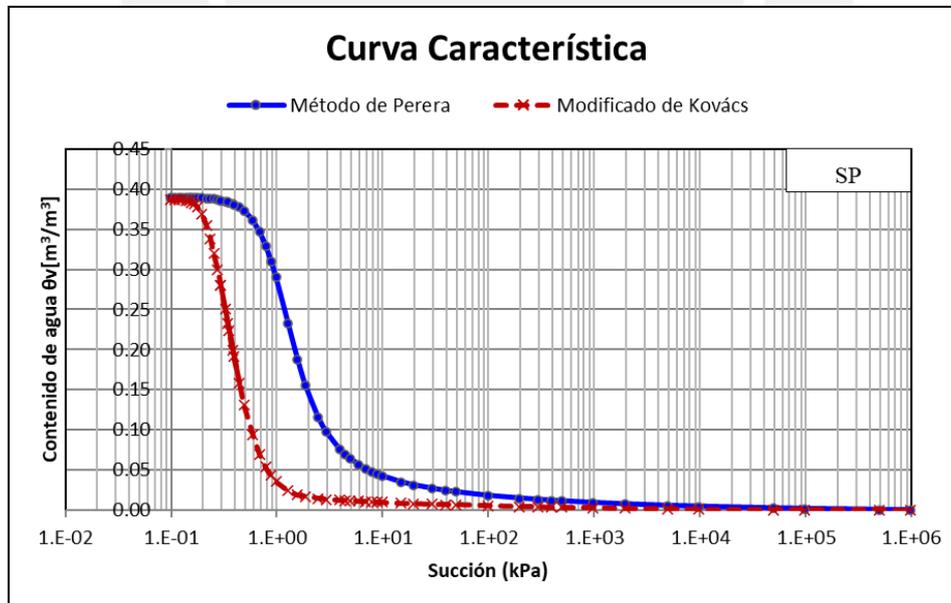


Figura 4.7. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra C. (Fuente Propia)

Según lo descrito anteriormente, la base teórica indicaría que la Curva Característica que mejor describe a la muestra en estudio es la del modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), ya que el tipo de suelo es una arena mal graduada con un porcentaje de finos de 4%. Sin embargo, para corroborar esta afirmación se ha revisado publicaciones de diversos investigadores, encontrando una publicación de un tipo de suelo ensayado con similares características a la muestra de suelo estudiada.

En la tabla 4.3 se muestran las características físicas de dos muestras de suelo. La primera muestra, ubicada en la segunda columna, es la que ha sido ensayada y publicada por Krisdani en el 2009 y la segunda muestra, ubicada en la tercera columna, la estudiada en la presente tesis. Las características mostradas son su clasificación SUCS y los porcentajes de suelo que pasa por cada malla. Se observa que los porcentajes del contenido de grava y arena difieren de 8.9% y 4.9%, respectivamente y su contenido de finos en un 4%. Además, su clasificación SUCS es la misma.

Tabla 4.3. Propiedades del suelo estudiado y un suelo extraído de la literatura (Krisdani et al., 2009)

Descripción	Tipo de Suelo	
	Notación del Krisdani: GS	Muestra C
Sistema unificado de clasificación de suelos (ASTM, 2006)	(SP)	(SP)
Gravedad específica, Gs	2.62	2.63
Contenido de grava (>4.75 mm) (%)	49.9	41
Contenido de arena (0.075–4.75 mm) (%)	50.1	55.0
Contenido de finos (<0.075 mm) (%)	0.0	4.0
Límites de Atterberg		
Límite Líquido, LL (%)	-	-
Límite Plástico, PL (%)	-	-
Índice de Plasticidad, PI (%)	-	-

En la figura 4.8 se muestran las curvas publicadas por Krisdani (2009), de las cuales la curva “GS(D)” es la de mayor importancia, ya que es la obtenida con los datos de la tabla 4.3. El símbolo D informa que la curva ha sido obtenida en un proceso de secado, es decir con la extracción de agua mediante la succión y no saturando la muestra. Esto coincide con los modelos de predicción, como el de Van Genuchten (1980) y Fredlund & Xin (1994), los cuales hacen referencia a que sus modelos han sido obtenidos considerando un proceso de secado.

De la figura 4.8 se observa que para el rango de succión entre 0.1 y 1 kPa, se presenta valores de 0.38 y 0.04 del contenido volumétrico de agua. En el caso de la curva obtenida por el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003), para los mismos valores del rango de succión se presentan los valores de 0.38 y 0.025 del contenido volumétrico de agua, valores considerados cercanos, debido a la sensibilidad del ensayo y de los modelos de predicción. Es por ello, que se corrobora la curva típica para la muestra de suelo estudiada, la cual es descrita de mejor manera con el modelo de predicción de Kovács (Aubertin et al., 2003).

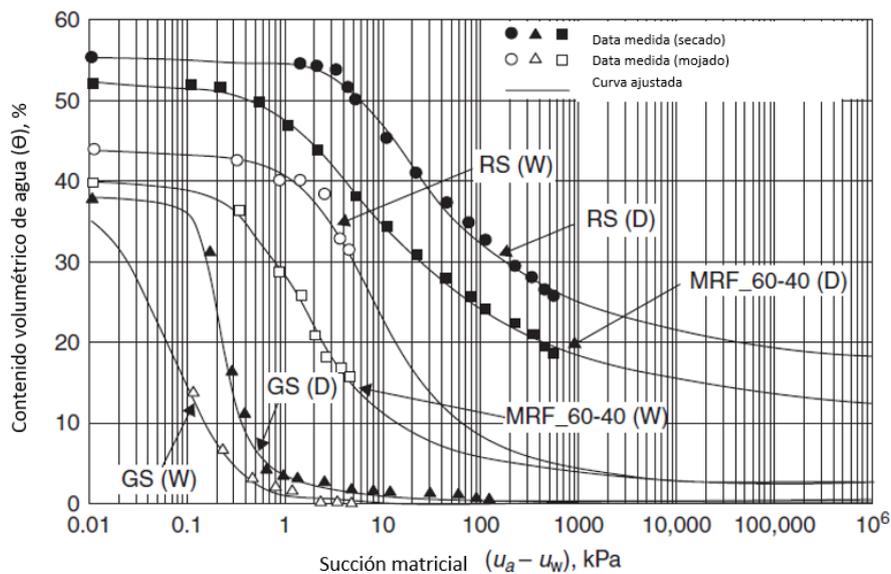


Figura 4.8. Medida de la Curva Característica de los suelos en el estudio de Krisdani et al. (2009)

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros de ajuste obtenidos por el modelo de Van Genuchten (1980) y de Fredlund & Xing (1994). Estos parámetros en base a la curva del modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003).

Tabla 4.4. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra C.

Modelo	Ecuaciones	Parámetros
Van Genuchten	$Se = \left[\frac{1}{a + (\alpha h)^n} \right]^m \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right)$	$\theta_s = 0.401$
		$\theta_r = 0.000$
		$\alpha = 3.0189$
		$n = 3.361$
Fredlund & Xing	$Se = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0.394$
		$\theta_r = 0.000$
		$a = 0.317$
		$m = 1.528$
		$n = 3.913$

De la figura 4.9 se observa que, ambos modelos de ajuste son cercanos a los puntos obtenidos mediante el modelo Modificado de Kovács; sin embargo, el modelo de ajuste más cercano es el de Fredlund & Xing (1994). Se ha empleado los parámetros de dicho modelo de ajuste para los datos de entrada en el modelado del botadero mediante el programa SEEP/W.

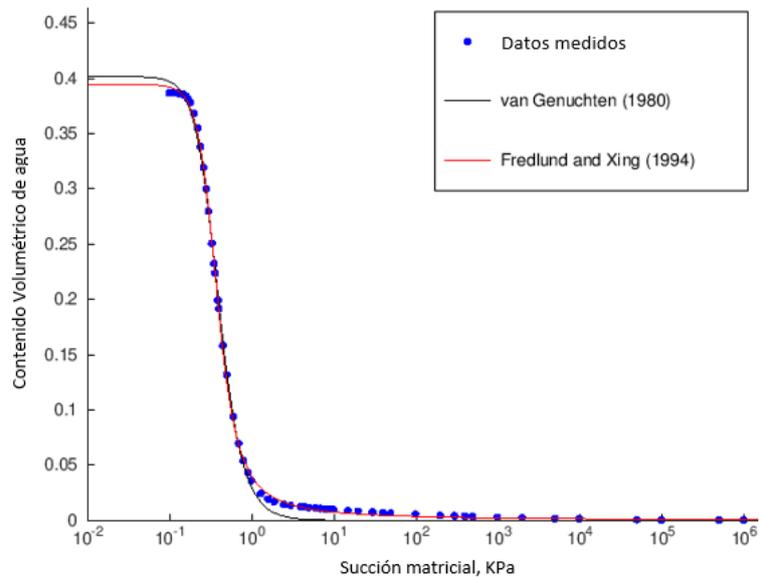


Figura 4.9. Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra C.

Muestra D:

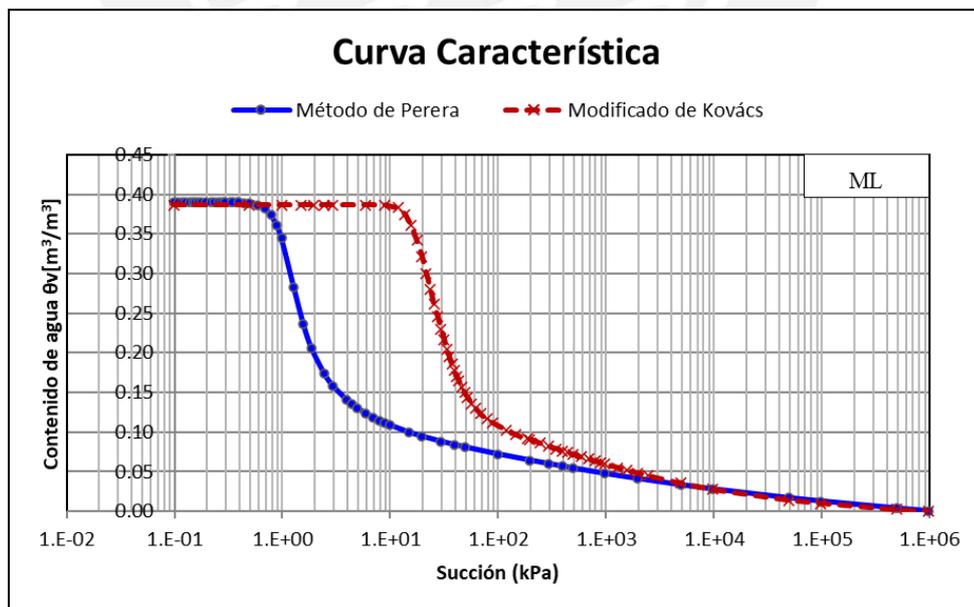


Figura 4.10. Curvas Características Suelo-Agua de la muestra D. (Fuente Propia)

En la figura 4.10 se observa una diferencia entre ambos modelos de predicción, el modelo de Perera et al. (2005) presenta una curva que es típica para suelos granulares, se observa que para un valor de succión de 1 kPa, la curva empieza a presentar una caída en su pendiente, una característica que ya se ha visto en las anteriores muestras de material grueso. La forma de la curva de Perera et al. (2005) se debe a que, dentro de sus cálculos, advierte que ante suelos con una granulometría, donde predomina los granos finos, existe una posibilidad que el parámetro af tome un valor negativo, ante esto sugiere que se reemplace dicho valor por uno, ya que trabajar con un valor negativo ocasionaría errores en cálculos posteriores y no generaría una curva representativa. El modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003) describe de una mejor forma la curva para esta muestra; la presencia de los granos finos hace que sea más difícil extraer el agua de la matriz del suelo, ya que granos finos ocupan una mayor cantidad de vacíos. Además de ello, cuando se extrae el contenido de agua en la matriz del suelo queda aún el agua en la superficie de los granos donde se necesita una mayor cantidad de energía para extraer dicho contenido de agua.

Tabla 4.5. Parámetros de ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) de la muestra D.

Modelo	Ecuaciones	Parámetros
Van Genuchten	$Se = \left[\frac{1}{a + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - \frac{1}{n})$	$\theta_s = 0.406$
		$\theta_r = 0.000$
		$\alpha = 0.0670$
		$n = 1.624$
Fredlund & Xing	$Se = \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m$	$\theta_s = 0.388$
		$\theta_r = 0.000$
		$\alpha = 19.463$
		$m = 0.685$
		$n = 4.233$

El modelo de ajuste que mejor describe a los puntos obtenidos es el de Fredlund & Xing (1994); sin embargo, en el rango mayor a los 3×10^2 kPa la curva se aleja de los puntos obtenidos.

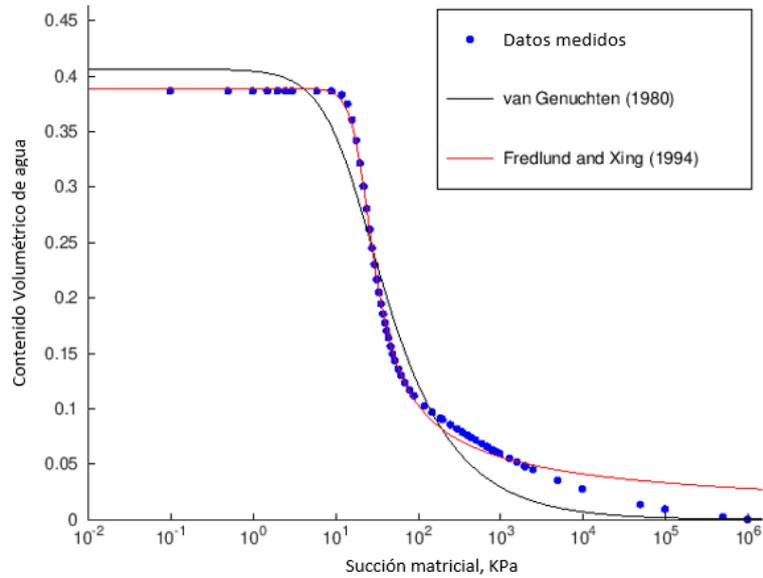


Figura 4.11 Curvas con ajuste por van Genuchten (1980) y Fredlund & Xing (1994) para muestra D.

De la tabla 4.6 se observa que el modelo que más se ha ajustado a los resultados experimentales es el modelo de Perera et al. (2005). Para las demás muestras, las cuales fueron comparadas con resultados publicados por investigadores, el modelo Modificado de Kovács (Aubertin et al., 2003) ha predicho de mejor manera la curva típica para cada tipo de suelo. Para todas las muestras el modelo de ajuste que mejor se asemeja a los puntos predichos es el ajuste de Fredlund & Xing (1994).

Tabla 4.6. Resumen de modelos de predicción y de ajuste para las cuatro muestras estudiadas.

Muestra	SUCS	Modelo de Predicción (Elegido)	Modelo de Ajuste (Elegido)
A	GW-GM	Perera et al. (2005)	Van Genuchten (1980)
B	SP-SM	Modificado de Kovács (2003)	Fredlund & Xing (1994)
C	SP	Modificado de Kovács (2003)	Fredlund & Xing (1994)
D	ML	Modificado de Kovács (2003)	Fredlund & Xing (1994)

4.2. Curvas de conductividad hidráulica

Los cálculos para obtener la curva de conductividad hidráulica se han realizado con el programa SEEP/W. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los modelos de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980). Estos resultados se muestran con la finalidad de realizar el modelado en SEEP/W, por dicha razón no se presenta un análisis detallado de los resultados, ya que estas han sido obtenidas con ayuda del programa SEEP/W.

De la figura 4.12 hasta la 4.15 muestran las curvas de conductividad hidráulica. Se observa que ante un aumento de la succión matricial la conductividad hidráulica disminuye. Es decir, a medida que se va extrayendo el agua de la matriz del suelo, se vuelve menos permeable, ya que es más difícil que el agua realice un recorrido de manera continua debido a la cantidad de vacíos, comparada con el suelo en estado saturado.

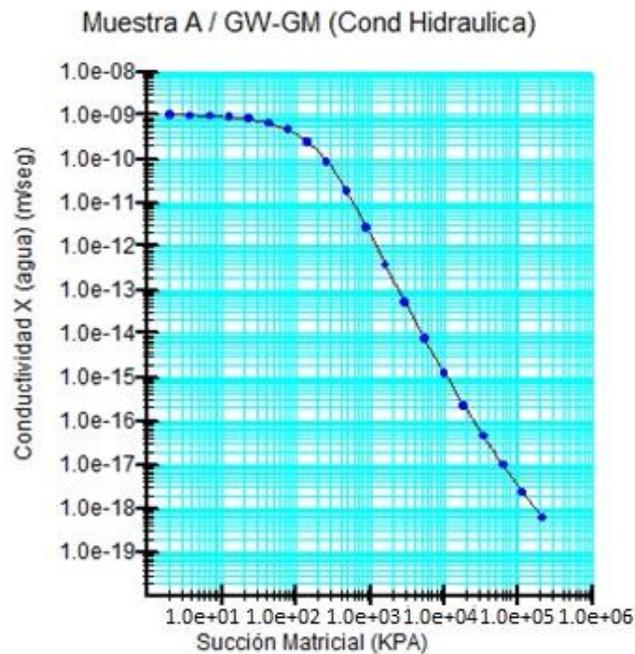


Figura 4.12. Curva de conductividad hidráulica, muestra A. (Fuente Propia)

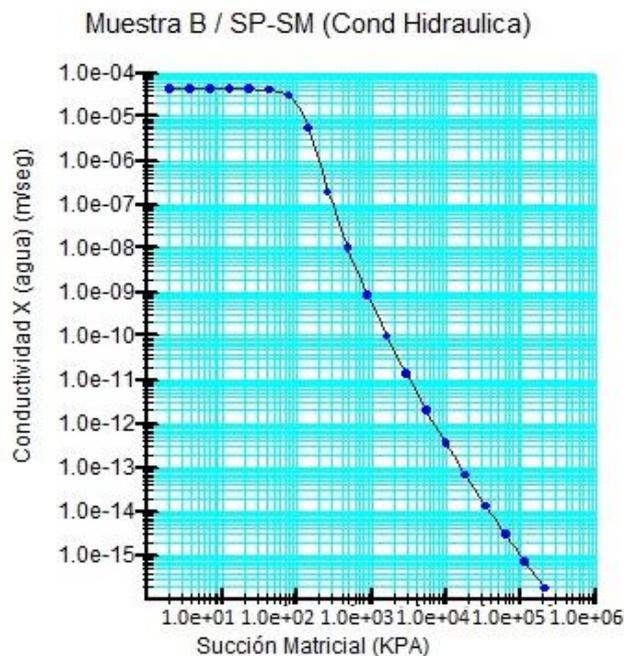


Figura 4.13. Curva de conductividad hidráulica, muestra B. (Fuente Propia)

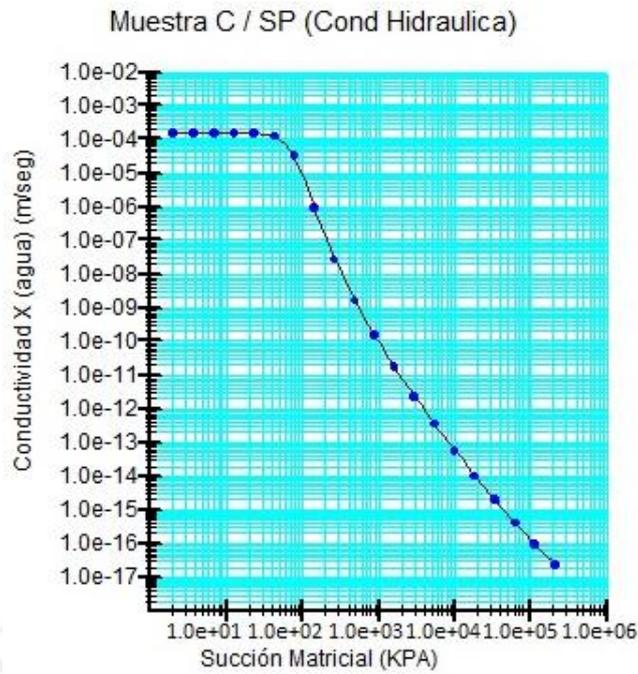


Figura 4.14. Curva de conductividad hidráulica, muestra C. (Fuente Propia)

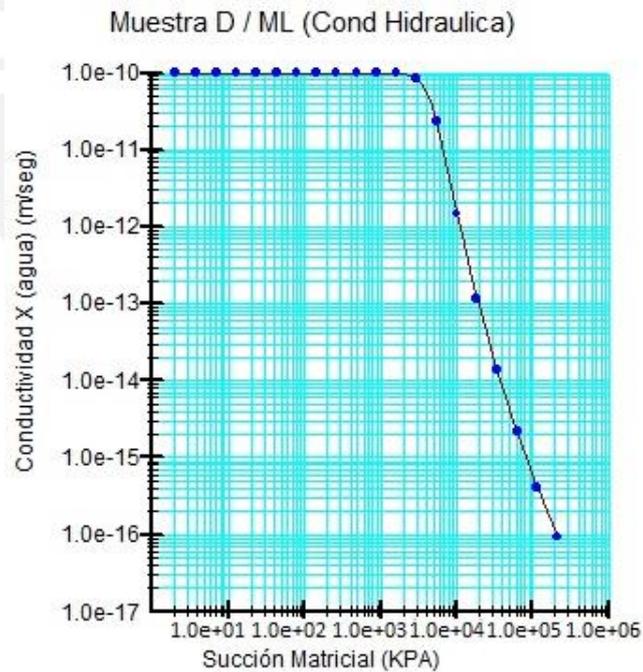


Figura 4.15. Curva de conductividad hidráulica, muestra D. (Fuente Propia)

4.3. Modelado en programa SEEP/W

Como se mencionó en párrafos anteriores, las Curvas Característica Suelo-Agua asignadas a los materiales han sido estimadas por los modelos de predicción de Perera et al. (2005) y M. Kovács (Aubertin et al., 2003). Además de ello, las curvas de conductividad hidráulica han sido obtenidas en base a las Curvas Características Suelo-Agua, mediante los modelos de Fredlund & Xing (1994) y Van Genuchten (1980).

El modelado se ha realizado simulando un botadero con una cobertura de un material de Limo y con un espesor de uno a dos metros, variando a lo largo de la superficie del desmonte de mina. Además, el caso comparativo consta de un modelo con las propiedades del suelo en un estado saturado y el otro modelo con propiedades del suelo en estado no saturado. Se ha referenciado dos puntos de análisis, punto A y punto B, el primero se ubica en la zona alta del botadero y el segundo en el pie del botadero. Para ambos puntos se han analizado sus caudales tanto para propiedades saturadas y no saturadas.

4.3.1. Modelo con propiedades de los suelos en estado no saturado

4.3.1.1. Definición de análisis y propiedades de los materiales

En la figura 4.16 se muestran la definición del análisis realizado, se ha considerado un flujo transitorio; es decir, las propiedades del suelo varían con el tiempo. Se ha asignado un tiempo de evaluación de diez años y los resultados han sido desglosados en periodos de un año para observar cómo varía el flujo de agua en los dos puntos del botadero.

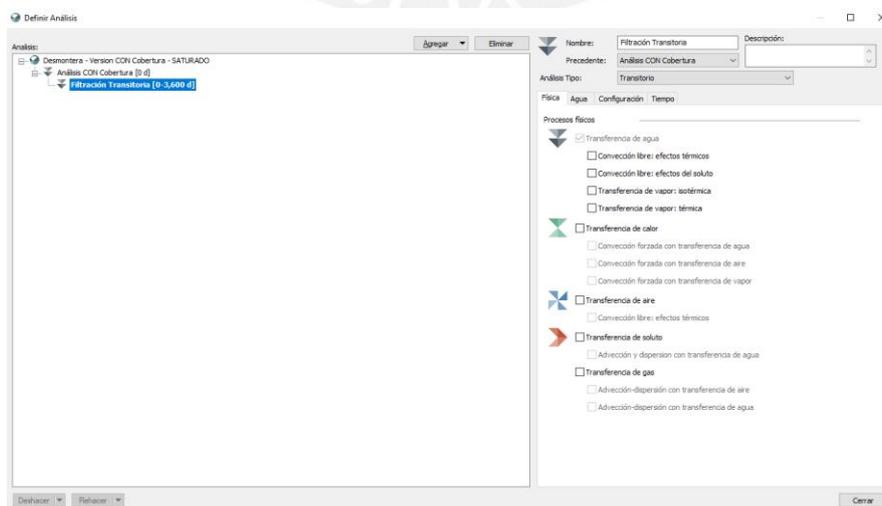


Figura 4.16. Propiedades asignadas a los materiales. (Fuente Propia)

En las siguientes imágenes se presentan las propiedades de los materiales, se hace énfasis en las propiedades de los suelos no saturados las cuales se han predicho y ajustado, ver ítems 4.1 y 4.2.

En la figura 4.17 se muestra la asignación de la Curva Característica de la muestra de limo de baja plasticidad (ML). Se observa que no se han introducido los puntos de la Curva Característica obtenidos por los modelos de predicción, sino que en lugar de ellos los parámetros obtenidos mediante el ajuste de la curva, con el método de Fredlund & Xing (1994).

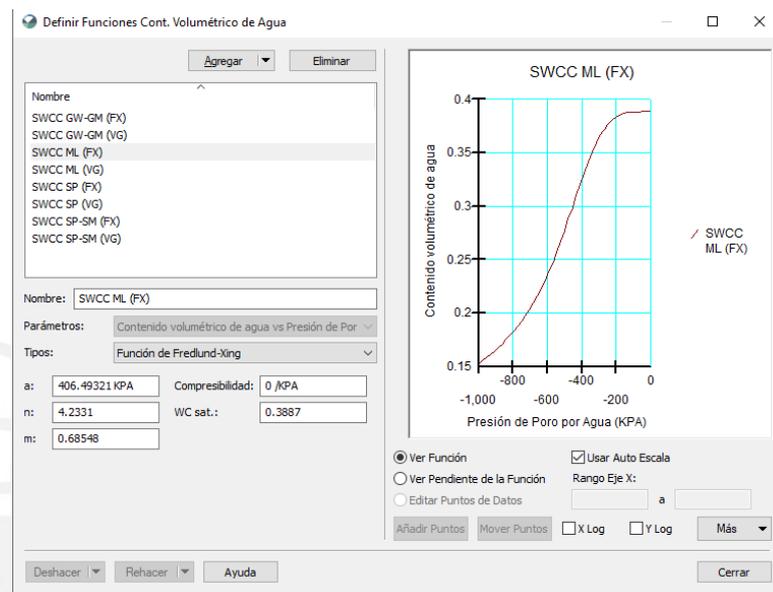


Figura 4.17. Asignación de parámetros para la Curva Característica. (Fuente Propia)

El proceso fue el mismo para los tres tipos de muestras restantes, los parámetros de entrada para cada tipo de muestra se muestran en el ítem 4.1.

En la figura 4.18 se muestra la curva de conductividad hidráulica del limo de baja plasticidad, esta curva fue estimada en base a la Curva Característica de la muestra.

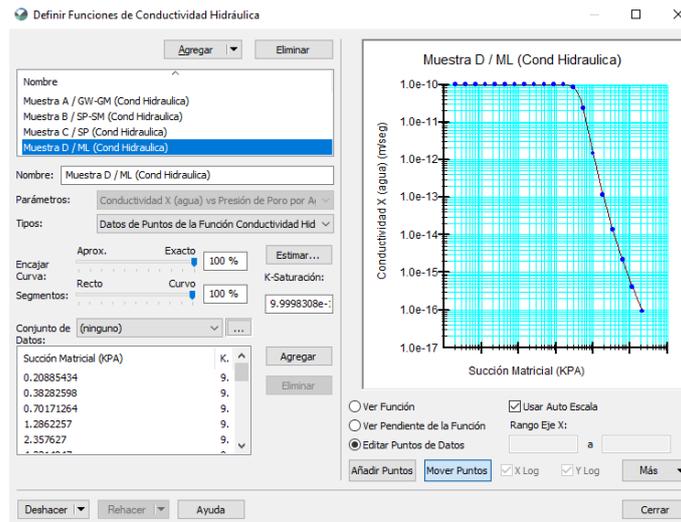


Figura 4.18. Definición de la curva de conductividad hidráulica. (Fuente Propia)

En la figura 4.19 se muestra el método de estimación, así como también la asignación de la Curva Característica que es el dato de entrada para realizar la estimación. Luego se ha asignado la conductividad hidráulica saturada de 1×10^{-10} m/seg, obtenida de los ensayos de laboratorio. Los resultados de las curvas de conductividad hidráulica restantes se muestran en el ítem 4.2.

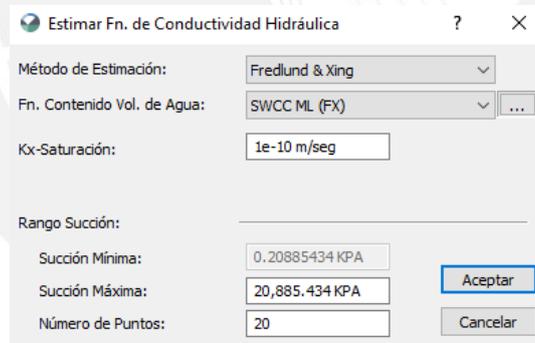


Figura 4.19. Estimación de la curva de conductividad hidráulica. (Fuente Propia)

En la figura 4.20 se muestran los materiales, se ejemplifica la cobertura con sus propiedades hidráulicas. Se le ha asignado una Curva Característica Suelo-Agua, así como también la curva de conductividad hidráulica.

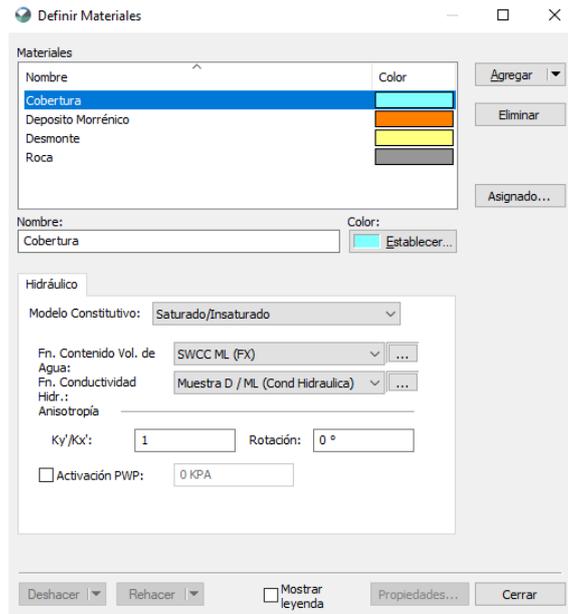


Figura 4.20. Definición de propiedades de materiales. (Fuente Propia)

4.3.1.2. Geometría de modelado y asignación de materiales

En la figura 4.21 se muestra la geometría del modelo. La estratigrafía del modelo está compuesta por una zona de rocosa, un estrato de morrena, el desmonte proveniente de los relaves y finalmente la cobertura de limo.

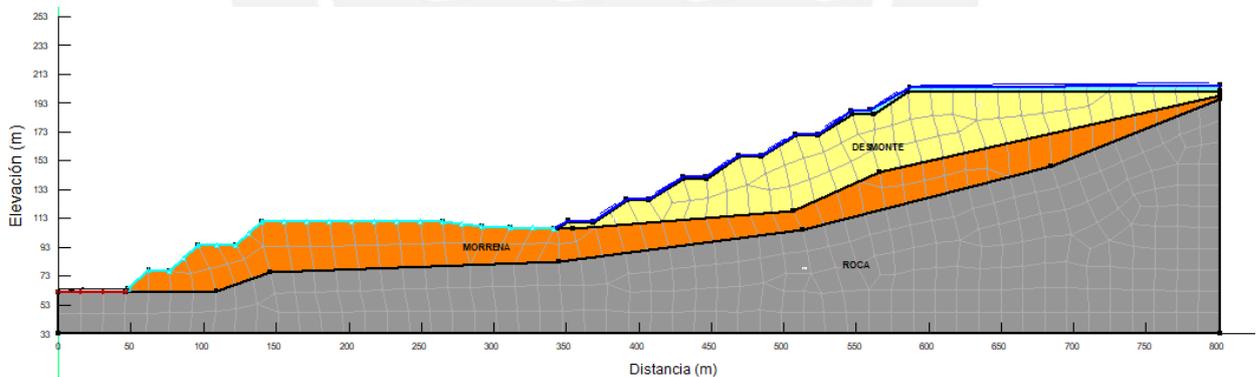


Figura 4.21. Geometría del modelo. (Fuente Propia)

En la figura 4.22 se muestra el proceso mediante el cual se han asignado los materiales previamente definidos. El material de color gris representa a la roca, el color naranja a la morrena, el color amarillo al desmonte y finalmente el color celeste a la cobertura de limo.

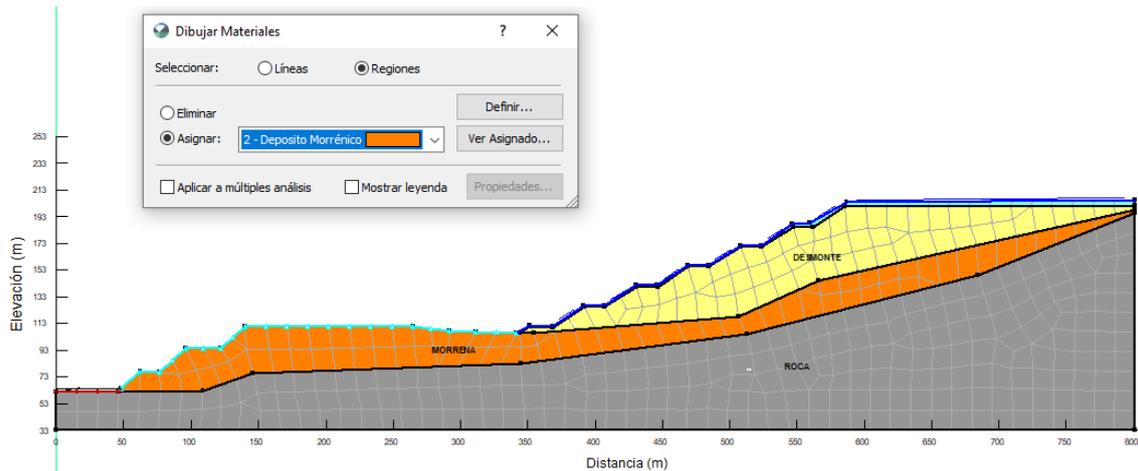


Figura 4.22. Asignación de materiales al modelo. (Fuente Propia)

4.3.1.3. Condiciones de borde

En la figura 4.23 se muestra las tres condiciones de borde utilizadas en el modelo. La primera es la altura de agua, zona por la cual el agua tiene que salir después de realizar el recorrido en el interior del botadero. La segunda es el modelado de la lluvia, para ello se ha asignado tres valores de caudal de agua, que simulan diferentes condiciones de intensidad de lluvias medidas en precipitaciones, las cuales fueron referenciadas se la base de datos de SENAMHI, ver tabla 4.7. Finalmente, la zona impermeable, donde la tasa de agua es cero y con ello no se permite el paso de agua.

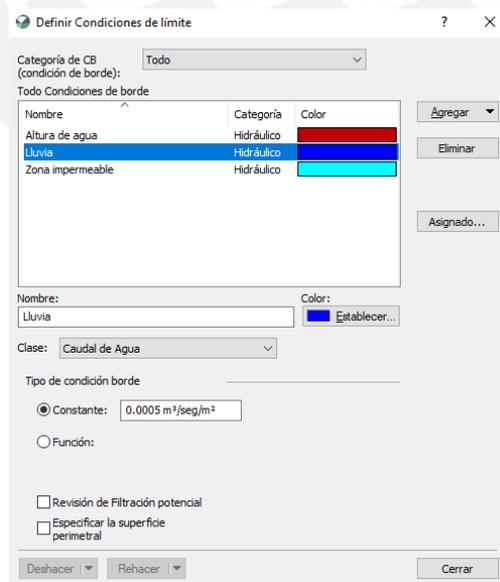


Figura 4. 23. Condiciones de borde. (Fuente Propia)

Tabla 4.7. Casos de caudales de lluvia. (Fuente Propia)

Precipitación (mm)	Q (litros/seg)
75	0.000029
150	0.000058
250	0.000096

En la figura 4.24 se muestra las condiciones de borde asignadas al modelo, en la zona por encima de la cobertura se ha asignado el caudal generado por la lluvia y en la zona del pie de botadero una altura de agua que induce al agua el camino de salida.

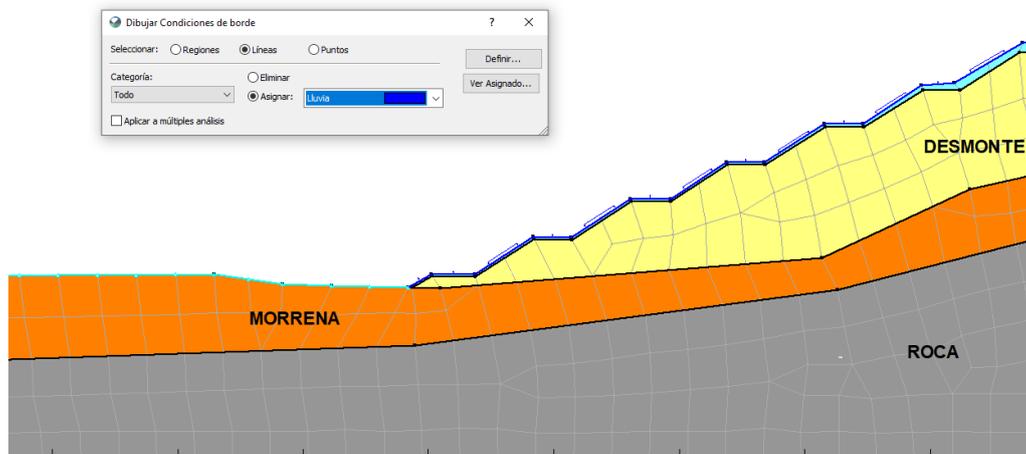


Figura 4.24. Condiciones de borde. (Fuente Propia)

4.3.1.4. Resultados

En la figura 4.25 se observan las líneas de flujo que recorren los estratos del desmonte y de la morrena. Se observa una mayor cantidad de caudal de agua en el pie del botadero, comparado con el caudal en la cresta del mismo. En el caso de la roca no se observan líneas de flujo, ya que para este material se ha considerado un valor de permeabilidad muy baja.

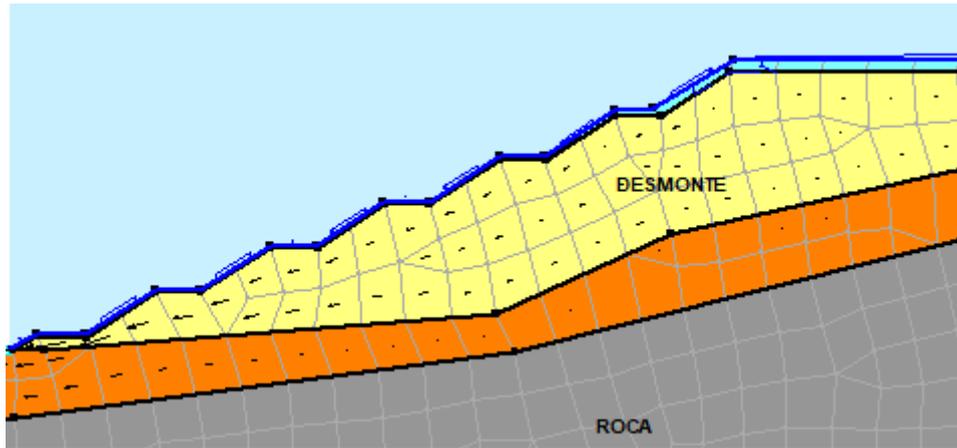


Figura 4.25. Resultados de líneas de flujo. (Fuente Propia)

En la figura 4.26 se muestra la gráfica Curva de caudal vs Tiempo para una precipitación de 75 mm o equivalente a un caudal de lluvia de 0.000029 litros/seg/m², evaluado en el punto color azul ubicado en la cresta del botadero, llamado punto A, figura 4.26a.

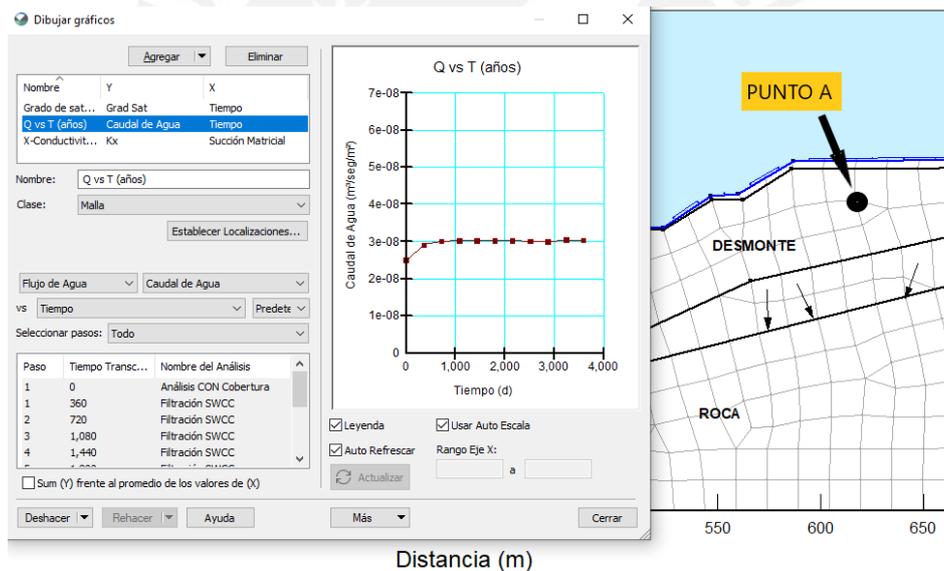


Figura 4.26. Resultados del caudal de agua en el punto A del botadero para un caudal de lluvia de 0.000029 litros/seg/m² o de 75 mm en precipitación. (Fuente Propia)

En las figuras 4.27a y 4.27b se muestran los valores de las curvas obtenidas para las precipitaciones máximas de lluvia en un mes, 75, 150 y 250 mm, estos valores obtenidos de SEEP/W, se han procesado y graficado para tener una mejor visualización de como varían los caudales en el tiempo.

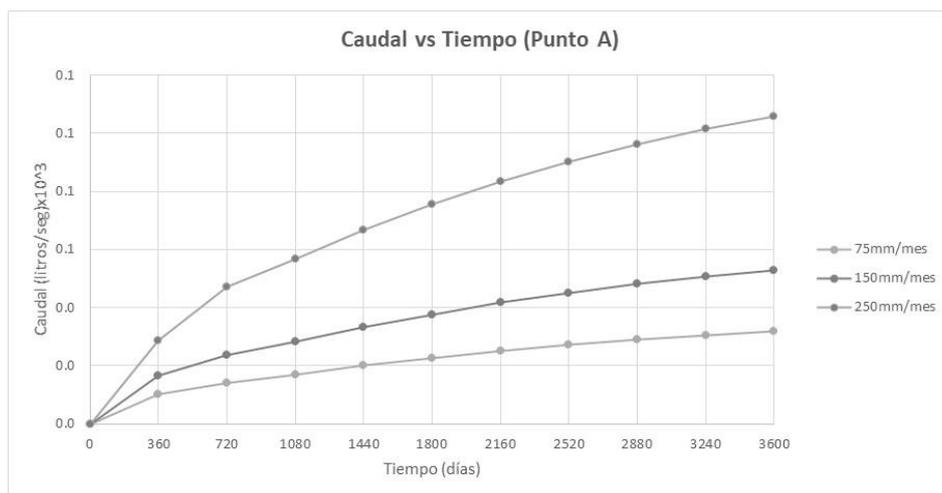


Figura 4.27a. Resultados de caudal de agua punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)

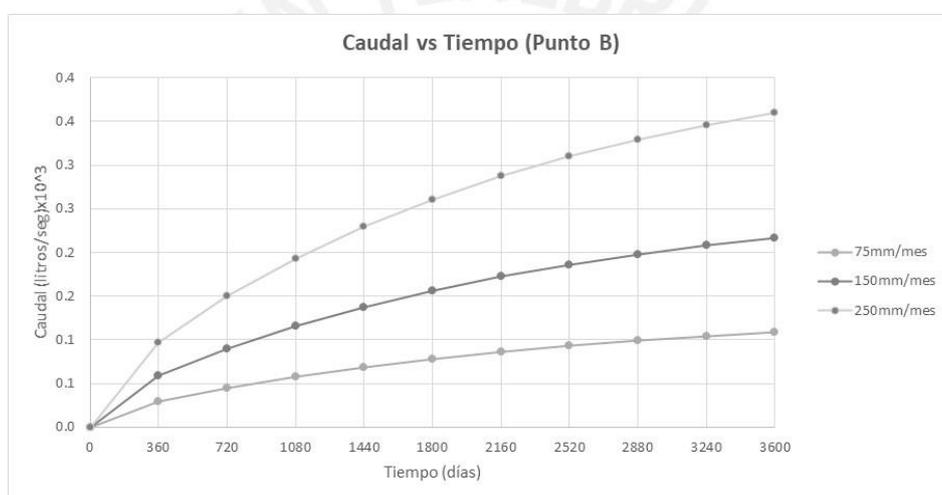


Figura 4.27b. Resultados de caudal de agua punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)

4.3.2. Modelo con propiedades de los suelos en estado saturado

El modelado con las propiedades del suelo en estado saturado es similar al modelado en estado no saturado; la variación importante en dichos modelos son la asignación de las propiedades de los mismo. En los siguientes ítems se muestras las variaciones para el caso saturado.

4.3.2.1. Propiedades de los materiales

En la figura 4.28 se muestra las propiedades asignadas a la cobertura. Las propiedades comprenden son la conductividad hidráulica saturada, la compresibilidad del suelo la cual ha

sido asumida como cero y finalmente su contenido volumétrico saturado de agua. El proceso fue el mismo para los tres tipos de muestras restantes.

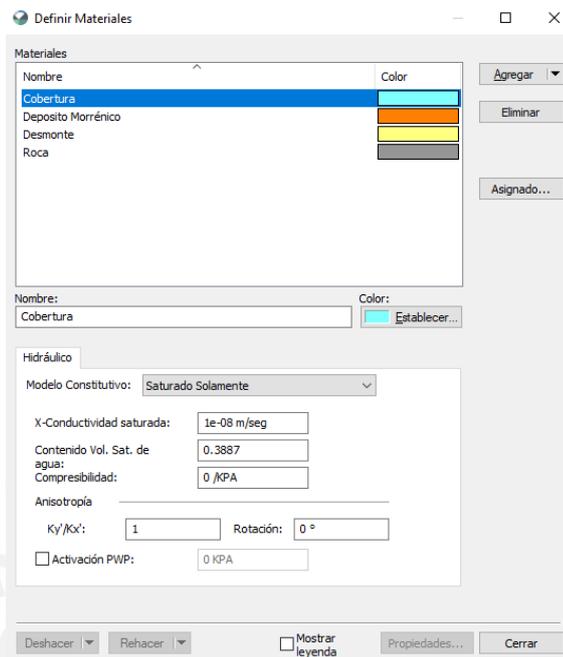


Figura 4.28. Asignación de parámetros para el estado saturado. (Fuente Propia)

4.3.2.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde para el modelo saturado son las mismas que para el estado no saturado. Además de las tres condiciones de caudal de lluvia que se está asignando al modelo, para visualizar las condiciones de borde ver ítem 4.3.1.3.

4.3.2.3. Resultados

En la figura 4.29 se observan las líneas de flujo, estas son similares al modelo en condición no saturado.

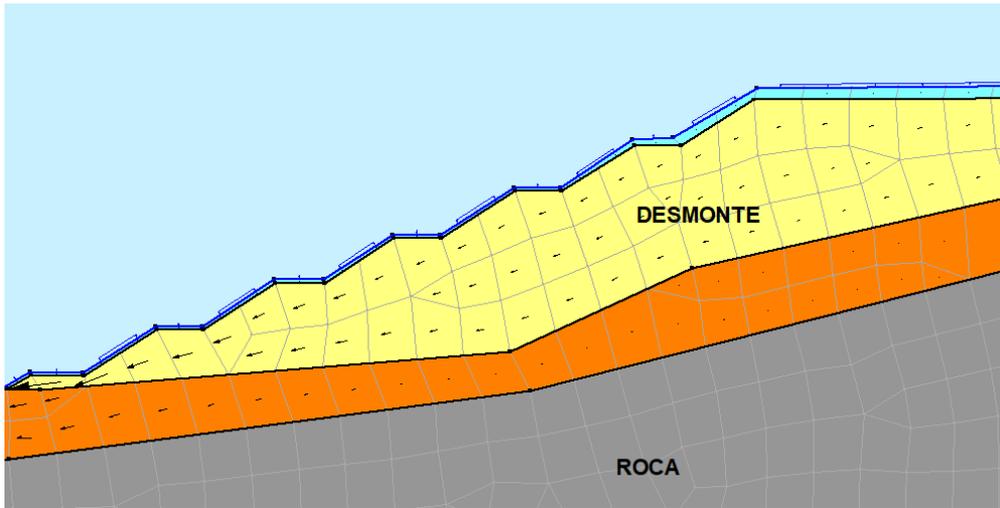


Figura 4.29. Resultados de líneas de flujo para estado del suelo saturado. (Fuente Propia)

En la figura 4.30 se muestra la curva de caudal vs tiempo para una precipitación máxima de lluvia en un mes, de 75 mm, para el punto B ubicado en la zona del pie del botadero.

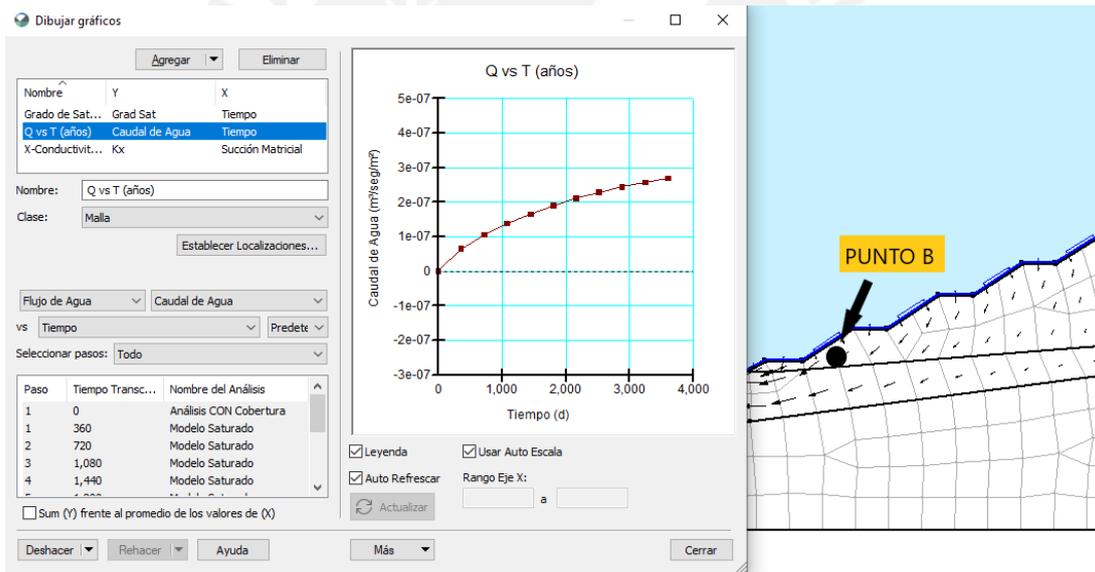


Figura 4.30. Resultados de caudal de agua en la zona del pie del botadero, punto B, para una precipitación de lluvia de 75 mm. (Fuente Propia)

En las figuras 4.31a y 4.31b se muestran los gráficos de caudal versus tiempo para el punto A y punto B.

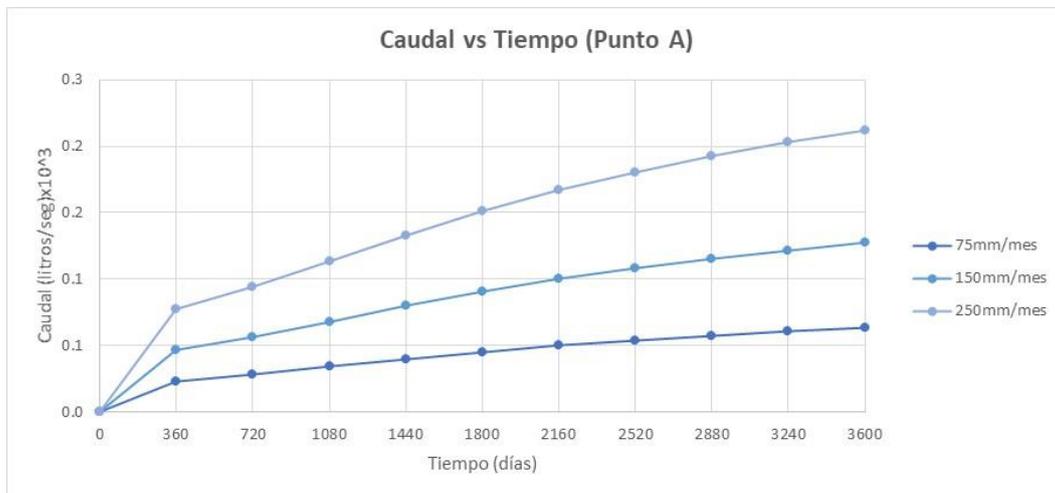


Figura 4.31a. Resultados de caudal de agua punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)

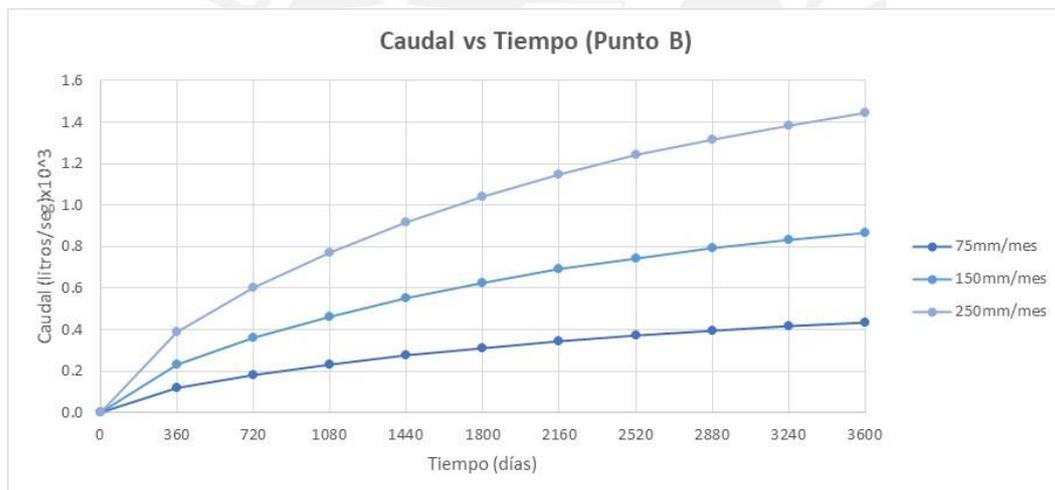


Figura 4.31b. Resultados de caudal de agua punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm/mes. (Fuente Propia)

4.3.3. Análisis de los resultados para el modelo saturado y no saturado

En la figura 4.32a y 4.32b se muestran las curvas de caudal de agua versus tiempo. Se ha integrado en un mismo gráfico los análisis con las propiedades saturadas y no saturadas de manera que se puede visualizar como varía el flujo de agua cuando se asignan las propiedades menos conservadoras, las de los suelos no saturados.

De la figura 4.32a, el primer comportamiento que se observa es que a medida que aumentan las precipitaciones de lluvia, en el punto A del botadero, también aumenta el caudal de agua que pasa por dicho punto. La curva para una precipitación de 250 mm está por encima de la curva con precipitación de lluvia de 150 mm y está por encima de la curva correspondiente a 75 mm de precipitación. Lo mencionado anteriormente y graficado en la figura 4.32a dan evidencia que, a una mayor precipitación de lluvia, el caudal de agua dentro del botadero es mayor. Esto último es evidente, aun cuando el modelado es considerando propiedades saturadas o no saturadas, ya que cuando se aumenta el nivel de las precipitaciones de lluvia, las redes de flujo al interior del botadero también aumentan, ya que existe un mayor caudal de agua que va a viajar por los estratos del suelo.

El segundo punto a evaluar es la condición en la cual se ha modelado el botadero, condición saturada, líneas color azul, y condición no saturada, líneas color plomo. Para el modelo con consideraciones saturadas, los valores de los caudales de agua que fluye dentro del botadero son mayores que para el caso del suelo con condiciones no saturadas. Esto se debe a que el comportamiento del suelo en condiciones saturadas implica que la permeabilidad o conductividad hidráulica es constante para todo instante de tiempo. Caso contrario ocurre en las condiciones no saturadas, donde la conductividad hidráulica del suelo experimenta una evolución ascendente a medida que este se va saturando, hasta llegar a valores cercanos de conductividad hidráulica saturada.

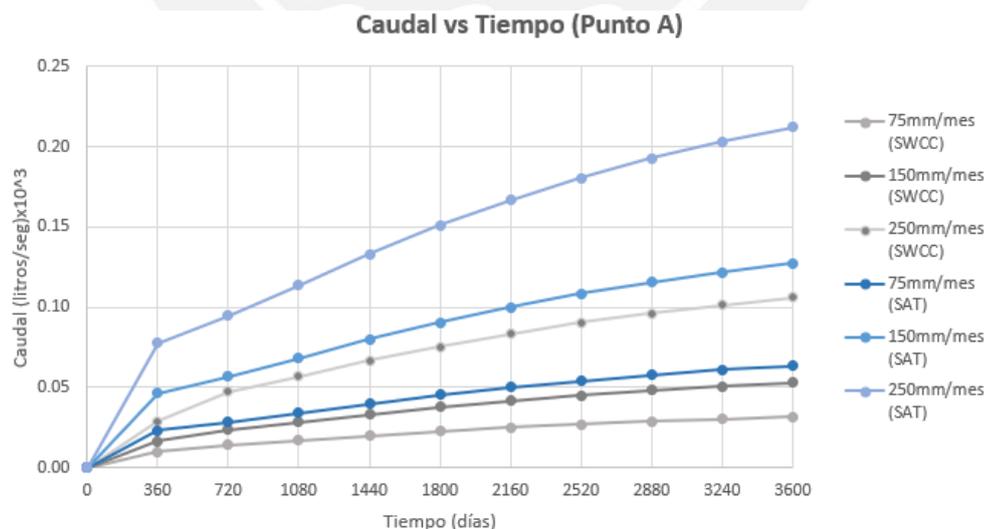


Figura 4.32a. Resultados de caudal de agua en punto A del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm para los casos en estado no saturado y saturado (Fuente Propia)

La figura 4.32b muestra la comparativa entre las curvas obtenidas para el modelo saturado y no saturado para el punto B, ubicado al pie del botadero. Se observa un comportamiento similar a lo explicado en el ítem 4.3.3 donde el caudal medido para el caso saturado es mayor que para el caso no saturado, debido a la evolución de la conductividad hidráulica del suelo. Además, se observa que en este punto se presenta un mayor caudal de agua, comparado al punto A. En el análisis se ha observado que las redes de flujo coinciden en dicho punto, ya que la zona por debajo de dicho estrato es roca casi impermeable, lo que obliga al agua a viajar por el angosto estrato de Morrena, aumentando así el caudal de agua en el punto B.

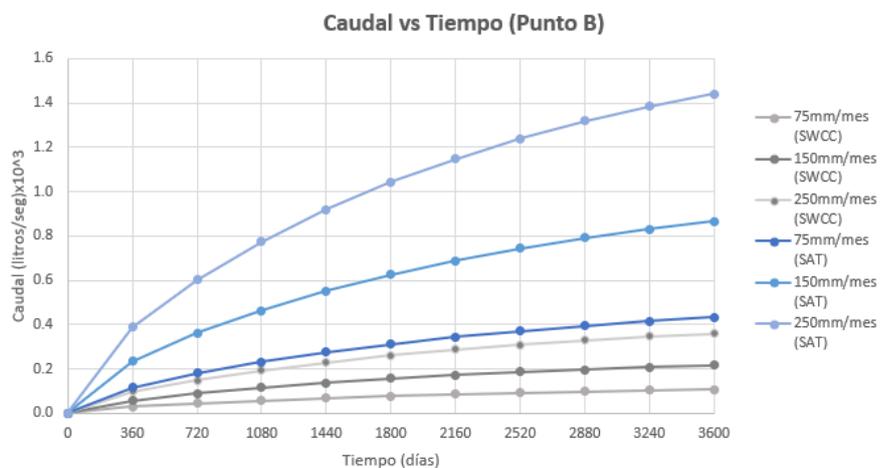


Figura 4.32b. Resultados de caudal de agua en el punto B del botadero para las precipitaciones de lluvia de 75, 150 y 250 mm para los casos en estado no saturado y saturado (Fuente Propia)

CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La determinación de las Curvas Características de un suelo requiere de ensayos con instrumentos especializados, experiencia en el testeo de muestras y de un personal calificado. Determinar la Curva solo usando las propiedades básicas del suelo como su granulometría e índices de plasticidad trata de superar dicha dificultad con el uso de los modelos de predicción.
- Un modelo de predicción no necesariamente es el que mejor represente a una muestra de suelo solo por presentar un mayor número de ensayos, sino que se ha observado que cada modelo se ajusta mejor a un tipo de muestra en particular. Esto se ha evidenciado porque el modelo de predicción de Perera et al. (2005), el cual tiene un mayor número de ensayos, no es el que mejor representa a los cuatro tipos de muestras estudiadas.
- De las cuatro muestras estudiadas, el modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003) describe de forma más precisa a las arenas mal gradadas, las cuales presentan un porcentaje de finos menor a 10%, como es el caso de las muestras B y C. Para el caso de las gravas, como es el caso de la muestra A, con un máximo de 5% de finos, el modelo que mejor se ajusta es el de Perera et al. (2005).
- Cuando un suelo presenta un mayor contenido de finos, el agua que se encuentra en la matriz del suelo, requiere de una mayor cantidad de energía o succión para ser extraída. Caso contrario ocurre en los suelos con bajos contenido de finos, en los cuales se necesita bajos valores de energía o succión para retirar el contenido de agua en la matriz del suelo. El modelo de Kovács (Aubertin et al., 2003) ha descrito de mejor manera a la muestra de suelo D, la cual presenta un 1% de gravas, 31% de arenas y 60% de finos, y no presenta índice de plasticidad. Es por ello que, para suelos finos con características similares, es el modelo que mejor describe su Curva Característica.

- Para el diseño de botaderos de mina, uno de los objetivos es que el agua infiltrada presente un recorrido en el mayor tiempo posible. Una forma con la que se puede lograr ello, es aumentando el espesor de la cobertura, generalmente de material fino de baja permeabilidad, de manera que el agua tarde el mayor tiempo posible en recorrer el espesor de cobertura. En el modelado, con un espesor de cobertura promedio de 1.5 metros, se ha observado que para condiciones saturadas el caudal es mayor, comparado con el modelo no saturado, para todo instante de tiempo. Una interpretación de ello es que, el caudal es menor debido a que el agua está tardando más tiempo en hacer el recorrido, y si se quiere alcanzar el mismo resultado con condiciones saturadas se deberá aumentar el espesor de la cobertura, con lo cual se incrementarían los costos de forma significativa por la gran extensión de la superficie a cubrir. Es por ello que, un modelo en condiciones no saturadas, simula mejor las condiciones reales y con ello un diseño más eficiente que involucra una reducción de costos, comparado con el modelo saturado.

5.2. Recomendaciones

- Las curvas características experimentales de las muestras B, C y D se han obtenido de publicaciones confiables y avaladas por la comunidad geotécnica; sin embargo, las propiedades de los suelos de las publicaciones varían con las propiedades de las muestras estudiadas, como en los valores de los porcentajes que pasan en su curva granulométrica, las condiciones del clima en la que se han realizado los ensayos, los tipos de ensayos realizados para obtener la curva característica, entre otros. Esto genera que se disminuya el grado de confiabilidad en la elección del modelo de predicción. Se recomienda ensayar las muestras de suelo B, C y D, ya que por motivos de costos que estos ensayos demandan, no se ha podido obtener los resultados experimentales de dichas muestras de suelo. Los ensayos de estas muestras van a permitir corroborar las curvas predichas mediante los modelos de predicción de una forma directa y no mediante referencias bibliográficas, mejorando y ajustando las conclusiones que se han obtenido en la presente tesis.
- Realizar dos agrupaciones a las muestras de suelo, la primera si la muestra es plástica o no plástica. La segunda, parte de la primera agrupación, es decir, del

grupo de suelo plásticos o no plásticos se agrupan por rangos de sus porcentajes de gravas, arenas y finos, ya que los modelos de predicción se basan en dichos porcentajes. Ya con los grupos reducidos, ensayar las muestras contenidas en dicho grupo, con ello las curvas deberían presentar formas semejantes, ya que las características físicas son similares. Finalmente, se deberá elegir la curva representativa del grupo de suelos ensayados, y será comparada con la curva predicha por ambos modelos de predicción, eligiendo la curva más cercana a la curva experimental. Con ello se estaría eligiendo al modelo que mejor predice la curva característica, con un bajo porcentaje de error, y además enfocado en un determinado grupo de suelos con características similares.

- Los modelos de predicción investigados son recomendables de usar para estudios de proyectos en una etapa de prefactibilidad, ya que estos modelos predicen de manera general la forma y los valores de las curvas características, siendo necesario el uso de la experiencia y criterio del profesional responsable en la interpretación y uso de los resultados obtenidos. Para el diseño y construcción se recomienda realizar ensayos que midan directamente la curva característica y no usar estimaciones, como son los modelos de predicción. Además, se deberá verificar en campo, mediante ensayos *in-situ*, como se desarrolla la succión del suelo ante un cambio en su contenido de humedad.

Referencias

- Alanis, A., Rojas, E., & Chavez, O. (2012). Deformación volumétrica en suelos no saturados
Volumetric strain in unsaturated soils. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos
e Ingeniería Geotécnica.
- Alfaro Soto, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. Revista de La Academia
Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 32(125), 471–482.
- Andrea, J., Moreno, U., Camilo, J., & Ramirez, R. (2019). Obtención de la curva de retención
de agua en suelos caoliníticos con mixturas de óxido de hierro usando los métodos del
papel filtro y placa de succión. Universidad Piloto de Colombia, 1–9.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussièrre, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the
water retention curve from basic geotechnical properties. Canadian Geotechnical Journal,
40(6), 1104–1122. <https://doi.org/10.1139/t03-054>
- Barrera, M., & Garnica, P. (2002). Introducción a La Mecánica De Suelos No Saturados.
Instituto Mexicano Del Transporte, 198, 1–155.
- Barriga, H., & Ruz, F. (2011). Evolution of Unsaturated Soils in Engineering Practice. Journal
of Chemical Information and Modeling, 9.
- Brooks, R.H., and Corey (1964). Hydraulic properties of porous medium. Colorado State
University (Fort Collins), Hydrology Paper 3.
- Chiorean, V. F. (2017). Determination of Matric Suction and Saturation Degree for
Unsaturated Soils, Comparative Study - Numerical Method versus Analytical Method.
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245(3).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032074>
- Chen, J., Gong, X., & Wang, M. (2006). A Fractal Based Soil-Water Characteristic Curve
Model for Unsaturated Soils. Gsp 148, 55–61.

- Fernández, E. F. (2015). Estudio De La Erosión Interna En Estructuras Térreas Enfocado Al Problema Ocurrido En La Presa “El Batán” Ubicada En El Estado De Querétaro. Unam.
- Fredlund, D. G., Anqing Xing, & Shangyan Huang. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533–546. <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 521–532.
- Fredlund, D.G y Morgenstern, N.R. (1977). Stress state variable for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103: pp. 447- 466.
- Fredlund, Delwyn G. (2000). The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963–986. <https://doi.org/10.1139/t00-026>
- Fredlund, Delwyn G. (2006). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3), 286–321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(286))
- Fredlund, Delwyn G., & Rahardjo, H. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Song, INC.
- Fredlund M., Fredlund D., & Wilson, G. (1997). Prediction of the SWCC from grain size distribution and volume mass properties. *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, 1, 1–12.
- Hosagasi, T. (2006). *Evaluation of Soil Water Characteristic Curves and Permeability Functions for Modeling of Seepage in Unsaturated Soils (Issue Master of Science)*. Tufts University.
- Kovács, G. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Krisdani, H., Rahardjo, H., and Leong, E. C. (2009). Use of instantaneous profile and statistical methods to determine permeability functions of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 7, pp. 869–874.

- López, N., & Mendoza, P. (2016). Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, INC.
- Menacho Caso, J. E. (2014). Características de Resistência Não Saturada de um Solo Coluvionar e um Solo Saprolítico de Tinguá, RJ. Pontificia Universidad Catolica de Rio de Janeiro.
- Meza, V. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Miller, D. J., & Nelson, J. D. (2006). Osmotic Suction in Unsaturated Soil Mechanics. 1382–1393.
- Murray D. Fredlund, D.G. Fredlund. (1997). Prediction of the SWCC from grain size distribution and volume mass properties. 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, 1, 1–12.
- Perera, Y. Y., Zapata, C. E., Houston, W. N., & Houston, S. L. (2005). Prediction of the soil-water characteristic curve based on grain-size-distribution and index properties. *Geotechnical Special Publication*, 130–142, 49–60. [https://doi.org/10.1061/40776\(155\)4](https://doi.org/10.1061/40776(155)4)
- Ridley, A. M. (1993). "The measurement of soil moisture suction." PhD thesis, Imperial College, London.
- Umbarila, A., & Rodríguez, J. (2019). Obtención de la curva de retención de agua en suelos caoliníticos con mixturas de óxido de hierro usando los métodos del papel filtro y placa de succión. Universidad Piloto de Colombia, 1–9.
- Van Genuchten (1980). "Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America J.*, 44(5), pp. 892-898 (1980).
- Walshire, L., & Robbins, B. (2017). SWCC Prediction: Seep / W Add-In Functions Geotechnical and Structures Laboratory. 2017(June).
- Zapata, C., Houston, W., Houston, S., & Walsh, K. (2000). Soil-Water Characteristic Curve Variability.

Zhai, Q., & Rahardjo, H. (2012). Determination of soil-water characteristic curve variables. *Computers and Geotechnics*, 42, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.11.010>

Zhang, C., & Lu, N. (2019). Unitary Definition of Matric Suction. *Geotechnical Testing Journal*, 66(11), 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002004](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002004)



Anexos

Modelo de Perera (2005)

Muestra A:

Descripción de la muestra:

Tabla 3.1. Ensayo de caracterización física de la muestra A.

Campaña	SUCS	Análisis granulométrico			Límites de Atterberg		Contenido de humedad	Gravedad específica
		ASTM D-6913			ASTM D-4318		ASTM D-2216	
		gravas (%)	arenas (%)	finos (%)	LL	IP	(%)	Gs
Muestra A	GW-GM	53	42	4.4	NP	NP	6	2.61

Como se muestra en la tabla 3.1 se presenta una grava ligeramente limosa, bien graduada, con un porcentaje de grava de 53% y 5% de finos, dicha grava no presenta límites de Atterberg y presenta un contenido de humedad de 6%.

En la tabla 3.2 se muestra la abertura correspondiente a cada tamiz, así como también el porcentaje que pasa en cada tamiz. De dicha tabla se usó el porcentaje que pasa la malla 200 o la denominada P_{200} para usarlos en los cálculos de la predicción de la curva característica.

Tabla 3.2. Abertura y porcentaje que pasa en cada tamiz

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa
	mm	(%)
3"	76.2000	100.0000
2"	50.8000	92.0000
1 1/2"	38.1000	89.0000
1"	25.4000	82.0000
3/4"	19.0500	77.0000
3/8"	9.5250	66.0000
N°4	4.7500	47.0000
N°10	2.0000	29.0000
N°20	0.8500	19.0000
N°40	0.4250	13.8000
N°60	0.2500	10.0000
N°140	0.1060	6.1000
N°200	0.0750	4.4000

Para una mejor visualización, en la figura 3.1 se muestra la curva granulométrica en base a los puntos de la tabla 3.2.

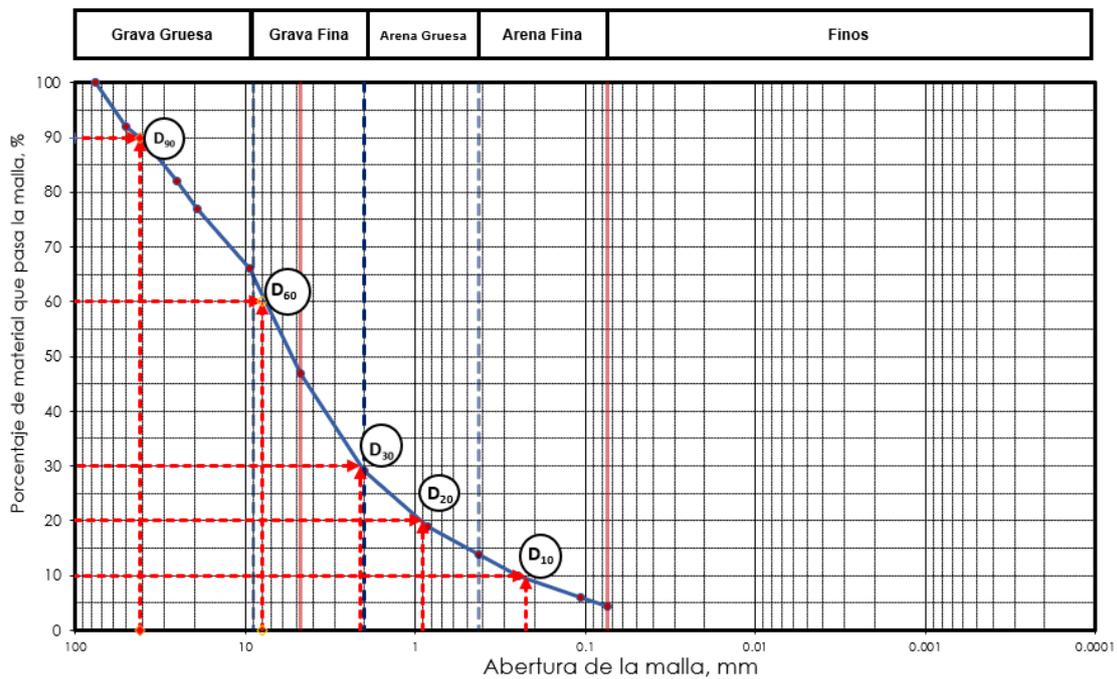


Figura 3.1. Curva Granulométrica de la muestra estudiada.

De la figura 3.1 se observan cinco diámetros muy importantes, los cuales son los que corresponden al 90%, 60%, 30%, 20% y 10% que pasan por dicha malla. En la tabla 3.3 se muestra el resumen de los diámetros correspondientes a cada porcentaje.

Tabla 3.3. Resumen de los diámetros que pasan por cada porcentaje, además del diámetro de la malla 200.

D₉₀ (mm)	42.000
D₆₀ (mm)	7.900
D₃₀ (mm)	2.100
D₂₀ (mm)	0.910
D₁₀ (mm)	0.225
P₂₀₀ (mm)	4.400

Ya con estos datos, se realizan los cálculos de los parámetros necesarios para predecir la curva característica, con los fundamentos teóricos del capítulo 2. A continuación, se muestra el procedimiento de los cálculos correspondientes.

$$m_2 = \frac{20}{[\log(D_{30}) - \log(D_{10})]}$$

$$m_2 = \frac{20}{[\log(2.1) - \log(0.225)]} = 20.617$$

Reemplazando m_2 en D_0 .

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{20.6177} + \log(2.1)\right]} = 0.0736$$

Luego se calcula el valor de m_1

$$m_1 = \frac{30}{[\log(D_{90}) - \log(D_{60})]}$$

$$m_1 = \frac{30}{[\log(42) - \log(7.9)]} = 41.343$$

Cálculo de b y b_f

$$b = \left\{ 5.39 - 0.29 \ln \left[P_{200} \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0.57} + 0.021P_{200}^{1.19} \right\} m_1^{0.1}$$

$$b = \left\{ 5.39 - 0.29 * \ln \left[4.4 * \left(\frac{42}{0.225} \right) \right] + 3 * 0.0736^{0.57} + 0.021 * 4.4^{1.19} \right\} 41.343^{0.1}$$

$$b = 6.158$$

$$b_f = 0.936b - 3.8$$

$$b_f = 0.936 * 6.158 - 3.8 = 1.964$$

Cálculo del valor del parámetro a y a_f

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]}$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{41.343} + \log(7.9)\right]} = 73.303$$

$$a = -2.79 - 14.1 \log(D_{20}) - 1.9 \times 10^{-6} P_{200}^{4.34} + 7 \log(D_{30}) + 0.055 D_{100}$$

$$a = -2.79 - 14.1 \log(0.910) - 1.9 \times 10^{-6} 4.4^{4.34} + 7 \log(2.1) + 0.055 * 73.303$$

$$a = 4.073$$

Luego el parámetro a_f es igual a:

$$a_f = 1.14a - 0.5$$

$$a_f = 1.14 * 4.073 - 0.5 = 4.143 > 1 \rightarrow a_f = 1$$

El valor del parámetro a_f es 4.1437 y según recomendación del autor este no debe superar al valor de la unidad, ya que puede generar un error en procedimientos posteriores. Por ello el valor es truncado a 1. Quedando de a_f igual a 1.

Cálculo del parámetro c y c_f

$$c = \log m_2^{1.15} - \left(1 - \frac{1}{b_f}\right)$$

$$c = \log(20.6177)^{1.15} - \left(1 - \frac{1}{1.964}\right) = 0.878$$

$$c_f = 0.26e^{0.758c} + 1.4D_{10}$$

$$c_f = 0.26e^{0.758*0.878} + 1.4 * 0.225 = 0.821$$

Finalmente, el autor asume el parámetro h_{rf} igual a 100, que representa la succión residual.

$$h_{rf} = 100$$

En la tabla 3.4 se presenta un resumen de todos los parámetros obtenidos.

Tabla 3.4. Parámetros obtenidos para el modelo de predicción de Perera.

a_f	1.00
a	4.074
D_{100}	73.303
b_f	1.964
b	6.158
D_0	0.074
c_f	0.821
c	0.878

h_{rf}	100.000
----------	---------

Ya con los parámetros hallados se calculó el factor de corrección de Fredlund & Xing (1994) de manera que para un valor de succión de 10^6 KPa el valor del contenido de humedad sea cero.

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right]$$

Se asigna valores de la succión, ψ , que van desde 0 hasta 106KPa y para el caso de la succión residual este es un valor constante de ψ_{rf} igual a 100. Ya con el factor de corrección de calcula la relación entre el contenido de humedad volumétrica con la succión del suelo, con la ecuación 1 presentada en el capítulo 2.

$$\theta_w = C(h) \times \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right] \quad (2)$$

$$\theta_s = \frac{V_w}{V_T} = \frac{V_w}{V_v + V_s}$$

El contenido volumétrico de agua en estado saturado fue brindado en los resultados de laboratorio $\theta_s = 0.299$

Finalmente, en la tabla 3.5 se presenta los resultados de la relación succión versus contenido volumétrico de agua, además del factor de corrección de Fredlund & Xing (1994).

Tabla 3.5. Resultados que relacionan la succión con el contenido volumétrico de agua

Succión (ψ)	θ_s	$C_{(h)}$	θ_w
kPa	-		m ³ /m ³
0.10	0.299	1.000	0.2976
0.11	0.299	1.000	0.2974
0.12	0.299	1.000	0.2972
0.13	0.299	1.000	0.2970
0.14	0.299	1.000	0.2968
0.15	0.299	1.000	0.2965

0.16	0.299	1.000	0.2962
0.17	0.299	1.000	0.2959
0.18	0.299	1.000	0.2956
0.20	0.299	1.000	0.2949
0.22	0.299	1.000	0.2942
0.24	0.299	1.000	0.2934
0.25	0.299	1.000	0.2926
0.27	0.299	1.000	0.2917
0.29	0.299	1.000	0.2907
0.32	0.299	1.000	0.2892
0.35	0.299	1.000	0.2876
0.38	0.299	1.000	0.2858
0.44	0.299	1.000	0.2821
0.29	0.299	1.000	0.2907
0.34	0.299	1.000	0.2881
0.39	0.299	1.000	0.2852
0.49	0.299	0.999	0.2787
0.59	0.299	0.999	0.2715
0.69	0.299	0.999	0.2638
0.78	0.299	0.999	0.2559
0.88	0.299	0.999	0.2479
0.98	0.299	0.999	0.2400
1.27	0.299	0.999	0.2179
1.57	0.299	0.998	0.1989
1.86	0.299	0.998	0.1831
2.45	0.299	0.997	0.1592
2.94	0.299	0.997	0.1450
3.92	0.299	0.996	0.1257
4.41	0.299	0.995	0.1189
4.90	0.299	0.995	0.1133
5.88	0.299	0.994	0.1046
6.86	0.299	0.993	0.0981
7.85	0.299	0.992	0.0931
8.83	0.299	0.991	0.0891
9.81	0.299	0.990	0.0857
14.71	0.299	0.985	0.0749
19.61	0.299	0.981	0.0686
29.42	0.299	0.972	0.0613
39.23	0.299	0.964	0.0569
49.03	0.299	0.957	0.0538
98.06	0.299	0.926	0.0455
196.13	0.299	0.882	0.0386
294.19	0.299	0.851	0.0351
392.26	0.299	0.827	0.0327
490.32	0.299	0.807	0.0310
980.64	0.299	0.742	0.0261
1961.28	0.299	0.671	0.0218
4903.20	0.299	0.575	0.0170
9806.40	0.299	0.501	0.0139
49032.00	0.299	0.327	0.0080
98064.00	0.299	0.252	0.0058
490320.00	0.299	0.077	0.0016
980640.00	0.299	0.002	0.0000

Para una mejor visualización, se graficó los resultados mostrados en la tabla 3.5, ver figura 3.2.

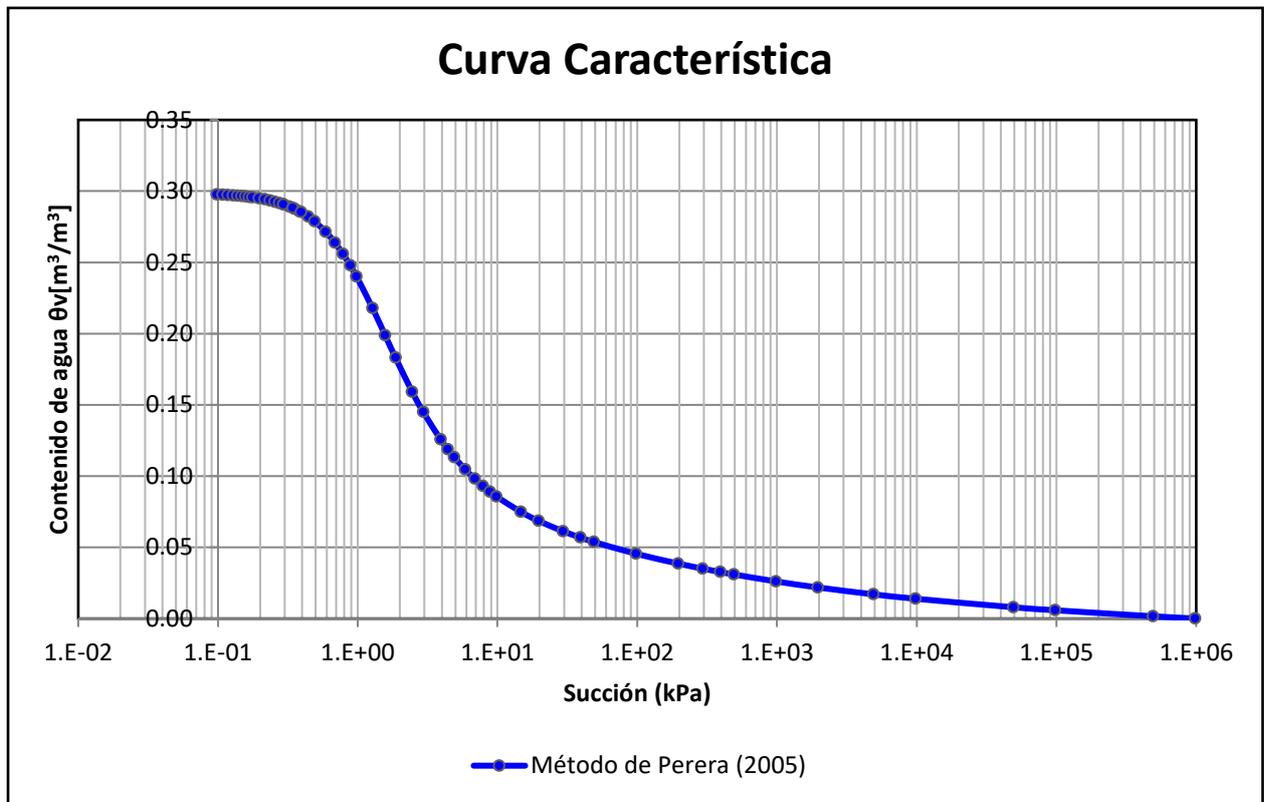


Figura 3.2. Curva característica suelo-agua por el modelo de Perera (2005).

Descripción de la muestra: B, C y D

Tabla 3.6. Resumen de ensayos de caracterización física de las muestras B, C y D.

Campana	SUCS	Análisis granulométrico			Límites de Atterberg		Contenido de humedad	Gravedad específica
		ASTM D-6913			ASTM D-4318		ASTM D-2216	
		gravas (%)	arenas (%)	finos (%)	LL	IP	(%)	
Muestra B	SP-SM	42	49	9.0	NP	NP	3	2.55
Muestra C	SP	41	55	3.9	NP	NP	7	2.63
Muestra D	ML	1	31	68	NP	NP	19	2.73

SP-SM: Arena ligeramente limosa, mal graduada.

SP: Arena mal graduada.

ML: Limo de baja plasticidad.

Muestra B:

Tabla 3.7. Abertura y porcentaje que pasa en cada tamiz, muestra B.

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa
	mm	(%)
3"	76.2000	100.00
2"	50.8000	100.00
1 1/2"	38.1000	94.10
1"	25.4000	86.10
3/4"	19.0500	81.10
3/8"	9.5250	73.80
N°4	4.7500	59.00
N°10	2.0000	35.80
N°20	0.8500	23.80
N°40	0.4250	16.10
N°60	0.2500	15.70
N°140	0.1060	10.20
N°200	0.0750	9.00

Para una mejor visualización, en la figura 3.3 se muestra la curva granulométrica en base a los puntos de la tabla 3.7.

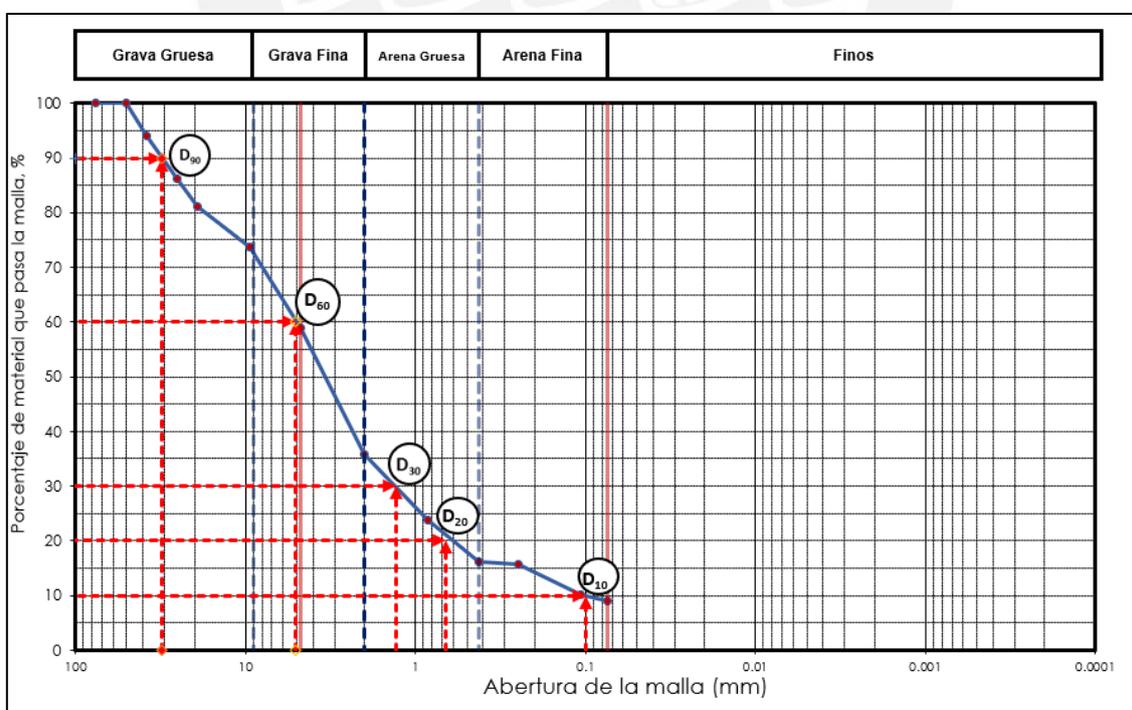


Figura 3.3. Curva Granulométrica de la muestra B.

Tabla 3.8. Resumen de los diámetros que pasan por cada porcentaje, además del diámetro de la malla 200. Muestra B.

D₉₀	31.000
D₆₀	5.100
D₃₀	1.300
D₂₀	0.670
D₁₀	0.100
P₂₀₀	9.000

Tabla 3.9. Parámetros obtenidos para el modelo de predicción de Perera, muestra B.

a_r	1.000
a	3.545
D₁₀₀	56.575
b_r	1.274
b	5.421
D₀	0.028
c_r	0.731
c	1.083
ψ_r	100.000

Tabla 3.10. Resultados que relacionan la succión con el contenido volumétrico de agua, muestra B.

Succión (ψ)	θ _s	C _(h)	θ _w
kPa	-		m ³ /m ³
0.1	0.071	1.000	0.0701
0.2	0.071	1.000	0.0687
0.4	0.071	1.000	0.0659
1	0.071	0.999	0.0582
2	0.071	0.998	0.0495
5	0.071	0.995	0.0379
6	0.071	0.994	0.0359
10	0.071	0.990	0.0310
15	0.071	0.985	0.0278
30	0.071	0.972	0.0235
40	0.071	0.963	0.0220
60	0.071	0.949	0.0201
70	0.071	0.942	0.0195
85	0.071	0.933	0.0187
100	0.071	0.925	0.0180
115	0.071	0.917	0.0175
130	0.071	0.910	0.0170
145	0.071	0.903	0.0166
170	0.071	0.892	0.0161
215	0.071	0.875	0.0153
1000	0.071	0.740	0.0107
1000000	0.071	0.000	0.0000

Para una mejor visualización, se graficó los resultados mostrados en la tabla 3.10, ver figura 3.4.

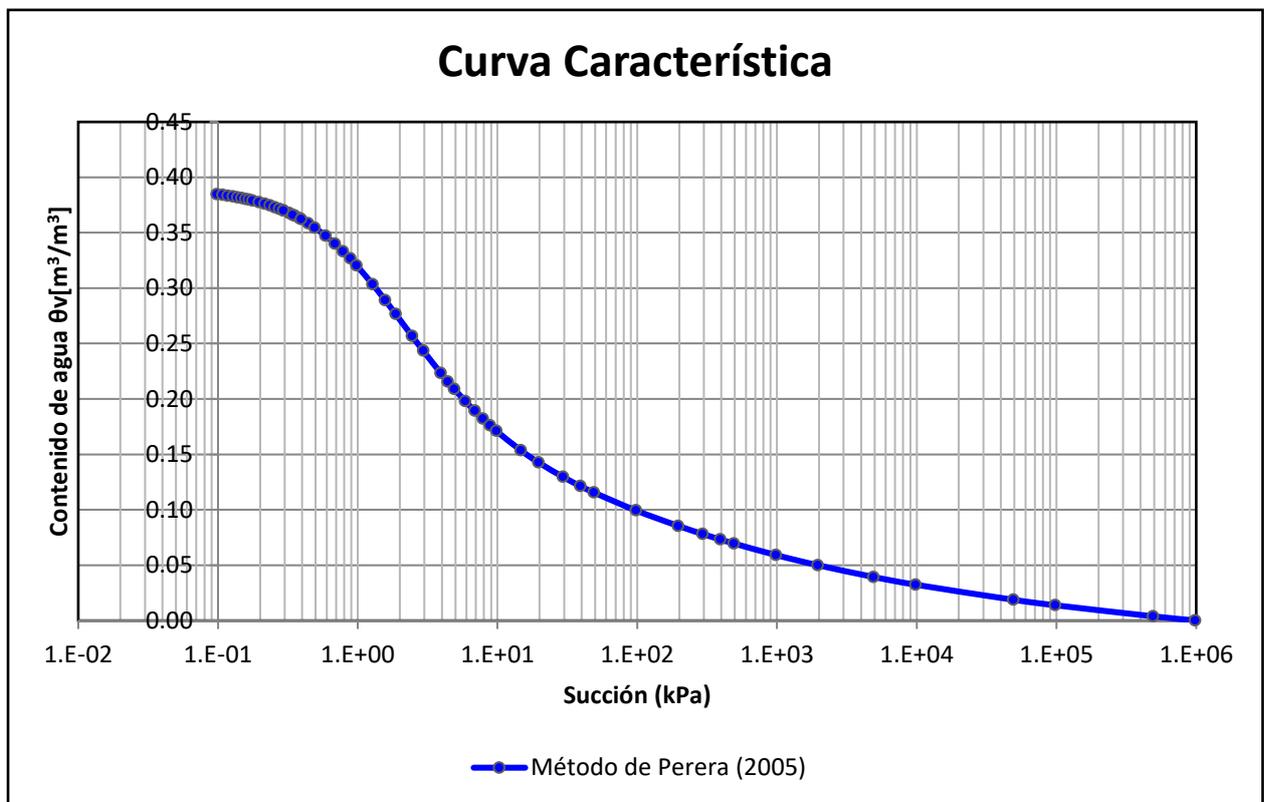


Figura 3.4. Curva característica suelo-agua, muestra B, por el modelo de Perera (2005).

Muestra C:

Tabla 3.11. Abertura y porcentaje que pasa en cada tamiz, muestra C.

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa
	mm	(%)
3"	76.2000	100.00
2"	50.8000	94.00
1 1/2"	38.1000	94.00
1"	25.4000	83.00
3/4"	19.0500	77.90
3/8"	9.5250	71.80
N°4	4.7500	58.00
N°10	2.0000	39.00
N°20	0.8500	21.20
N°40	0.4250	10.80
N°60	0.2500	7.90
N°140	0.1060	5.00
N°200	0.0750	3.90

Para una mejor visualización, en la figura 3.5 se muestra la curva granulométrica en base a los puntos de la tabla 3.11.

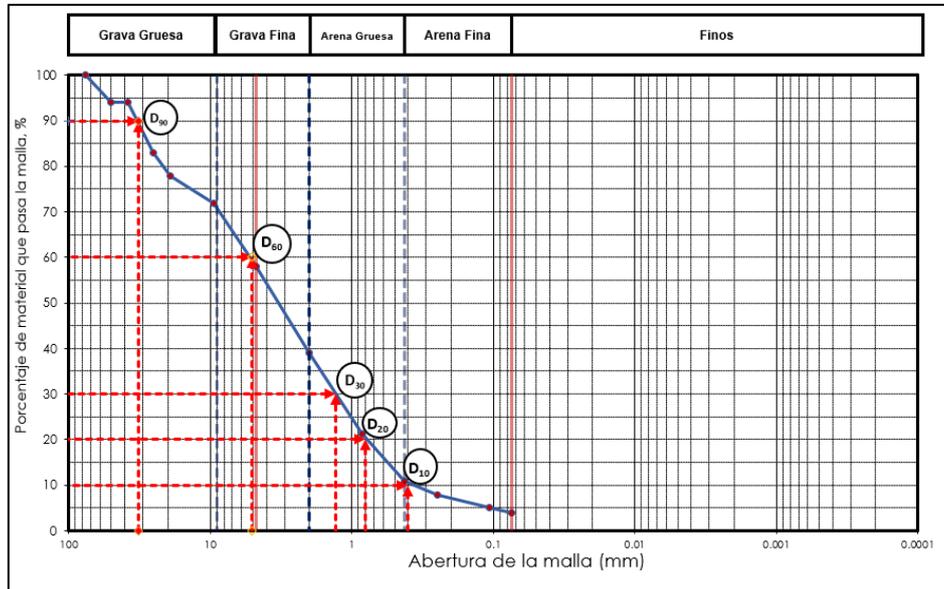


Figura 3.5. Curva Granulométrica de la muestra C.

Tabla 3.12. Resumen de los diámetros que pasan por cada porcentaje, además del diámetro de la malla 200.

D₉₀	32.000
D₆₀	5.100
D₃₀	1.300
D₂₀	0.810
D₁₀	0.401
P₂₀₀	3.900

Tabla 3.4. Parámetros obtenidos para el modelo de predicción de Perera.

a_r	1.000
a	2.543
D₁₀₀	59.021
b_r	3.069
b	7.338
D₀	0.223
c_r	1.131
c	1.034
ψ_r	100.000

Tabla 3.13. Resultados que relacionan la succión con el contenido volumétrico de agua

Succión (ψ) kPa	θ_s	$C_{(h)}$	θ_w m ³ /m ³
0.1	0.155	1.000	0.1554
0.2	0.155	1.000	0.1550
0.4	0.155	1.000	0.1517
1	0.155	0.999	0.1141
2	0.155	0.998	0.0574
5	0.155	0.995	0.0253
6	0.155	0.994	0.0224
10	0.155	0.990	0.0169
15	0.155	0.985	0.0140
30	0.155	0.972	0.0107
40	0.155	0.963	0.0096
60	0.155	0.949	0.0084
70	0.155	0.942	0.0080
85	0.155	0.933	0.0076
100	0.155	0.925	0.0072
115	0.155	0.917	0.0069
130	0.155	0.910	0.0066
145	0.155	0.903	0.0064
170	0.155	0.892	0.0061
215	0.155	0.875	0.0057
1000	0.155	0.740	0.0036
1000000	0.155	0.000	0.0000

Para una mejor visualización, se graficó los resultados mostrados en la tabla 3.6, ver figura 3.13.

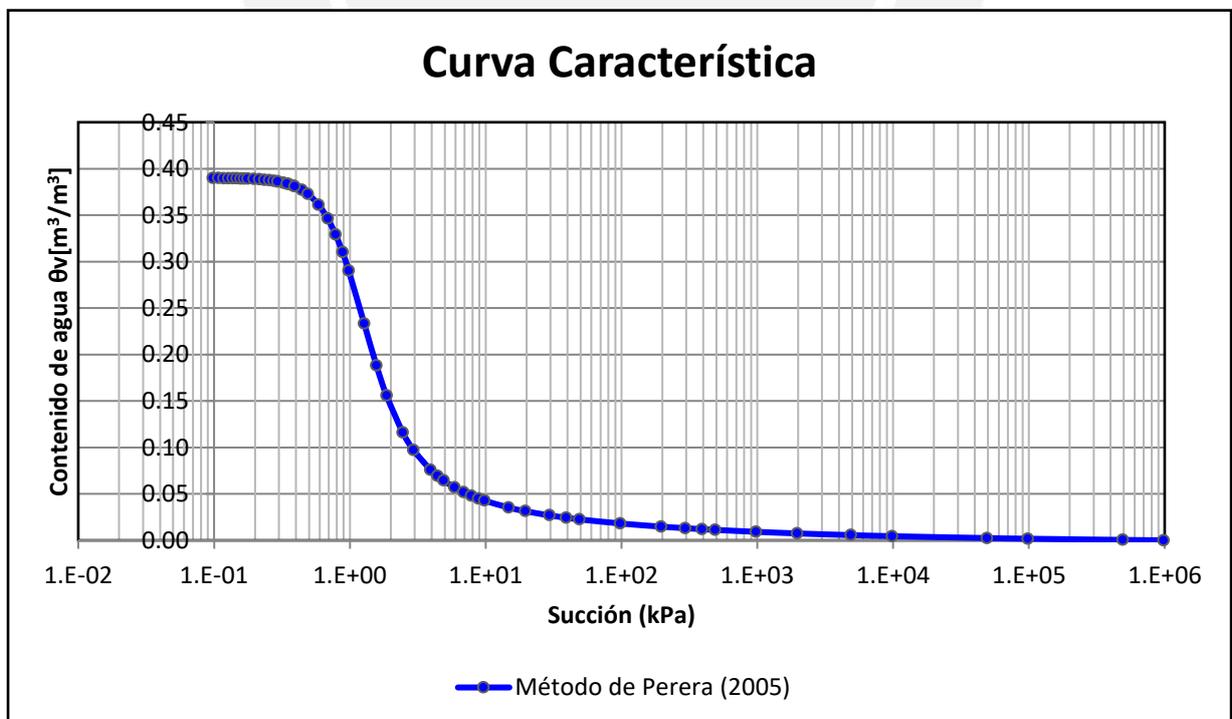


Figura 3.6. Curva característica suelo-agua, muestra C, por el modelo de Perera (2005).

Muestra D:

Tabla 3.14. Abertura y porcentaje que pasa en cada tamiz, muestra D.

Tamiz	Abertura	Porcentaje que pasa
	mm	(%)
3"	76.2000	100.00
2"	50.8000	100.00
1 1/2"	38.1000	100.00
1"	25.4000	99.00
3/4"	19.0500	98.50
3/8"	9.5250	98.40
N°4	4.7500	98.30
N°10	2.0000	98.20
N°20	0.8500	98.10
N°40	0.4250	98.00
N°60	0.2500	97.50
N°140	0.1060	80.50
N°200	0.0750	68.90
	0.0630	60.00
	0.0350	30.00
	0.0230	20.00
	0.0090	10.00

Para una mejor visualización, en la figura 3.7 se muestra la curva granulométrica en base a los puntos de la tabla 3.14.

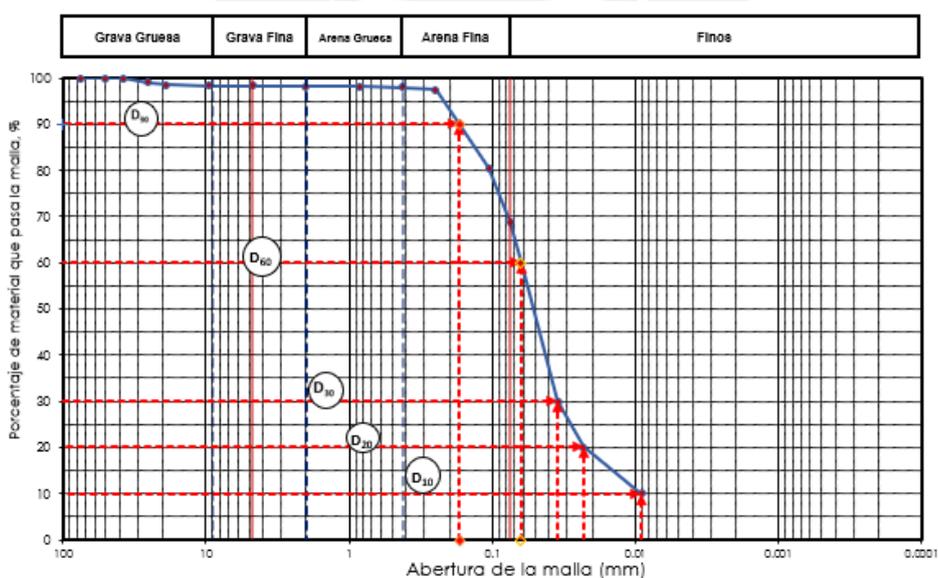


Figura 3.7. Curva Granulométrica de la muestra D.

Tabla 3.15. Resumen de los diámetros que pasan por cada porcentaje, además del diámetro de la malla 200.

D90	0.170
D60	0.063
D30	0.035
D20	0.023
D10	0.009
P200	68.900

Tabla 3.16. Parámetros obtenidos para el modelo de predicción de Perera.

af	1.000
a	-170.430
D100	0.237
bf	5.761
b	10.215
D0	0.005
cf	0.491
c	0.805
ψ_r	100.000

Tabla 3.17. Resultados que relacionan la succión con el contenido volumétrico de agua

Succión (ψ)	θ_s	$C_{(h)}$	θ_w
kPa	-		m ³ /m ³
0.10	0.390	1.000	0.3900
0.11	0.390	1.000	0.3900
0.12	0.390	1.000	0.3899
0.13	0.390	1.000	0.3899
0.14	0.390	1.000	0.3899
0.15	0.390	1.000	0.3899
0.16	0.390	1.000	0.3899
0.17	0.390	1.000	0.3899
0.18	0.390	1.000	0.3899
0.20	0.390	1.000	0.3899
0.22	0.390	1.000	0.3899
0.24	0.390	1.000	0.3899
0.25	0.390	1.000	0.3899
0.27	0.390	1.000	0.3898
0.29	0.390	1.000	0.3898

0.32	0.390	1.000	0.3898
0.35	0.390	1.000	0.3897
0.38	0.390	1.000	0.3896
0.44	0.390	1.000	0.3892
0.29	0.390	1.000	0.3898
0.34	0.390	1.000	0.3897
0.39	0.390	1.000	0.3895
0.49	0.390	0.999	0.3886
0.59	0.390	0.999	0.3865
0.69	0.390	0.999	0.3821
0.78	0.390	0.999	0.3740
0.88	0.390	0.999	0.3615
0.98	0.390	0.999	0.3446
1.27	0.390	0.999	0.2833
1.57	0.390	0.998	0.2357
1.86	0.390	0.998	0.2059
2.45	0.390	0.997	0.1734
2.94	0.390	0.997	0.1584
3.92	0.390	0.996	0.1410
4.41	0.390	0.995	0.1353
4.90	0.390	0.995	0.1307
5.88	0.390	0.994	0.1238
6.86	0.390	0.993	0.1187
7.85	0.390	0.992	0.1148
8.83	0.390	0.991	0.1116
9.81	0.390	0.990	0.1089
14.71	0.390	0.985	0.1000
19.61	0.390	0.981	0.0947
29.42	0.390	0.972	0.0882
39.23	0.390	0.964	0.0840
49.03	0.390	0.957	0.0810
98.06	0.390	0.926	0.0723
196.13	0.390	0.882	0.0643
294.19	0.390	0.851	0.0598
392.26	0.390	0.827	0.0567
490.32	0.390	0.807	0.0544
980.64	0.390	0.742	0.0474
1961.28	0.390	0.671	0.0410
4903.20	0.390	0.575	0.0332
9806.40	0.390	0.501	0.0278
49032.00	0.390	0.327	0.0168
98064.00	0.390	0.252	0.0125
490320.00	0.390	0.077	0.0036
980640.00	0.390	0.002	0.0001

Para una mejor visualización, se graficó los resultados mostrados en la tabla 3.17, ver figura 3.8.

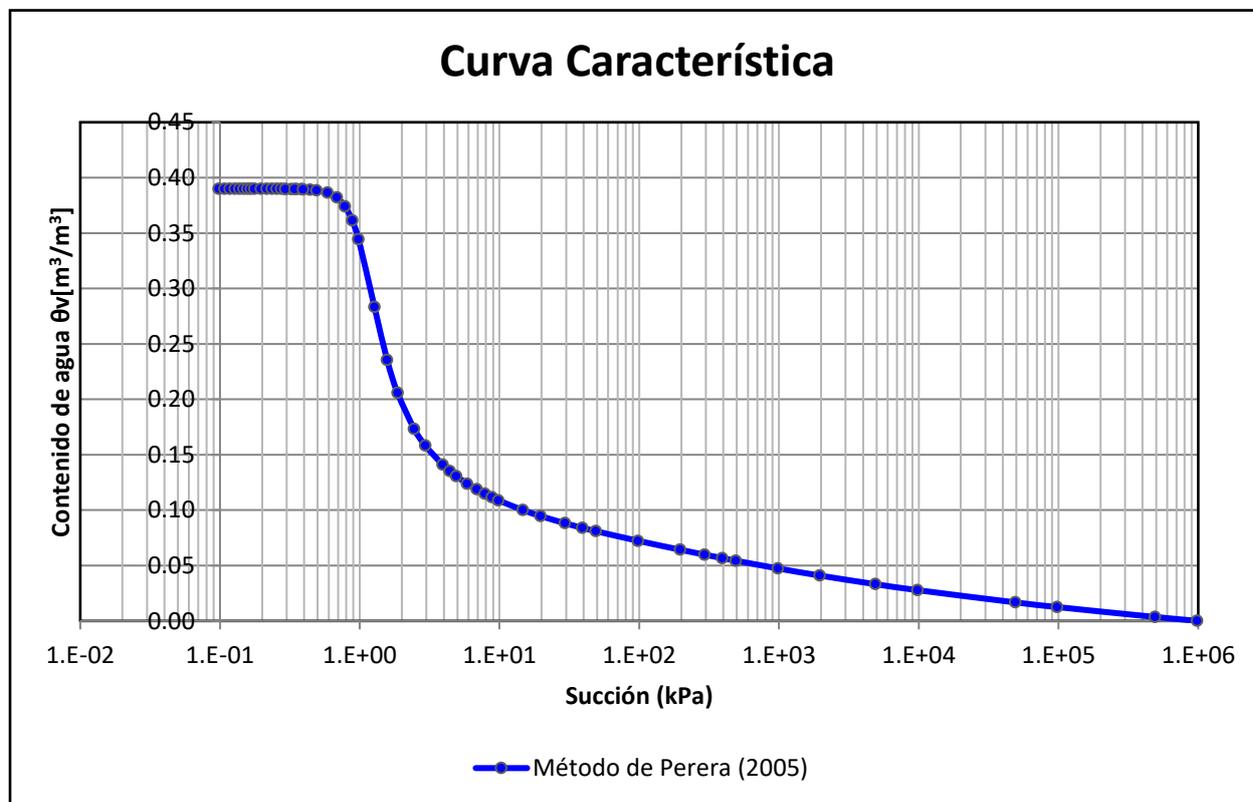


Figura 3.8. Curva característica suelo-agua, muestra D, por el modelo de Perera (2005).

Modelo de Modificado de Kovacs (2003)

Muestra A:

$$D_{10}(cm) = 0.0225$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{7.9}{0.225} = 35.111$$

$$Y_{d\ max} = 1.336 = \frac{G_s}{1 + e(\text{mín})} = \frac{2.61}{1 + e} \rightarrow e = 1.089$$

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log(C_u) + 1}$$

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log(35.111) + 1} = 0.267$$

$$h_{coG} = \frac{b(cm^2)}{eD_{10}(cm)}$$

$$h_{coG}(cm) = \frac{0.267}{1.089 * 0.0225} = 12.46$$

$$n = \frac{1.089}{1 + 1.089} = 0.488$$

$$D_H = \frac{[1 + 1.17 \log(C_u)]}{D_{10}}$$

$$D_H = \frac{[1 + 1.17 \log(35.111)]}{0.225} = 0.0632$$

La ecuación 12.1 corresponde a los suelos granulares

$$\psi_r = \frac{0.42}{(eD_H)^{1.26}}$$

$$\psi_r = \frac{0.42}{(0.95 * 0.0632)^{1.26}} = 14.48$$

$$\psi_0(KPa) = 10^6 KPa$$

$$\psi_n = 1cm = 10^{-3} atm$$

$$a_c = 0.01 \text{ (aproximación dada)}$$

$$m = \frac{1}{Cu} = \frac{1}{35.11} = 0.028$$

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right]$$

$$\text{Componente Capilar } (S_c) = 1 - \left[\left(\frac{12.46}{\psi(cm)} \right)^2 + 1 \right]^{0.028} \exp \left[-0.028 \left(\frac{12.46}{\psi(cm)} \right)^2 \right]$$

A su vez la variable C_ψ es obtenida del modelo de Fredlund & Xing (1994) y se calcula como se muestra:

$$C_\psi = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r})} \right]$$

$$C_\psi = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{14.48})}{\ln(1 + \frac{10^7(cm)}{14.48(cm)})} \right]$$

$$S_a = a_c C_\psi * \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n} \right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\psi}{\psi_n} \right)^{\frac{1}{6}}}$$

$$S_a = 0.01 * C_\psi * \frac{\left(\frac{12.46}{1} \right)^{\frac{2}{3}}}{e^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\psi}{1} \right)^{\frac{1}{6}}}$$

En la ecuación el termino S_a^* es reemplazado por S_a , la cual fue usado en el modelo original. Este cambio es para garantizar que la componente de adhesión no exceda a la unidad ($0 \leq S_a^* \leq 1$). Esta componente es expresada en la ecuación 9.

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle = 1 - 0.5(1 - S_a + |1 - S_a|)$$

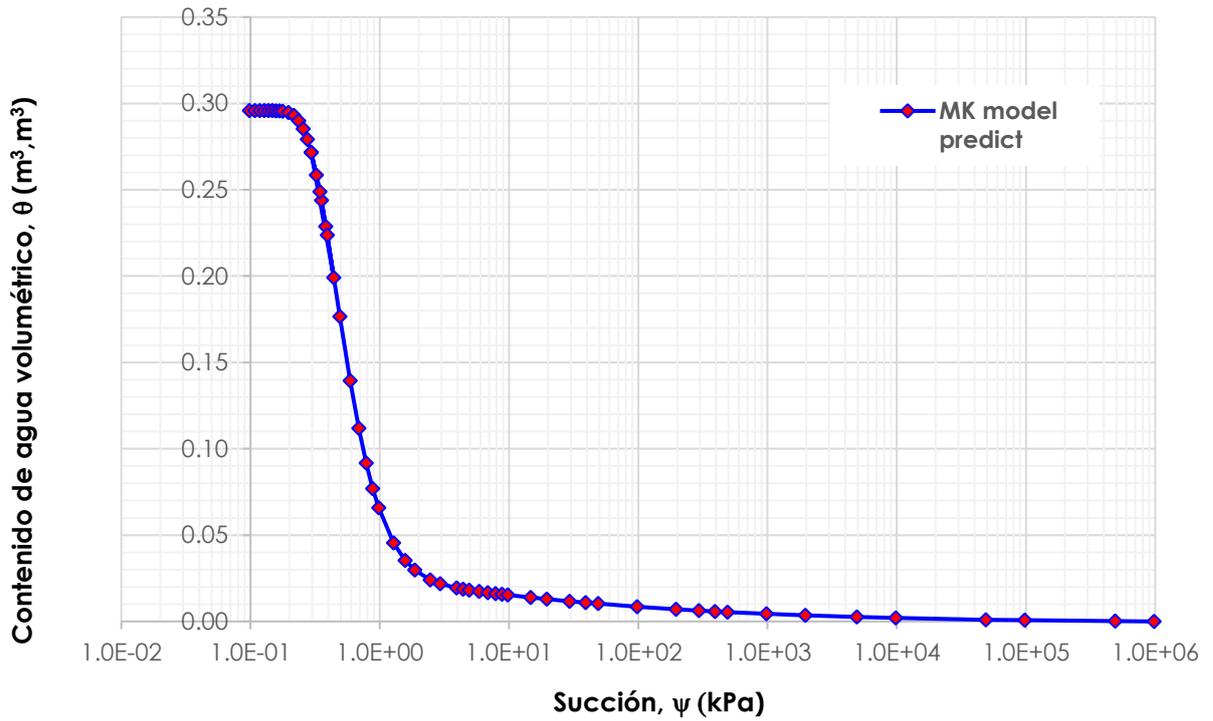
$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c)$$

$$S_r = S_c + S_a^*(1 - S_c)$$

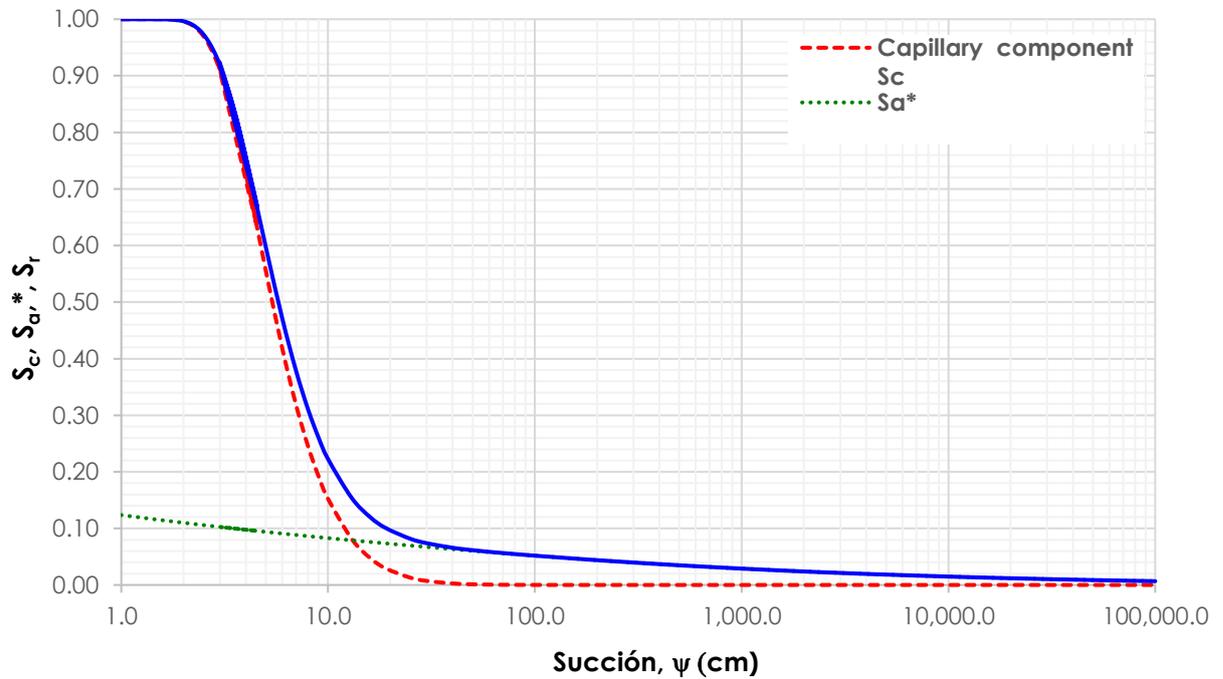
$$S_r = \frac{\theta}{n} \rightarrow \theta = S_r * n$$

Succión Y (cm)	Componente capilar S_c	C_Y	Componente de adhesión S_a	S_a^*	Grado de saturación S_r	Modelo de predicción MK q	Succión Y kPa
1	0.986083840	0.995	0.054	0.054	0.987	0.4815	9.8E-02
2	0.632020921	0.990	0.048	0.048	0.650	0.3171	2.0E-01
4	0.188331014	0.982	0.043	0.043	0.223	0.1088	3.9E-01
10	0.017356598	0.961	0.036	0.036	0.052	0.0256	9.8E-01
20	0.001710088	0.935	0.031	0.031	0.033	0.0159	2.0E+00
50	0.000052670	0.889	0.025	0.025	0.025	0.0124	4.9E+00
60	0.000025710	0.878	0.024	0.024	0.024	0.0118	5.9E+00
100	0.000003392	0.846	0.021	0.021	0.021	0.0105	9.8E+00
141	0.000000863	0.823	0.020	0.020	0.020	0.0096	1.4E+01
281	0.000000055	0.776	0.017	0.017	0.017	0.0081	2.8E+01
422	0.000000011	0.747	0.015	0.015	0.015	0.0073	4.1E+01
563	0.000000003	0.726	0.014	0.014	0.014	0.0067	5.5E+01
703	0.000000001	0.710	0.013	0.013	0.013	0.0063	6.9E+01
844	0.000000001	0.696	0.012	0.012	0.012	0.0060	8.3E+01
984	0.000000000	0.685	0.012	0.012	0.012	0.0058	9.6E+01
1,125	0.000000000	0.675	0.011	0.011	0.011	0.0056	1.1E+02
1,266	0.000000000	0.667	0.011	0.011	0.011	0.0054	1.2E+02
1,406	0.000000000	0.659	0.011	0.011	0.011	0.0052	1.4E+02
1,688	0.000000000	0.645	0.010	0.010	0.010	0.0050	1.7E+02
2,110	0.000000000	0.629	0.010	0.010	0.010	0.0047	2.1E+02
10,000	0.000000000	0.514	0.006	0.006	0.006	0.0029	9.8E+02
10,000,000	0.000000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	9.8E+05

Curva característica (Aubertin et al., 2003).



Curvas de succión (Aubertin et al., 2003).

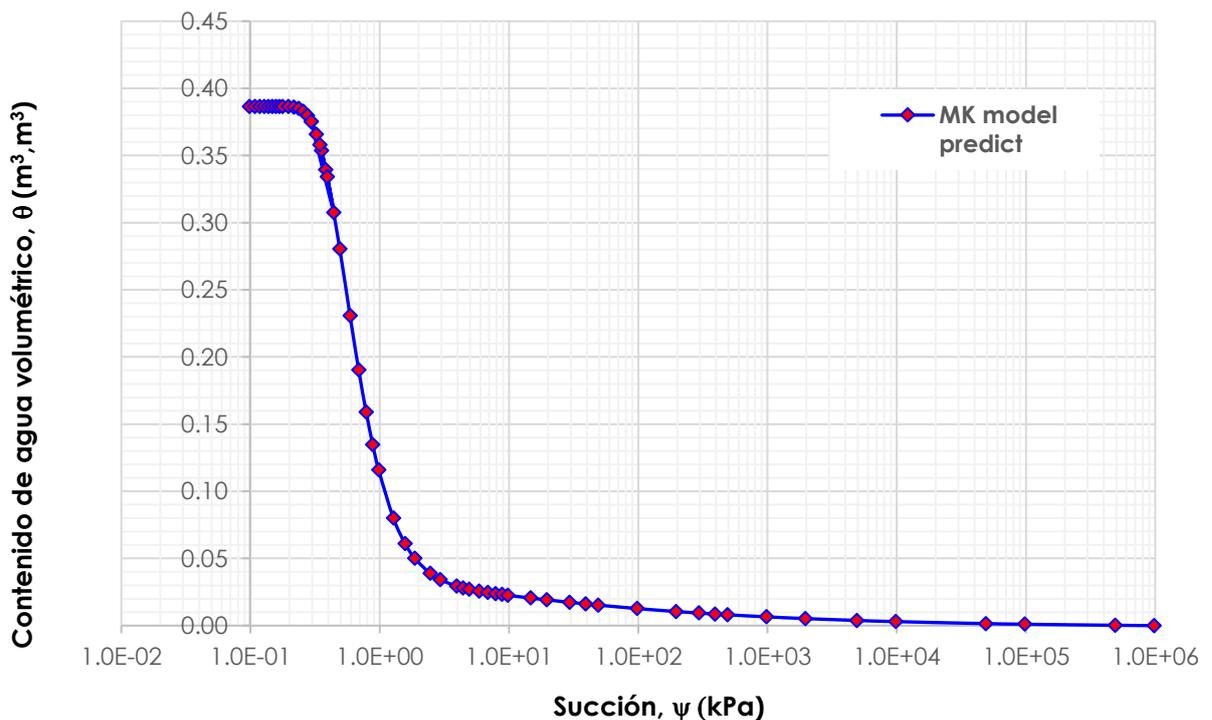


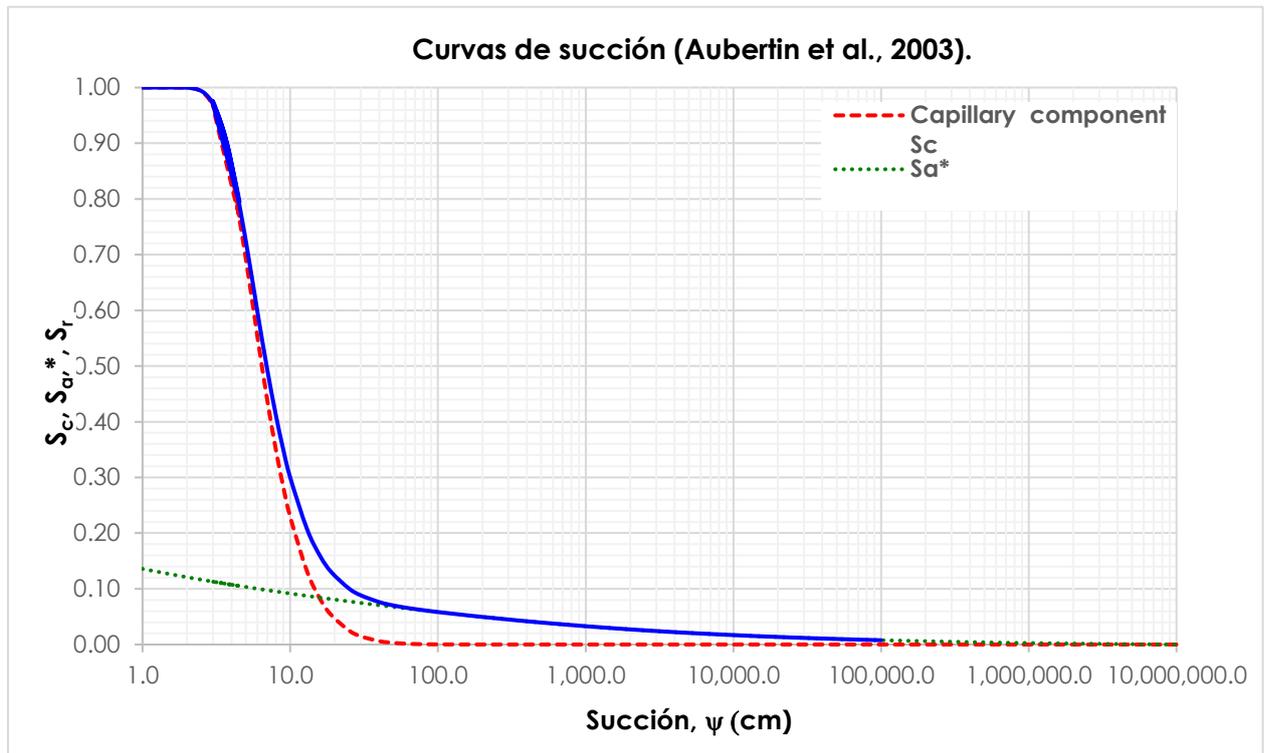
Muestra B:

Succión Y (cm)	Componente capilar S _c	C _Y	Componente de adhesión S _a	S _a *	Grado de saturación S _r	Modelo de predicción MK q	Succión Y kPa
1.0	1.000000000	0.999	0.136	0.136	1.000	0.3865	9.8E-02
1.1	1.000000000	0.999	0.134	0.134	1.000	0.3865	1.1E-01
1.2	1.000000000	0.998	0.132	0.132	1.000	0.3865	1.2E-01
1.3	0.999999992	0.998	0.130	0.130	1.000	0.3865	1.3E-01
1.4	0.999999890	0.998	0.128	0.128	1.000	0.3865	1.4E-01
1.5	0.999999120	0.998	0.127	0.127	1.000	0.3865	1.5E-01
1.6	0.999995174	0.998	0.126	0.126	1.000	0.3865	1.6E-01
1.7	0.999980233	0.998	0.124	0.124	1.000	0.3865	1.7E-01
1.8	0.999935581	0.998	0.123	0.123	1.000	0.3865	1.8E-01
2.0	0.999589149	0.997	0.121	0.121	1.000	0.3864	2.0E-01
2.2	0.998382855	0.997	0.119	0.119	0.999	0.3860	2.2E-01
2.4	0.995417586	0.997	0.117	0.117	0.996	0.3849	2.4E-01
2.6	0.989698197	0.997	0.116	0.116	0.991	0.3830	2.5E-01
2.8	0.980416575	0.996	0.114	0.114	0.983	0.3798	2.7E-01
3.0	0.967130453	0.996	0.113	0.113	0.971	0.3752	2.9E-01
3.3	0.939694458	0.996	0.111	0.111	0.946	0.3658	3.2E-01
3.6	0.904375193	0.995	0.109	0.109	0.915	0.3536	3.5E-01
3.9	0.863172510	0.995	0.108	0.108	0.878	0.3393	3.8E-01
4.5	0.771564418	0.994	0.105	0.105	0.796	0.3075	4.4E-01
3.0	0.967130453	0.996	0.113	0.113	0.971	0.3752	2.9E-01
3.5	0.916909690	0.995	0.110	0.110	0.926	0.3579	3.4E-01
4.0	0.848510221	0.995	0.107	0.107	0.865	0.3342	3.9E-01
5.0	0.693802684	0.994	0.103	0.103	0.725	0.2804	4.9E-01
6.0	0.552297739	0.992	0.100	0.100	0.597	0.2308	5.9E-01
7.0	0.437996750	0.991	0.097	0.097	0.493	0.1905	6.9E-01
8.0	0.349443767	0.990	0.095	0.095	0.411	0.1590	7.8E-01
9.0	0.281492141	0.989	0.093	0.093	0.349	0.1347	8.8E-01
10.0	0.229162631	0.988	0.092	0.092	0.300	0.1158	9.8E-01
13.0	0.131215168	0.984	0.087	0.087	0.207	0.0800	1.3E+00
16.0	0.080848057	0.981	0.084	0.084	0.158	0.0611	1.6E+00
19.0	0.052642621	0.978	0.081	0.081	0.130	0.0502	1.9E+00
25.0	0.025123042	0.972	0.077	0.077	0.101	0.0388	2.5E+00
30.0	0.014790790	0.967	0.075	0.075	0.088	0.0341	2.9E+00
40.0	0.006022675	0.959	0.071	0.071	0.076	0.0294	3.9E+00
45.0	0.004081608	0.955	0.069	0.069	0.073	0.0281	4.4E+00
50.0	0.002854293	0.951	0.067	0.067	0.070	0.0271	4.9E+00
60.0	0.001507259	0.944	0.065	0.065	0.066	0.0256	5.9E+00

70.0	0.000863668	0.937	0.063	0.063	0.064	0.0246	6.9E+00
80.0	0.000527536	0.931	0.061	0.061	0.062	0.0238	7.8E+00
90.0	0.000339173	0.926	0.059	0.059	0.060	0.0231	8.8E+00
100.0	0.000227413	0.920	0.058	0.058	0.058	0.0225	9.8E+00
150.0	0.000047403	0.898	0.053	0.053	0.053	0.0205	1.5E+01
200.0	0.000015297	0.880	0.050	0.050	0.050	0.0191	2.0E+01
300.0	0.000003065	0.853	0.045	0.045	0.045	0.0173	2.9E+01
400.0	0.000000975	0.833	0.042	0.042	0.042	0.0161	3.9E+01
500.0	0.000000400	0.817	0.039	0.039	0.039	0.0152	4.9E+01
1,000.0	0.000000025	0.764	0.033	0.033	0.033	0.0127	9.8E+01
2,000.0	0.000000002	0.708	0.027	0.027	0.027	0.0105	2.0E+02
3,000.0	0.000000000	0.675	0.024	0.024	0.024	0.0094	2.9E+02
4,000.0	0.000000000	0.652	0.022	0.022	0.022	0.0086	3.9E+02
5,000.0	0.000000000	0.633	0.021	0.021	0.021	0.0081	4.9E+02
10,000.0	0.000000000	0.576	0.017	0.017	0.017	0.0065	9.8E+02
20,000.0	0.000000000	0.518	0.014	0.014	0.014	0.0052	2.0E+03
50,000.0	0.000000000	0.442	0.010	0.010	0.010	0.0038	4.9E+03
100,000.0	0.000000000	0.384	0.008	0.008	0.008	0.0030	9.8E+03
500,000.0	0.000000000	0.250	0.004	0.004	0.004	0.0015	4.9E+04
1,000,000.0	0.000000000	0.192	0.003	0.003	0.003	0.0010	9.8E+04
5,000,000.0	0.000000000	0.058	0.001	0.001	0.001	0.0002	4.9E+05
10,000,000.0	0.000000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	9.8E+05

Curva característica (Aubertin et al., 2003).



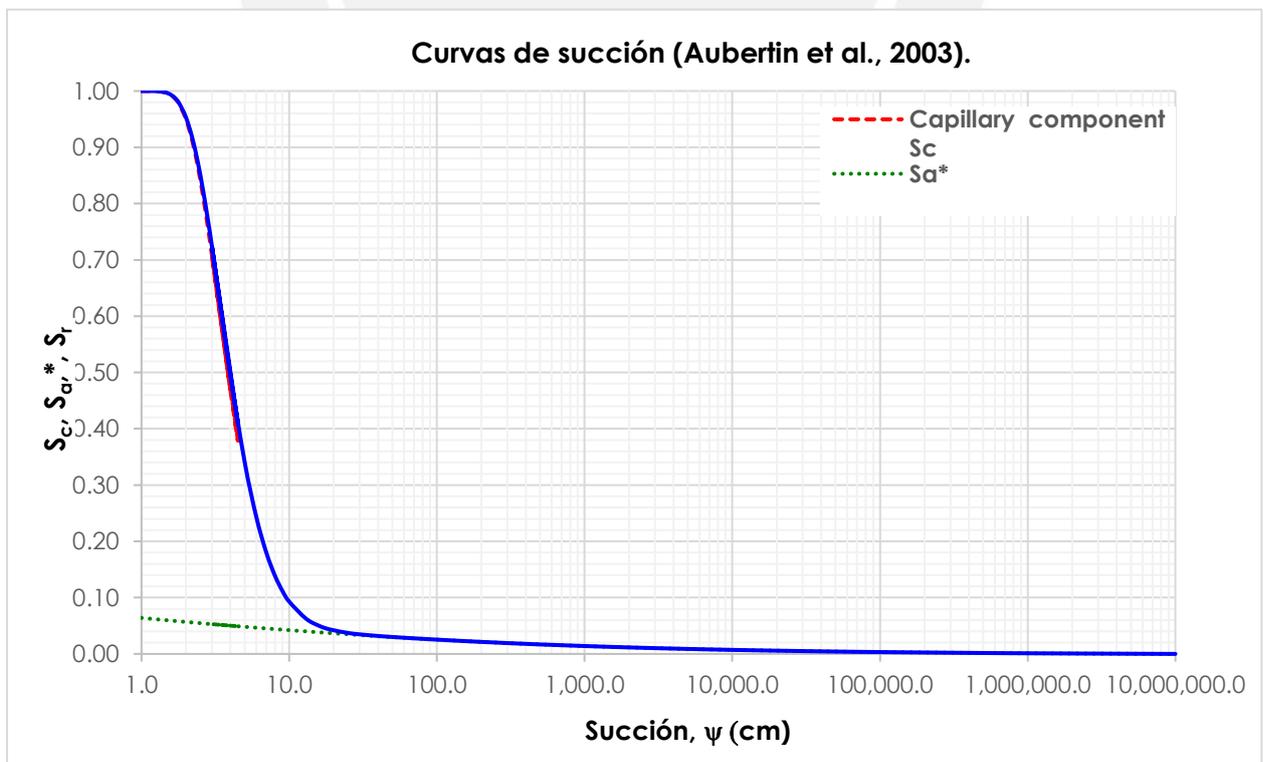
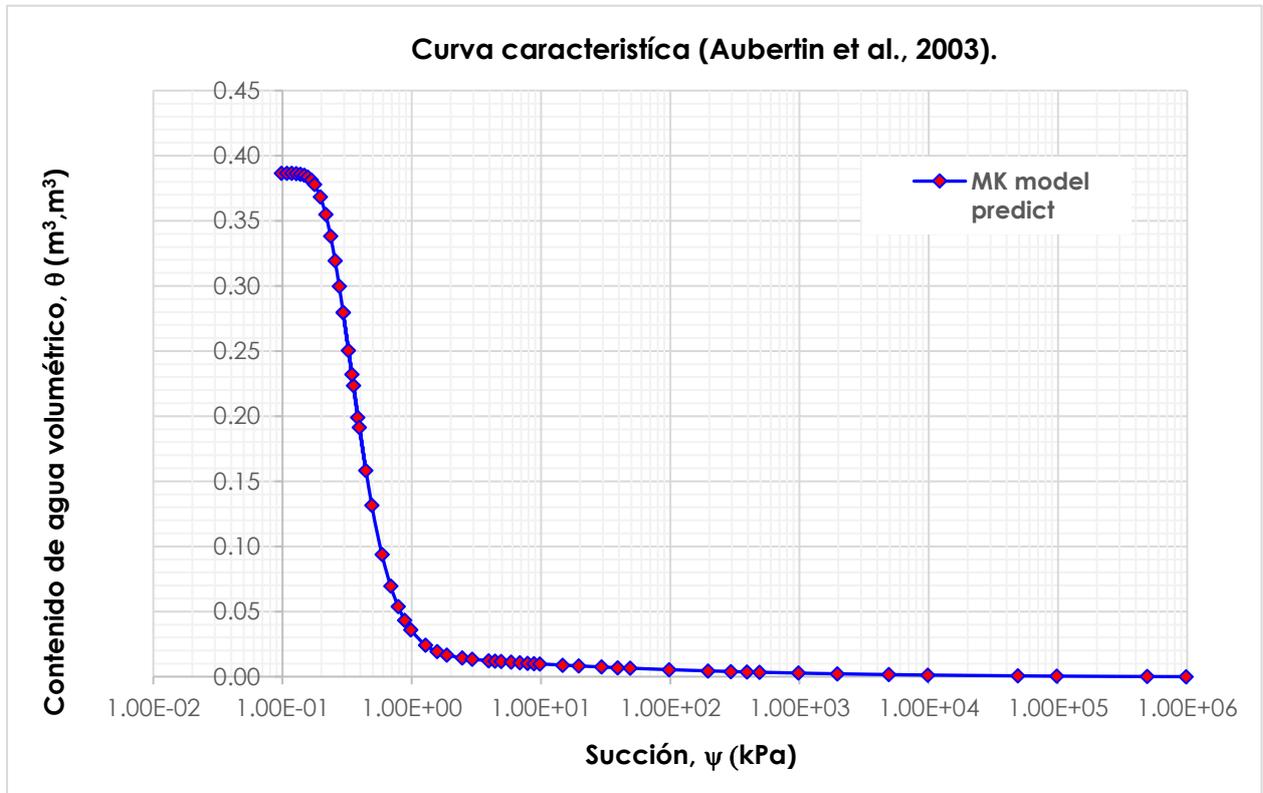


Muestra C:

Succión Y (cm)	Componente capilar S_c	C_Y	Componente de adhesión S_a	S_a^*	Grado de saturación S_r	Modelo de predicción MK q	Succión Y kPa
1.0	0.999997201	0.995	0.064	0.064	1.000	0.3865	9.81E-02
1.1	0.999972795	0.995	0.063	0.063	1.000	0.3865	1.08E-01
1.2	0.999846935	0.994	0.062	0.062	1.000	0.3864	1.18E-01
1.3	0.999413990	0.994	0.061	0.061	0.999	0.3863	1.27E-01
1.4	0.998302497	0.993	0.060	0.060	0.998	0.3859	1.37E-01
1.5	0.996002044	0.993	0.060	0.060	0.996	0.3851	1.47E-01
1.6	0.991950323	0.993	0.059	0.059	0.992	0.3836	1.57E-01
1.7	0.985638361	0.992	0.058	0.058	0.986	0.3813	1.67E-01
1.8	0.976693252	0.992	0.058	0.058	0.978	0.3780	1.77E-01
2.0	0.950301006	0.991	0.057	0.057	0.953	0.3684	1.96E-01
2.2	0.913195854	0.990	0.056	0.056	0.918	0.3548	2.16E-01
2.4	0.867623413	0.989	0.055	0.055	0.875	0.3382	2.35E-01
2.6	0.816493291	0.988	0.054	0.054	0.826	0.3194	2.55E-01
2.8	0.762573311	0.987	0.054	0.054	0.775	0.2996	2.75E-01

3.0	0.708114312	0.987	0.053	0.053	0.724	0.2797	2.94E-01
3.3	0.628869187	0.985	0.052	0.052	0.648	0.2505	3.24E-01
3.6	0.555376883	0.984	0.051	0.051	0.578	0.2234	3.53E-01
3.9	0.489106052	0.983	0.050	0.050	0.515	0.1990	3.82E-01
4.5	0.378818862	0.981	0.049	0.049	0.409	0.1582	4.41E-01
3.0	0.708114312	0.987	0.053	0.053	0.724	0.2797	2.94E-01
3.5	0.579114140	0.985	0.051	0.051	0.601	0.2322	3.43E-01
4.0	0.468695316	0.983	0.050	0.050	0.495	0.1915	3.92E-01
5.0	0.307180116	0.979	0.048	0.048	0.341	0.1316	4.90E-01
6.0	0.205535245	0.975	0.047	0.047	0.243	0.0937	5.88E-01
7.0	0.141237120	0.972	0.045	0.045	0.180	0.0696	6.86E-01
8.0	0.099596000	0.968	0.044	0.044	0.139	0.0538	7.85E-01
9.0	0.071899146	0.965	0.043	0.043	0.112	0.0432	8.83E-01
10.0	0.053001162	0.962	0.042	0.042	0.093	0.0359	9.81E-01
13.0	0.023554382	0.954	0.040	0.040	0.063	0.0242	1.27E+00
16.0	0.011826107	0.946	0.038	0.038	0.050	0.0192	1.57E+00
19.0	0.006508066	0.939	0.037	0.037	0.043	0.0167	1.86E+00
25.0	0.002406471	0.927	0.035	0.035	0.037	0.0144	2.45E+00
30.0	0.001215965	0.919	0.034	0.034	0.035	0.0134	2.94E+00
40.0	0.000404038	0.904	0.031	0.031	0.032	0.0123	3.92E+00
45.0	0.000255715	0.897	0.031	0.031	0.031	0.0119	4.41E+00
50.0	0.000169447	0.891	0.030	0.030	0.030	0.0116	4.90E+00
60.0	0.000082794	0.881	0.029	0.029	0.029	0.0111	5.88E+00
70.0	0.000045049	0.871	0.028	0.028	0.028	0.0107	6.86E+00
80.0	0.000026545	0.863	0.027	0.027	0.027	0.0103	7.85E+00
90.0	0.000016632	0.856	0.026	0.026	0.026	0.0101	8.83E+00
100.0	0.000010940	0.849	0.025	0.025	0.025	0.0098	9.81E+00
150.0	0.000002174	0.822	0.023	0.023	0.023	0.0089	1.47E+01
200.0	0.000000689	0.802	0.021	0.021	0.021	0.0082	1.96E+01
300.0	0.000000136	0.774	0.019	0.019	0.019	0.0074	2.94E+01
400.0	0.000000043	0.753	0.018	0.018	0.018	0.0069	3.92E+01
500.0	0.000000018	0.737	0.017	0.017	0.017	0.0065	4.90E+01
1,000.0	0.000000001	0.686	0.014	0.014	0.014	0.0054	9.81E+01
2,000.0	0.000000000	0.635	0.012	0.012	0.012	0.0044	1.96E+02
3,000.0	0.000000000	0.605	0.010	0.010	0.010	0.0040	2.94E+02
4,000.0	0.000000000	0.584	0.009	0.009	0.009	0.0036	3.92E+02
5,000.0	0.000000000	0.567	0.009	0.009	0.009	0.0034	4.90E+02
10,000.0	0.000000000	0.516	0.007	0.007	0.007	0.0028	9.81E+02
20,000.0	0.000000000	0.464	0.006	0.006	0.006	0.0022	1.96E+03
50,000.0	0.000000000	0.395	0.004	0.004	0.004	0.0016	4.90E+03
100,000.0	0.000000000	0.344	0.003	0.003	0.003	0.0013	9.81E+03
500,000.0	0.000000000	0.224	0.002	0.002	0.002	0.0006	4.90E+04
1,000,000.0	0.000000000	0.172	0.001	0.001	0.001	0.0004	9.81E+04
5,000,000.0	0.000000000	0.052	0.000	0.000	0.000	0.0001	4.90E+05

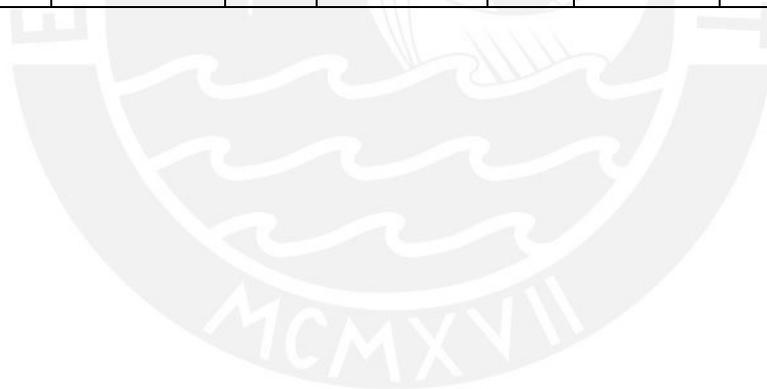
10,000,000.0	0.000000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	9.81E+05
--------------	-------------	-------	-------	-------	-------	--------	----------



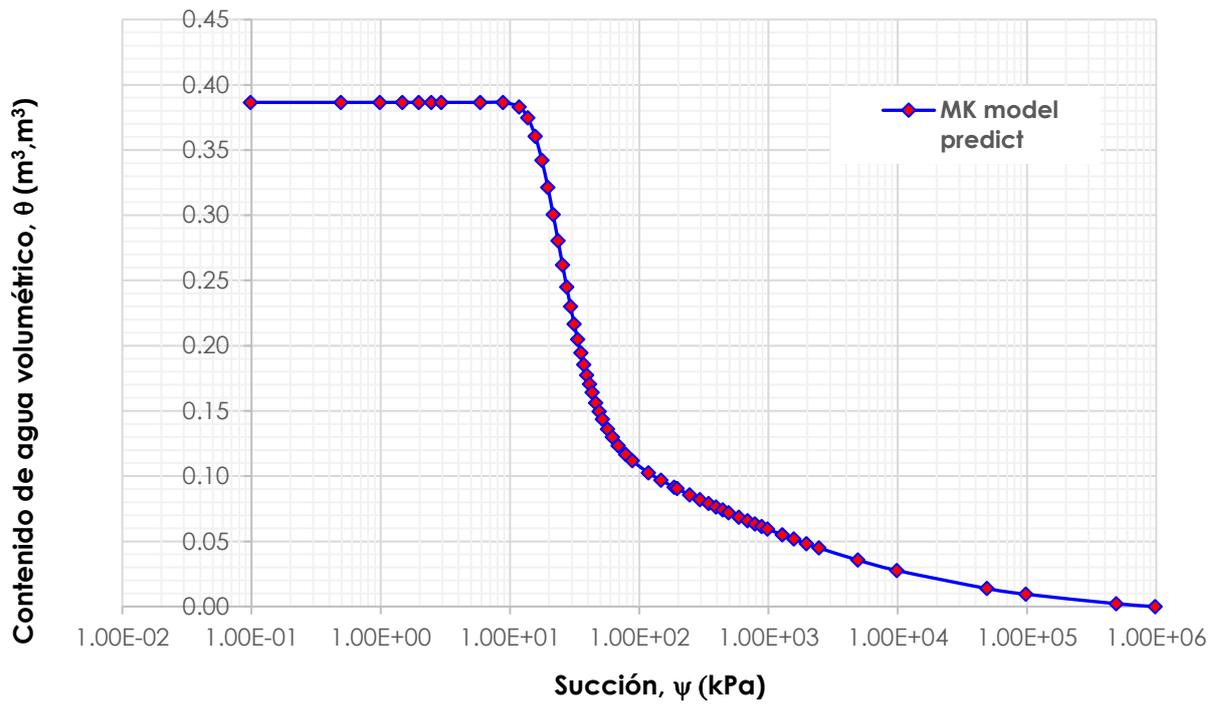
Muestra D:

Succión Y (cm)	Componente capilar S _c	C _Y	Componente de adhesión S _a	S _a *	Grado de saturación S _r	Modelo de predicción MK q	Succión Y kPa
1.0	1.000000000	1.000	0.896	0.896	1.000	0.3865	9.81E-02
5.0	1.000000000	1.000	0.685	0.685	1.000	0.3865	4.90E-01
10.0	1.000000000	0.999	0.610	0.610	1.000	0.3865	9.81E-01
15.0	1.000000000	0.999	0.570	0.570	1.000	0.3865	1.47E+00
20.0	1.000000000	0.999	0.543	0.543	1.000	0.3865	1.96E+00
25.0	1.000000000	0.999	0.523	0.523	1.000	0.3865	2.45E+00
30.0	1.000000000	0.998	0.508	0.508	1.000	0.3865	2.94E+00
60.0	0.999999987	0.997	0.452	0.452	1.000	0.3865	5.88E+00
90.0	0.999587706	0.995	0.421	0.421	1.000	0.3864	8.83E+00
120.0	0.985048491	0.994	0.401	0.401	0.991	0.3830	1.18E+01
140.0	0.949909507	0.993	0.390	0.390	0.969	0.3747	1.37E+01
160.0	0.891222910	0.992	0.381	0.381	0.933	0.3605	1.57E+01
180.0	0.816189087	0.991	0.374	0.374	0.885	0.3420	1.77E+01
200.0	0.733962271	0.990	0.367	0.367	0.832	0.3214	1.96E+01
220.0	0.651792206	0.989	0.361	0.361	0.777	0.3005	2.16E+01
240.0	0.574203516	0.988	0.355	0.355	0.725	0.2804	2.35E+01
260.0	0.503491501	0.987	0.350	0.350	0.677	0.2618	2.55E+01
280.0	0.440468279	0.986	0.345	0.345	0.634	0.2450	2.75E+01
300.0	0.385076355	0.985	0.341	0.341	0.595	0.2299	2.94E+01
320.0	0.336804965	0.984	0.337	0.337	0.560	0.2166	3.14E+01
340.0	0.294945479	0.983	0.333	0.333	0.530	0.2049	3.33E+01
360.0	0.258737078	0.982	0.330	0.330	0.503	0.1946	3.53E+01
380.0	0.227443920	0.981	0.327	0.327	0.480	0.1855	3.73E+01
400.0	0.200391817	0.980	0.324	0.324	0.459	0.1775	3.92E+01
420.0	0.176982043	0.979	0.321	0.321	0.441	0.1704	4.12E+01
440.0	0.156692858	0.978	0.318	0.318	0.425	0.1642	4.31E+01
470.0	0.131145218	0.977	0.314	0.314	0.404	0.1562	4.61E+01
500.0	0.110372621	0.976	0.310	0.310	0.387	0.1494	4.90E+01
530.0	0.093393669	0.974	0.307	0.307	0.372	0.1437	5.20E+01
580.0	0.071516515	0.972	0.302	0.302	0.352	0.1359	5.69E+01
630.0	0.055509962	0.970	0.297	0.297	0.336	0.1299	6.18E+01
700.0	0.039752754	0.967	0.291	0.291	0.319	0.1234	6.86E+01
800.0	0.025615633	0.963	0.283	0.283	0.302	0.1166	7.85E+01
900.0	0.017149225	0.959	0.277	0.277	0.289	0.1118	8.83E+01
1,200.0	0.006155794	0.948	0.261	0.261	0.265	0.1026	1.18E+02
1,500.0	0.002688422	0.938	0.249	0.249	0.251	0.0969	1.47E+02
1,900.0	0.001092881	0.926	0.236	0.236	0.237	0.0915	1.86E+02

2,000.0	0.000896887	0.923	0.233	0.233	0.234	0.0904	1.96E+02
2,500.0	0.000376865	0.910	0.221	0.221	0.222	0.0857	2.45E+02
3,000.0	0.000184337	0.898	0.212	0.212	0.212	0.0820	2.94E+02
3,500.0	0.000100364	0.887	0.204	0.204	0.204	0.0789	3.43E+02
4,000.0	0.000059165	0.877	0.197	0.197	0.197	0.0763	3.92E+02
4,500.0	0.000037081	0.868	0.191	0.191	0.192	0.0740	4.41E+02
5,000.0	0.000024397	0.860	0.186	0.186	0.186	0.0720	4.90E+02
6,000.0	0.000011809	0.844	0.177	0.177	0.177	0.0686	5.88E+02
7,000.0	0.000006388	0.830	0.170	0.170	0.170	0.0658	6.86E+02
8,000.0	0.000003750	0.818	0.164	0.164	0.164	0.0634	7.85E+02
9,000.0	0.000002343	0.807	0.159	0.159	0.159	0.0613	8.83E+02
10,000.0	0.000001539	0.797	0.154	0.154	0.154	0.0595	9.81E+02
13,000.0	0.000000539	0.771	0.142	0.142	0.142	0.0551	1.27E+03
16,000.0	0.000000235	0.749	0.134	0.134	0.134	0.0517	1.57E+03
20,000.0	0.000000096	0.726	0.125	0.125	0.125	0.0483	1.96E+03
25,000.0	0.000000039	0.702	0.116	0.116	0.116	0.0450	2.45E+03
50,000.0	0.000000002	0.624	0.092	0.092	0.092	0.0356	4.90E+03
100,000.0	0.000000000	0.545	0.072	0.072	0.072	0.0277	9.81E+03
500,000.0	0.000000000	0.355	0.036	0.036	0.036	0.0138	4.90E+04
1,000,000.0	0.000000000	0.273	0.024	0.024	0.024	0.0095	9.81E+04
5,000,000.0	0.000000000	0.082	0.006	0.006	0.006	0.0022	4.90E+05
10,000,000.0	0.000000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	9.81E+05



Curva característica (Aubertin et al., 2003).



Curvas de succión (Aubertin et al., 2003).

