

---

---

# SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA

## UNSATURATED SOILS, FROM RESEARCH TO THE UNIVERSITY LECTURE

---

---

*Victoria Elena Meza Ochoa*

*Magíster en Geotecnia, Docente auxiliar Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid,*

Recibido para evaluación: 23 de Noviembre de 2011 / Aceptación: 23 de Mayo de 2012 / Recibida versión final: 18 de Junio de 2012

### RESUMEN

El estudio de la Mecánica de Suelos “Parcialmente Saturados” o suelos “No Saturados”, se inició en la década de los 70s, donde se desarrollaron las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales. Sin embargo, estos conceptos y teorías no han sido implementados en la práctica profesional y no hacen parte de las áreas de formación en los programas de ingeniería civil y afines. En este artículo se presentan los conceptos introductorios a la mecánica de suelos parcialmente saturados, desde el desarrollo de un marco teórico apropiado para el comportamiento del suelo en la condición de “no saturado”, que incluye las variables de estado de esfuerzos y la ecuación constitutiva de resistencia al corte, hasta algunos métodos para medición de la succión. La presentación de estos conceptos básicos en el aula universitaria es un aporte importante para lograr su implementación y pasar de la teoría a la práctica.

**PALABRAS CLAVE:** suelos parcialmente saturados, suelos no saturados, succión, curva característica.

### ABSTRACT

The study of the “partially saturated” or “unsaturated” soil mechanics, began in the 70s, where some of the fundamental concepts and theories were formulated. At the present time, these concepts and theories have not been implemented in practice and much less as part of the training in civil engineering programs and related areas. This article presents the introductory concepts of partially saturated soil mechanics, from the development of an appropriate theoretical framework for the soil behavior in the condition of “unsaturated”, including stress state variables and the shear strength equation, and the methods for measurement of soil suction. The presentation of these basic concepts in the university classroom is an important contribution to achieve its implementation and to move from theory to practice.

**KEYWORDS:** partially saturated soils, unsaturated soils, suction, characteristic curve.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cátedra Mecánica de Suelos, impartida en las universidades e institutos de educación superior, tanto en Colombia como a nivel mundial, se desarrolla teniendo en cuenta la llamada “mecánica de suelos clásica”, nacida como ciencia en 1925, cuando Karl Terzaghi publicó el tratado *Erdbaumechanik*. En la mecánica de suelos clásica, se hace énfasis principalmente en el estudio de suelos que se han originado en ambientes sedimentarios (suelos cohesivos y suelos granulares), que se encuentran en estado seco o en estado saturado. Estas dos condiciones del suelo, son situaciones extremas, y en ambas condiciones, el suelo es considerado como un sistema donde solo interactúan dos fases. La condición de suelos saturados, se presenta en suelos situados por debajo del nivel de agua freática, donde las fases presentes son: sólida y líquida, es decir, que los espacios vacíos o poros del suelo están ocupados por agua. La condición

de suelo seco se presenta en suelos donde no existe el nivel de agua freática o en suelos por encima del nivel de agua, más allá de la franja capilar, donde las fases que interactúan son la sólida y la gaseosa, es decir, que los espacios vacíos del suelo están ocupados principalmente por aire y aunque puede existir agua en estado discontinuo, ésta no ejerce influencia en el comportamiento del suelo (Lambe y Whitman, 1991).

El departamento de Antioquia y gran parte del territorio Colombiano, se encuentran emplazados principalmente sobre suelos residuales, producto de la meteorización “in situ” de la roca, y sobre suelos de origen sedimentario, que en la mayoría de los casos se encuentran en estado de **saturación parcial**, es decir, que no se encuentran ni secos ni saturados. Esta condición de saturación parcial está ligada a variables ambientales como el clima, el régimen de lluvias, las tasas de evaporación y transpiración y las condiciones topográficas. A diferencia de los suelos secos o saturados, los suelos parcialmente saturados, están conformados mínimamente por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, es decir, que los espacios vacíos están ocupados por aire y por agua.

La existencia de tres fases en los suelos parcialmente saturados, implica que el estudio de las propiedades y comportamiento del suelo como material estructural, se haga teniendo en cuenta otros conceptos y teorías adicionales a los tradicionalmente impartidos en la cátedra Mecánica de Suelos. En la década de los 70s, se inicia el estudio del comportamiento de los suelos “parcialmente saturados”, con las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales. A la fecha, se han logrado avances significativos a nivel de investigación, en lo referente al comportamiento de cambio de volumen (deformación), resistencia, flujo de agua, y avances en técnicas para la medición y estimación de propiedades del suelo parcialmente saturado; sin embargo, en la práctica profesional continúan aplicándose los conceptos de la mecánica de suelos clásica.

Para pasar de la investigación a la aplicación práctica de la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados, falta un largo camino por recorrer. El primer paso de este camino, debe darse en el aula universitaria, dando a conocer los principios y conceptos básicos que rigen el comportamiento del suelo, cuando se encuentra parcialmente saturado.

En este artículo se presentan los conceptos introductorios a la mecánica de suelos parcialmente saturados, como parte de la reflexión que debe hacerse, en cuanto a la pertinencia y la importancia de incluirlos en la cátedra universitaria, y así aportar a la implementación de la teoría a la práctica y a la solución de problemas de la ingeniería geotécnica, relacionados con los suelos no saturados.

## **2. AVANCES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA MECÁNICA DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS.**

El estudio del suelo en estado de saturación parcial inicia en la década de los años 60s, como respuesta a la necesidad de entender el comportamiento de algunos suelos “problemas”, que en países como Estados Unidos y Canadá ocasionan al año pérdidas millonarias por afectación de las estructuras que se asientan sobre ellos. Los suelos expansivos o suelos activos, hacen parte de los llamados suelos “problemas”, y son suelos arcillosos que cambian de volumen debido a cambios en el contenido de humedad, originando la formación de fisuras y grietas en estructuras livianas como pavimentos, viviendas de 1 y 2 pisos, andenes, redes de servicio (alcantarillado y acueducto), etc.

El estudio del comportamiento de los suelos expansivos, requiere tener en cuenta la variabilidad en el estado de esfuerzos del suelo, puesto que el potencial expansivo del suelo no se desarrolla si el suelo se encuentra saturado, sino cuando se dan cambios en el contenido de humedad, y el suelo se encuentra en el rango de parcialmente saturado. La aplicación de la mecánica de suelos clásica no da respuesta a este fenómeno y por eso se originaron una serie de conferencias internacionales para ayudar a resolver los problemas de los suelos expansivos, como son las Conferencias Internacionales de Suelos Expansivos en Texas (1965 y 1969), Israel (1973), Denver (1980), Australia (1984), Nueva Delhi (1987), etc. Adicionalmente a los suelos expansivos, nace la necesidad de estudiar otras condiciones del suelo

en estado de saturación parcial, como la compactación de suelos, suelos colapsibles y suelos residuales.

La década de los 70s, se constituye como el período donde se desarrollan las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales del suelo parcialmente saturado (variables de estados y leyes constitutivas). Una vez establecida la base teórica, durante la década de los 80s se intenta dar solución directa a los problemas geotécnicos relacionados con los suelos no saturados, sin embargo, se demostró que para esta condición, las propiedades del suelo no son constantes sino variables (Fredlund, Rahardjo y Gan, 1987; Gan, Fredlund, y Rahardjo, 1988) y por tanto, se requiere de la utilización de modelos numéricos para dar solución a los problemas planteados. Una vez perfeccionado el fundamento teórico, en los años 90s se dirigieron los esfuerzos en implementar los conceptos y modelos matemáticos propuestos, sin embargo, la implementación ha sido difícil, principalmente por la dificultad (en tiempo y en costo) de medir las propiedades del suelo parcialmente saturado.

La investigación continúa hoy en día con avances relacionados con aspectos técnicos de la medición de las propiedades del suelo, de la incorporación de medición de succión en los equipos de corte directo y de compresión triaxial, medición de succión en campo y laboratorio, entre otros.

Investigadores como Delwyn Fredlund de la escuela canadiense, Gordon Aitchison de Australia, Alan W. Bishop de la escuela Británica, fueron de los primeros en publicar resultados de sus trabajos en suelos parcialmente saturados, enfocados al desarrollo teórico de una base científica. En Inglaterra, investigadores del Imperial College (A. M Ridley, K. Dineen y J. B Burland, entre otros) han desarrollado varias técnicas y equipos para la medición y control de la succión. En España es reconocida la Universidad Politécnica de Cataluña, con investigadores como Eduardo Alonso, en el estudio de los fenómenos de expansión y colapso bajo el marco de los suelos parcialmente saturados. En Sudamérica se destaca la escuela Brasileña, debido a su condición de país tropical y la presencia de suelos residuales parcialmente saturados. En Colombia se cuenta con algunos grupos de investigación que tienen entre sus líneas esta temática, como son los grupos de geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia en sus sedes Medellín y Bogotá, del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y de la Universidad de Medellín.

Localmente podemos mencionar trabajos a nivel de pregrado como el de Corrales (1996), que involucra la succión en el análisis de estabilidad de taludes, Piedrahita (2001) y Goez (2002) que analizaron algunas propiedades de resistencia de los suelos parcialmente saturados y el trabajo de Vargas (2005) sobre la influencia de la succión en suelos expansivos. A nivel de posgrado, Meza (2005), hizo un estudio experimental de la influencia de la succión en el cambio de volumen de dos suelos arcillosos. Existen trabajos más puntuales en la medición de succión y en la determinación de la curva característica de succión de algunos suelos, como el presentado por Hidalgo y Montoya (2006) sobre suelos volcánicos del oriente de Antioquia y la comparación entre la succión medida in situ y en laboratorio, de Vélez et al (2010).

Estos trabajos de investigación, encuentran en el Congreso Colombiano y en el Seminario Colombiano de Geotecnia, el principal escenario, por no decir el único, de socialización y difusión a la comunidad académica, científica y profesional, pero es el momento que estos avances salgan de los grupos de investigación y se extiendan al aula universitaria.

### **3. CASOS DE APLICACIÓN DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS**

Muchos problemas de la ingeniería geotécnica corresponden a condiciones del suelo en saturación parcial, relacionados con esfuerzos, deformación y flujo.

Un caso típico de un problema de esfuerzo, es el análisis de la estabilidad de taludes naturales, bajo condiciones cambiantes del clima. Los análisis deben considerar los posibles cambios ambientales (lluvias y evaporación), que ocasionan aumentos y descensos del nivel freático, y por tanto, cambios en las presiones de poros. Estos cambios en la presión de poros influyen en la estabilidad del talud y en las deformaciones laterales.

El fenómeno de reptación de las laderas (movimiento lento y gradual del terreno), muchas veces es activado por cambios ambientales, procesos de humedecimiento y secado, y su estudio requiere de las consideraciones y conceptos de los suelos parcialmente saturados.

El diseño de estructuras de contención es otro caso a estudiar bajo este marco. Tradicionalmente este tipo de estructuras se construyen con sistemas de filtros para captar y evacuar las aguas de infiltración y se asume en los diseños, que el suelo se encuentra seco durante la vida útil de la obra. No obstante, con el tiempo es posible que ésta condición cambie, y el suelo alcance a estar parcialmente saturado e inclusive saturado.

Los problemas relacionados con deformación corresponden principalmente a los cambios de volumen que se presentan en los suelos expansivos, suelos colapsibles, las grietas por desecación en arcillas y en suelos compactados.

En los suelos expansivos y colapsibles, que se encuentran por encima del nivel freático, se presentan presiones de poros negativas, y si el balance de entrada y salida de agua, permanece constante (lluvias, evaporación, presencia o remoción de árboles, fugas en redes de agua, etc), no se presentarán los problemas de expansión y colapso. Sin embargo, si se presentan cambios en el contenido de humedad del suelo, se generan cambios en las presiones de poros y consecuentemente cambios de volumen. Un humedecimiento del suelo producirá un aumento de volumen en los suelos expansivos y una disminución de volumen en los suelos colapsibles.

Los problemas relacionados con flujo de agua, se presentan principalmente en la construcción y operación de presas de tierra. La construcción de este tipo de estructuras, requiere de la compactación del suelo por capas, el cual debe contener un contenido de humedad óptimo para que se pueda compactar. El contenido de humedad requerido corresponde a un porcentaje de saturación entre el 70% y 80%, dependiendo del tipo de suelo, lo cual significa que el suelo se encuentra parcialmente saturado.

Los anteriores escenarios se han venido trabajando de manera inapropiada en la práctica ingenieril, utilizando el marco de la mecánica de suelos saturada o el caso extremo del suelo seco. No obstante, el desarrollo de la teoría y las técnicas de los suelos no saturados se encuentran en continuo avance, y los principios fundamentales están listos para ser incorporados en los análisis y diseños.

Desde el punto de vista de su aplicación práctica, en Medellín por ejemplo, en zonas de ladera, que constituyen la mayor parte del área urbana, es importante empezar a considerar el efecto de la succión en la resistencia al corte de los suelos y la influencia de la variabilidad de la succión por los cambios ambientales, en la estabilidad.

#### **4. CONCEPTOS Y DEFINICIONES BÁSICAS**

Los suelos saturados y los suelos secos, constituyen un sistema de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire y de acuerdo con Fredlund y Morgenstern (1977) se podría hablar de una cuarta fase: la interfase aire-agua, o membrana contráctil.

Debido a la interacción entre las fases, además de los principios de la mecánica y la hidráulica, se requiere utilizar los principios de termodinámica entre las diferentes fases del suelo, lo cual hace un poco más complejo el estudio del suelo parcialmente saturado.

*Cuándo encontramos en la naturaleza suelos saturados, secos o parcialmente saturados?*

La Figura 1 muestra el esquema planteado por Fredlund (2000) para representar los estados del suelo dependiendo de las fases presentes.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran en estado saturado, es decir, que los espacios vacíos están ocupados completamente por agua. De acuerdo con las leyes de la hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones y se le conoce como presión de poros debida al agua ( $u_w$ ).

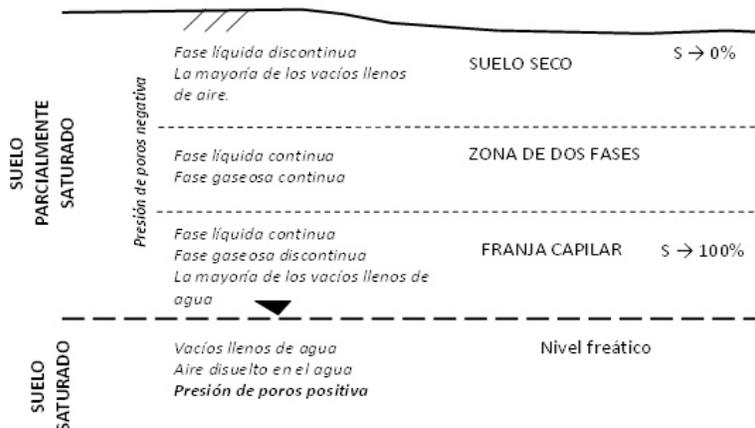


Figura 1. Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. Tomado de Fredlund, D.G, 2000.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran en estado saturado, es decir, que los espacios vacíos están ocupados completamente por agua. De acuerdo con las leyes de la hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones y se le conoce como presión de poros debida al agua ( $u_w$ ).

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático, pueden estar en estado seco o parcialmente saturado. La zona de suelo seco es la que se encuentra más cerca a la superficie del terreno, y de acuerdo con Fredlund (2000), la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire, pudiendo existir una fase líquida pero en estado discontinuo, es decir, como pequeñas gotas de agua aisladas. El grado de saturación del suelo seco es  $S \rightarrow 0\%$ .

La franja más cercana al nivel freático, es la franja capilar, donde la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, pero puede existir una fase gaseosa discontinua, es decir, se presentan burbujas de aire. El grado de saturación del suelo en la franja capilar es cercano al 100% ( $S \rightarrow 100\%$ ), pero el suelo no se considera saturado y a diferencia de este, el agua que ocupa los vacíos, se encuentra a una presión negativa, es decir la presión de poros debida al agua ( $u_w$ ) es negativa y se rige por el fenómeno de capilaridad.

Entre la zona del suelo seco y la franja capilar, existe una zona intermedia denominada por Fredlund (2000) como zona de dos fases, que corresponde a la zona del suelo parcialmente saturado, propiamente dicha. En esta zona, el agua y el aire se encuentran ocupando los poros, ambos de manera continua y el grado de saturación se encuentra en un intervalo entre el 20% y el 80%. La presión en los poros del suelo es negativa, pero es debida a la diferencia de presión entre ambas fases, es decir, a la presión del agua en los poros ( $u_w$ ) y a la presión del aire en los poros ( $u_a$ ).

La mecánica del suelo parcialmente saturado, se ha desarrollado para esta zona intermedia, donde hay continuidad de las fases líquidas y gaseosa, sin embargo, las teorías propuestas se pueden extender para los tres casos (Fredlund y Rahardjo, 1993).

#### 4.1. Concepto de Capilaridad

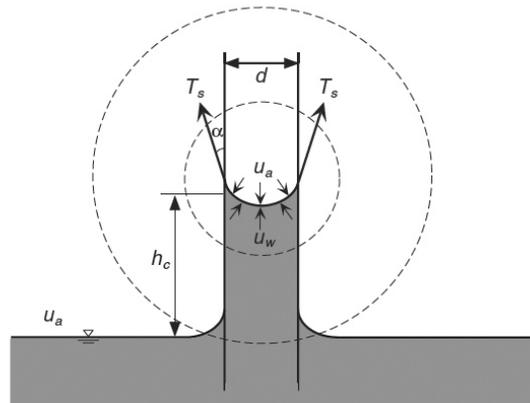
La capilaridad es un fenómeno físico característico de los líquidos, que se estudia con un “tubo capilar” (tubo de vidrio de pequeño diámetro) introducido en un recipiente que contiene al líquido. La capilaridad es el fenómeno que

permite que el líquido ascienda dentro del tubo, en contra de la gravedad, hasta una altura llamada altura capilar ( $h_c$ ). Esta altura capilar dependerá de la tensión superficial ( $T_s$ ), la fuerza de adhesión entre el líquido y el material del tubo capilar (ángulo de contacto,  $\alpha$ ) y el diámetro del tubo capilar ( $d$ ). La tensión superficial es una fuerza que se genera por el desbalance de las fuerzas intermoleculares del líquido en la interfase líquido-aire.

Del equilibrio de fuerzas verticales en la columna de agua dentro del tubo capilar, como se muestra en la Figura 2, se determina la altura capilar:

$$h_c = \frac{4 T_s \cos \alpha}{\rho d g} \quad (1)$$

Donde  $h_c$ : altura capilar,  $T_s$ : tensión superficial,  $\alpha$ : ángulo de contacto,  $d$ : diámetro del tubo capilar,  $\rho$ : densidad del líquido y  $g$ : aceleración de la gravedad.



**Figura 2.** Equilibrio mecánico de fuerzas dentro del tubo capilar, para determinar la altura capilar. Tomado de Lu N. y Likos W. J., 2004.

Este mismo fenómeno se presenta en los suelos con presencia del nivel de agua freática. Del nivel freático hacia arriba, se desarrolla una altura capilar, es decir, que el agua asciende a través de los poros del suelo y se forma la franja capilar. En esta franja capilar, el suelo está saturado pero con una presión de agua negativa y hace parte del suelo parcialmente saturado (Figura 1). El diámetro del tubo capilar en el modelo mecánico es análogo al diámetro de los vacíos o poros en el suelo, por tanto, la altura capilar en los suelos de grano fino es mayor que en los suelos de grano grueso. El fenómeno de capilaridad y el cálculo de la altura capilar en los suelos, son más complejos, debido a la irregularidad y variabilidad de los tamaños de partículas y por tanto de la distribución y tamaños de los poros.

#### 4.2. Succión.

El concepto de succión del suelo fue desarrollado en la física del suelo a principios de los años 1900s, relacionado con el sistema agua-suelo-plantas (Buckingham, 1907). Dentro del estudio del comportamiento mecánico del suelo parcialmente saturado, el concepto de succión fue introducido en Inglaterra en los años 50s (Croney y Coleman, 1948), dentro de un contexto termodinámico. Tales conceptos y definiciones han sido aceptados y utilizados en la mecánica de suelos y la geotecnia.

La succión total es referida como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Lee y Wray, 1995). Ridley (1993) la define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación.

La energía necesaria para remover el agua del suelo o succión total tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial ( $\Psi_m$ ) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica  $\pi$ .

La succión matricial ( $\psi_m$ ), es la componente de la succión total asociada a la capilaridad, debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas. La succión matricial se expresa como la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros ( $u_a - u_w$ ).

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (2)$$

Donde  $\psi_m$  es la succión matricial,  $u_w$  es la presión del agua en los poros y  $u_a$  es la presión del aire en los poros.

El valor de la succión matricial depende del tamaño y distribución de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación (Dineen, 1997). Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños, el radio de curvatura del menisco se reduce y de esta manera, la succión matricial se incrementa.

La succión osmótica ( $\pi$ ) es la componente de la succión asociada a la presencia de sales disueltas en el agua. La presencia de sales disueltas, reduce la presión de vapor en el espacio que se encuentra por encima de la interfase agua-aire, por lo tanto, se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua. Esta energía adicional requerida, es la succión osmótica, y es independiente de los efectos por capilaridad.

La succión total es considerada como la suma algebraica de las componentes matricial y osmótica.

$$\psi = \psi_m + \pi \quad (3)$$

Donde  $\psi$  es la succión total,  $\psi_m$  es la succión matricial y  $\pi$  es la succión osmótica

Teniendo en cuenta la definición de succión total como un estado de energía, la succión del suelo puede ser expresada con unidades de energía por unidad de masa. En ingeniería geotécnica, la succión se expresa en unidades de presión, Kilopascales (kPa) en el sistema internacional de unidades (SI).

Los principales problemas geotécnicos que involucran a los suelos no saturados, están relacionados con cambios ambientales, y estos cambios modifican principalmente la succión matricial, mientras que los cambios en la succión osmótica son menos significativos. En general, la succión osmótica tiene importancia en el comportamiento del suelo, cuando se presentan problemas que involucren contaminación química, (Fredlund y Rahardjo, 1993).

### 4.3. Relación contenido de agua y succión en el suelo

La relación existente entre el contenido de agua y la succión en un suelo, se define mediante la Curva Característica de Succión en el Suelo (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Esta relación también es conocida en la ciencia del suelo como curva de retención de agua.

El concepto e interpretación de la SWCC es muy importante para el entendimiento de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Debido a esto, el enfoque de algunas investigaciones ha sido encontrar la relación entre la SWCC de un suelo con sus propiedades físicas, así como también relaciones entre la SWCC y parámetros como la resistencia al corte y el coeficiente de permeabilidad del suelo.

La cantidad de agua en el suelo puede expresarse en términos de humedad gravimétrica ( $w$ ), grado de saturación ( $S$ ) o humedad volumétrica ( $\theta$ ) y se grafica en las ordenadas, mientras que las abscisas se grafica la succión total. En la práctica geotécnica, se representa la SWCC en términos de la succión matricial, puesto que la mayoría de los problemas ingenieriles son el resultado de cambios ambientales (succión matricial), mientras que los cambios en la succión osmótica son relevantes en el comportamiento del suelo en los casos donde se presente alteración del contenido de sales del suelo por efecto de contaminación química (Fredlund y Radharjo, 1993).

La SWCC no es única para un suelo, su forma y posición no son las mismas, para trayectorias de humedecimiento del suelo que para trayectorias de secado del suelo, lo que es llamado como “histéresis”.

#### Puntos característicos de la SWCC.

La curva característica de succión del suelo en trayectoria de secado fue caracterizada por White et al (1970) citado por Fredlund (2000). En la SWCC en términos del grado de saturación existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 3, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, y existen dos puntos característicos que marcan el límite entre cada etapa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual.

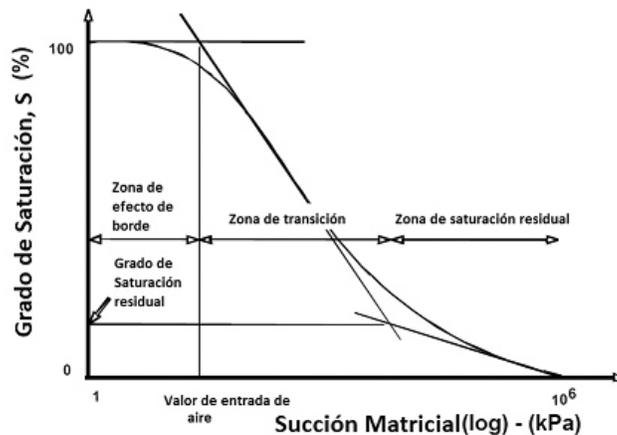


Figura 3. Curva característica de succión en el suelo.

En la zona de efecto de borde, la gráfica es inicialmente horizontal, es decir, el suelo permanece saturado. El valor de entrada de aire, es la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la desaturación o pérdida de la saturación. En este punto se inicia la zona de transición, en la cual existe una **interfase aire-agua**, pero el agua se encuentra de manera continua. Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire.

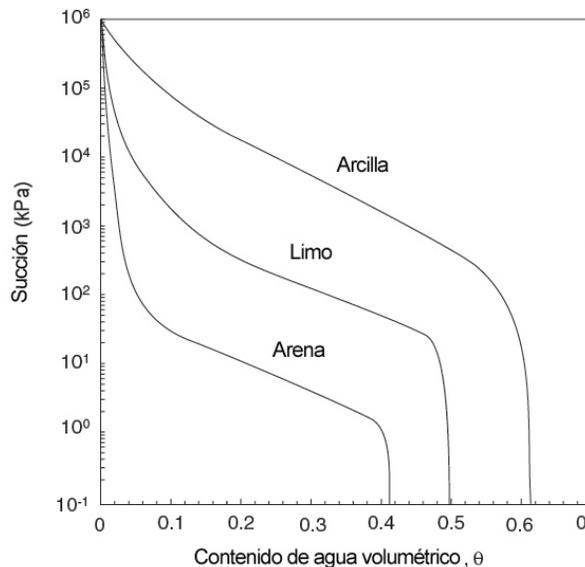


Figura 4. Curvas características de succión representativas para arenas, limos y arcillas. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

La relación contenido de agua-succión y por tanto, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo (Lu Ning y Likos W. J., 2004). La Figura 4, muestra curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcillas, donde se observa la forma de la curva, asociada al tipo de suelo, que indirectamente indica la influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros. El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo.

#### Forma matemática de la SWCC

Diversas ecuaciones matemáticas han sido propuestas para describir la SWCC, Van Genuchten (1980), Fredlund y Xing (1994), entre otros. Todas las ecuaciones involucran parámetros empíricos de ajustes, que están relacionados con el contenido residual de agua ( $\theta_r$ ) y la succión correspondiente al contenido residual de agua ( $\Psi_r$ ).

La ecuación (4) muestra la propuesta por Fredlund y Xing (1994) en términos del contenido volumétrico de agua.

$$\theta = C(\Psi) \left\{ \frac{\theta_s}{\ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{\alpha} \right)^n \right]} \right\}^m \quad (4)$$

Donde

$\theta$  : contenido volumétrico de agua a cualquier valor de succión.

$\Psi$ : es la succión en el suelo en kPa.

$C(\Psi)$ : función de corrección.

$\theta_s$ : contenido volumétrico de agua del suelo en estado de saturación.

$e$ : base de logaritmo natural: 2.71828...

$\alpha$ : succión relacionada con el valor de entrada de aire (punto de inflexión de la curva).

$n$ : parámetro del suelo relacionado con la pendiente de la curva en el punto de inflexión.

$m$ : parámetro de ajuste relacionado con los resultados cerca del contenido residual de agua.

La función de corrección  $C(\Psi)$  obliga que la curva pase por una succión de 10<sup>6</sup>kPa, cuando el contenido de agua es nulo. Este comportamiento es común a todos los suelos (Fredlund, 1964). La función de corrección está definida por la ecuación (5):

$$C(\Psi) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1\,000\,000}{\Psi_r} \right)} \right] \quad (5)$$

#### Medición de la SWCC

La curva característica de succión en el suelo se puede obtener de mediciones en laboratorio o se puede estimar a partir de otras propiedades del suelo como la granulometría o la plasticidad (Fredlund et al, 2002).

Para obtener la SWCC de laboratorio, se requiere hacer mediciones de succión a muestras de suelos para diferentes contenidos de agua. Las mediciones de succión se pueden hacer por diversas técnicas que fueron desarrolladas por la ciencia del suelo. No obstante, es importante tener claro que la SWCC no puede utilizarse para estimar la succión "in situ", dado que las condiciones de la muestra durante el ensayo de laboratorio no representan exactamente dichas condiciones.

## 5. ¿CÓMO SE MIDE LA SUCCIÓN?

Existen diversas técnicas para medir la succión total, matricial y osmótica del suelo, las cuales se pueden dividir en métodos directos o indirectos. En la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica, es importante hacer mediciones de la succión matricial y succión total, por tanto, en este artículo presentaremos algunos de los métodos más utilizados para su medición.

Los métodos directos, miden la presión negativa del agua en los poros del suelo o controlan las presiones del agua y del aire en los poros, para obtener la succión. Los métodos indirectos determinan la succión basados en la condición de equilibrio de humedad del suelo, con medidas de: presión de vapor, contenido de humedad o propiedades físicas (conductividad térmica o eléctrica) de un medio poroso en equilibrio con el suelo.

### 5.1. Métodos de medición de la succión total en el suelo.

*Métodos indirectos.*

De las relaciones termodinámicas entre las fases, la succión total se puede cuantificar en términos de la presión parcial del vapor de agua en los poros y consecuentemente en términos de la humedad relativa (Richards, 1965). La ley psicrométrica (ecuación 6) expresa la relación termodinámica entre la presión de vapor del agua y la succión:

$$\psi = - \frac{R T}{v_{w0} w_0} \ln \left( \frac{u_v}{u_{v0}} \right) \quad (6)$$

$\Psi$ : succión del suelo o succión total en kPa.

R: constante universal de los gases, 8.31432 J/(mol K)

T: temperatura absoluta en °C.

$w_0$ : masa molecular del vapor de agua

$u_v$ : presión parcial de vapor de agua en los poros, kPa.

$u_{v0}$ : presión de saturación de vapor de agua sobre una superficie plana de agua puro a la misma temperatura, kPa.

$v_{w0}$ : inverso de la densidad del agua ( $1/r_w$ ) en m<sup>3</sup>/kg.

El término  $(u_v/u_{v0})$  es la humedad relativa del suelo (HR)<sup>1</sup>. La succión del suelo es cero cuando la humedad relativa es del 100% y una humedad relativa menor de 100%. indica la presencia de succión en el suelo.

Con la ecuación 6, se puede determinar la succión del suelo en función de la humedad relativa (HR) y teniendo en cuenta esta relación, la succión total del suelo, es determinada con equipos que miden la HR de la fase de aire, en los poros del suelo o de una zona cercana al suelo. Ejemplo de estos equipos son el psicrómetro termopar y el psicrómetro con la técnica de espejo enfriado (chilled mirror). El rango de succiones que se miden con el psicrómetro termopar está entre 300 y 7000 kPa. El equipo que utiliza la técnica del espejo enfriado a punto de rocío (chilled-mirror dew point device) tiene limitaciones para medir bajos rangos de succión (menores de 1000 kPa) y el rango de medición está entre 1 y 5 MPa. En este equipo, la medida de succión total, se basa en el equilibrio de la fase líquida de la muestra de suelo con el vapor de agua, del aire que hay encima de la muestra.

Otro método indirecto para determinar la succión, es el método del papel filtro. Con este método se determina la succión a partir del contenido de agua que tiene el papel filtro, cuando se alcanza la humedad de equilibrio con el suelo

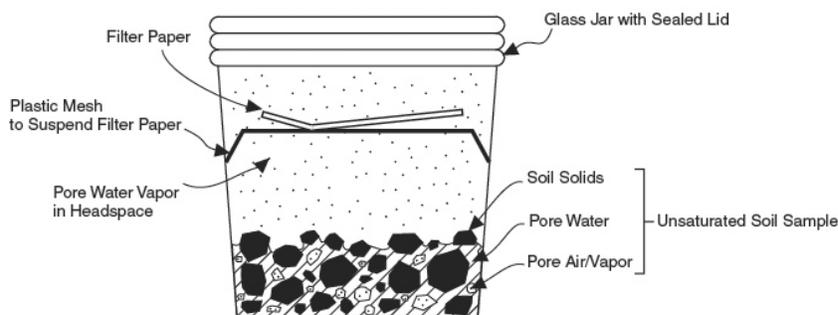
1. La humedad relativa se refiere a la relación entre la presión parcial de vapor del agua en los poros y la presión de saturación (máxima) de vapor de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura (Fredlund y Rahardjo, 1993).

al que se le requiere medir la succión. Este procedimiento se encuentra estandarizado y descrito en detalle en la norma ASTM D 5298-10 y es el único método que permite determinar la succión total y la succión matricial.

La técnica del papel filtro se basa en el supuesto de que el papel filtro llegará a equilibrarse con el suelo -con respecto al flujo de humedad- a una succión específica. Este equilibrio puede alcanzarse por el intercambio de humedades entre el suelo y el papel filtro, bien sea en forma de vapor de agua (succión total) o en forma de líquido (succión matricial).

Se puede estimar la succión a partir del contenido de agua del papel filtro, utilizando una curva de calibración apropiada. La técnica de calibración del papel filtro ha sido estudiada por numerosos investigadores, y para cada papel filtro debe ser desarrollada una curva de calibración. Los papeles filtro más utilizados son el Whatman No 42 y el Schleicher y Schuell No 589.

Para medir la succión total se utiliza el método de papel filtro en “no contacto” con el suelo (Figura 5). Cuando el papel filtro no está en contacto con el suelo, sino suspendido encima de este, ocurre un flujo de vapor de agua desde el suelo hacia el papel filtro, que está seco inicialmente, hasta alcanzar el equilibrio. El contenido de agua del papel filtro, cuando no está en contacto con el suelo, corresponde a la succión total del suelo.



**Figura 5.** Esquema del ensayo de papel filtro en “no contacto” con el suelo. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

El método de papel filtro en “no contacto” con el suelo, en teoría, tiene un amplio rango de medición de succión, sin embargo, el método tiende a ser impráctico en ambos extremos de succión (altos valores y bajos valores), siendo confiables en el rango entre 1 y 5 MPa.

## 5.2. Métodos de medición de la succión matricial en el suelo.

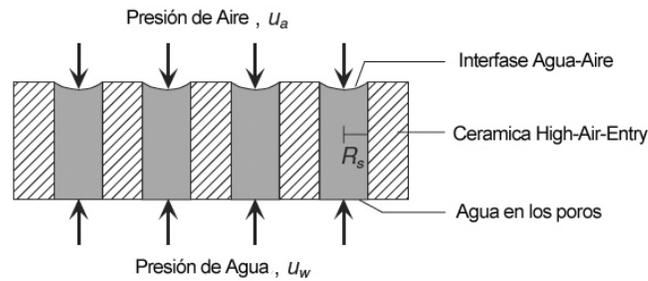
### *Métodos directos.*

Los métodos directos para medir la succión matricial, miden la presión negativa del agua en los poros del suelo ( $u_w$ ) y se aplica la definición de succión matricial como  $(u_a - u_w)$ , sabiendo que la presión de aire en los poros ( $u_a$ ) es la presión atmosférica en campo.

Los métodos directos más utilizados para medir la succión matricial son los tensiómetros y la técnica de traslación de ejes. Ambos métodos utilizan materiales (placas o discos cerámicos) con un alto valor de entrada de aire (high-air-entry), los cuales son materiales que presentan microporos de tamaños y distribución relativamente uniformes. En estos materiales, cuando son saturados con agua, se desarrolla una tensión superficial en la interfase aire-agua formada dentro de los poros del material, que actúan como una membrana, lo que permite que exista una diferencia de presión entre las fases de aire y agua que estén localizadas a lado y lado del material (Figura 6).

Físicamente, la tensión superficial actúa como una membrana que separa las dos fases (aire y agua), lo que permite

medir directamente la presión negativa del agua utilizando un tensiómetro, o controlar la diferencia entre las presiones del aire y del agua mediante la técnica de traslación de ejes.



**Figura 6.** Principio de operación de los discos con alto valor de entrada de aire. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

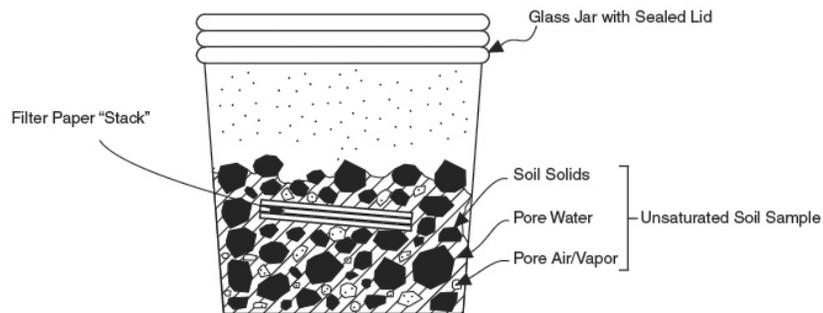
El rango de medición de succión con los tensiómetros dependerá de la presión de entrada de aire de la cerámica y generalmente la máxima succión medida es de 90 kPa, aunque se han desarrollado tensiómetros de “alta capacidad” que alcanzan mediciones de 1500 kPa (Ridley y Burland, 1993).

Los equipos más comunes que utilizan la técnica de traslación de ejes con extracción del agua de los poros, son los conocidos como placas de presión, que permiten mediciones de succión de hasta 1500 kPa, que es el máximo valor de entrada de aire de los discos que existen comercialmente. Esta técnica es recomendada en suelos con grados de saturación menores al 95%, donde el aire en los poros se encuentre de manera continua y no como burbujas.

#### *Métodos indirectos*

Entre los métodos indirectos utilizados para medir la succión matricial del suelo, está el método de papel filtro en “contacto” con el suelo y los sensores de conductividad térmica y conductividad eléctrica.

En el método del papel filtro en “contacto” con el suelo (Figura 7), la transferencia de humedad desde el suelo hacia el papel filtro, es controlada por la capilaridad y por las fuerzas de adsorción superficial de las partículas, por tanto la succión medida corresponde a la componente matricial de la succión.



**Figura 7.** Representación esquemática del método de papel filtro en contacto con el suelo. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

El rango de medición de succión con el papel filtro en “contacto” es completo, es decir, desde bajos valores de succión hasta altos valores de succión.

En la Tabla 1 se muestran los rangos de medición de succión aproximados para cada una de las técnicas de medición.

**Tabla 1.** Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición.

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

## 6. RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Para la predicción del comportamiento del suelo en problemas relacionados con la estabilidad de taludes, capacidad de soporte, estructuras de retención, se requiere conocer la resistencia al corte del suelo.

La ecuación de resistencia al corte para suelos no saturados, es una relación que define la resistencia al corte en función de las variables de estado de esfuerzos y de las propiedades del suelo.

Las variables de estado de esfuerzos, permiten describir los cambios en el estado de esfuerzos en un suelo y las más utilizadas son el esfuerzo total, el esfuerzo efectivo y la presión de poros. El esfuerzo efectivo ( $\sigma - u_w$ ), es la variable de estado de esfuerzos fundamental para describir el estado de esfuerzos en el suelo saturado y la responsable de los cambios de volumen y cambios de resistencia al corte. Para los suelos no saturados, que están constituidos por tres fases (sólido, agua y aire), se requieren nuevas variables de estado de esfuerzos, dado que una sola variable no explica completamente el comportamiento del suelo no saturado (Bishop y Blight, 1963, Fredlund y Morgenstern, 1978).

Fredlund y Morgenstern (1977), presentaron varias combinaciones de variables de estado de esfuerzo, que son independientes entre sí, y propusieron dos nuevas variables: el esfuerzo normal neto o esfuerzo compresivo neto ( $\sigma - u_a$ ) y la succión matricial ( $u_a - u_w$ ). La Tabla 2 muestra las combinaciones de las variables de estado de esfuerzos, propuestas por Fredlund y Morgenstern (1977) para los suelos parcialmente saturados.

**Tabla 2.** Combinaciones de variables de estado de esfuerzo.

Presión de referencia	Variables de estado de esfuerzo.
Aire ( $u_a$ )	$(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$
Agua ( $u_w$ )	$(\sigma - u_w)$ y $(u_a - u_w)$
Total ( $\sigma$ )	$(\sigma - u_a)$ y $(\sigma - u_w)$

Una vez definidas las variables de estado de esfuerzo, que mejor representan el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, Fredlund et al (1978), propusieron una ecuación de resistencia al corte, en términos de dichas variables ( $\sigma - u_a$ ) y ( $u_a - u_w$ ) y en términos de algunas propiedades del suelo independientes. La ecuación de resistencia, es una extensión de la ecuación de resistencia de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7)$$

Donde:

$\tau$ : resistencia al corte del suelo parcialmente saturado.

$c'$ : cohesión efectiva a succión cero (del suelo saturado)

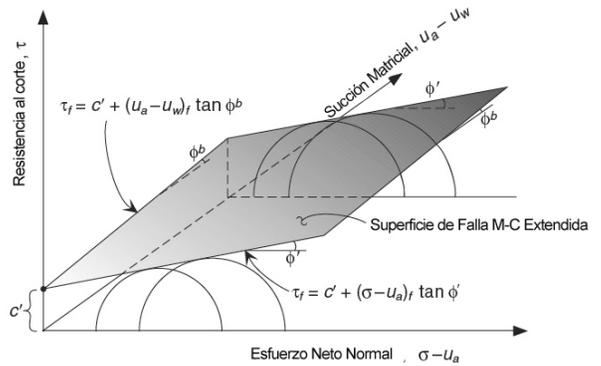
$\phi'$ : ángulo de fricción interna efectivo (del suelo saturado)

$\phi^b$ : ángulo que define la tasa de incremento de resistencia al corte con respecto a la succión del suelo.

$(\sigma - u_a)$ : esfuerzo normal neto sobre el plano de falla, en la falla.

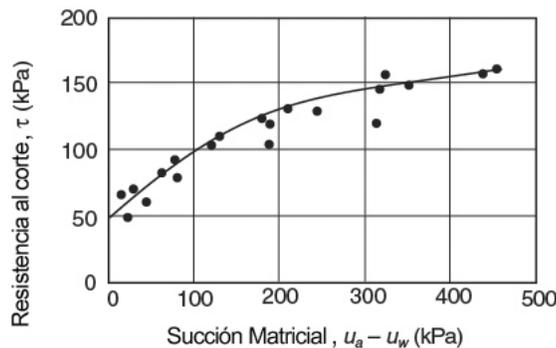
$(u_a - u_w)$ : succión matricial del suelo en el plano de falla.

Para el caso de los suelos no saturados, la envolvente de falla es una superficie plana en el espacio  $\tau$ ,  $(\sigma - u_a)$  y  $(u_a - u_w)$ , como lo muestra la Figura 8.



**Figura 8.** Criterio de Mohr-Coulomb extendido para suelos parcialmente saturados. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

Posteriormente se demostró que el ángulo de resistencia que se relaciona con la succión ( $\phi^b$ ), no es un parámetro constante, sino que es variable (Gan et al, 1988; Fredlund et al, 1987; Vanapalli et al, 1996), y que la superficie de resistencia no varía linealmente con relación a la succión, sino que es una superficie curva (Figura 9).



**Figura 9.** No linealidad entre la resistencia al corte y la succión matricial. Datos experimentales de Gan et al, 1988.

Varios autores han intentado predecir la resistencia al corte de los suelos no saturados, utilizando procedimientos empíricos. Vanapalli et al (1996), Fredlund y Xing (1994), han propuesto modelos matemáticos para predecir la resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados, a partir de la curva característica de succión en el suelo y los parámetros de resistencia del suelo saturado ( $c'$  y  $\phi'$ ). Las estimaciones hechas a partir de los modelos, han resultado ser aceptables para la mayoría de proyectos de ingeniería, (Fredlund, 2000), por tanto, se insiste en la importancia de determinar la SWCC de los suelos no saturados, para entender su comportamiento.

## 7. CONSIDERACIONES FINALES

En países ubicados en zonas tropicales como Colombia, y específicamente en el departamento de Antioquia, se hace necesario que problemas geotécnicos como la estabilidad de taludes y laderas, empujes laterales sobre estructuras de contención, conformación de terraplenes y presas de tierra, se aborden desde la óptica de la Mecánica de Suelos “Parcialmente Saturados”.

Los conceptos y teorías de los suelos “No Saturados”, no hacen parte del currículo de la Mecánica de Suelos, ni de las asignaturas del área de geotecnia a nivel de pregrado. Es decir, que los profesionales de la ingeniería civil, tienen un acercamiento con las teorías fundamentales del suelo parcialmente saturado, solo si continúan los estudios a nivel de postgrado, lo cual, ha sido uno de los motivos para el atraso de la implementación en la práctica profesional.

La presentación de estos conceptos básicos en el aula universitaria a nivel de pregrado, dentro de las asignaturas del área profesional o como asignaturas de profundización, es un aporte importante para lograr un avance en la implementación y pasar de la teoría a la práctica, y que cada vez más, los diseños geotécnicos sean menos conservadores (por causa de incertidumbres) y más cercanos a la realidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 5298-10 Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International, Pennsylvania, USA.
- Bishop, A.W. y Blight, G.E., 1963. Some aspects of effective stress in saturated soils in partially saturated soils. *Geotechnique* No 13, pp. 177-197.
- Buckingham, E., 1907. Studies on the movement of soil moisture. US Dept Agr. Bur. Soils Bulletin 38.
- Corrales Estrada, J.F., 1996. Succión matricial de suelos como parámetro de estabilidad de taludes. (Tesis de pregrado). Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Croney, D. y Coleman, J.D., 1948. Soil thermodynamics applied to the movement of moisture in road foundations. *Proc. 7<sup>th</sup> Cong. Appl. Mech.*, vol 3, pp. 163-177.
- Dineen, K. The influence of soil suction on compressibility and swelling (PhD Thesis). University of London, 1997.
- Fredlund, D.G., 1964. Comparison of soil suction and one-dimensional consolidation characteristic of a highly plastic clay. *Nat. Res. Council Tech. Report No 245*. Div of Building Res., Ottawa, Ont., Canada, 26 p.
- Fredlund, D.G, 2000. The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics into Geotechnical Engineering Practice. National Research Council of Canada.
- 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, D.G, Morgenstern, N. R. y Widger, R.A., 1978. Shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 15, pp. 313-321.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., y Gan, J.K.M., 1987. Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. *Procc of the 6<sup>th</sup> International Conference on Expansive soils*, New Delhi, India, Vol I, pp. 49-56.
- Fredlund, D.G y Rahardjo, H., 1993. *Soils mechanics for unsaturated soils*. Jhon Wiley & Sons Inc, New York.
- Fredlund, D.G y Xing., 1994. A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 31, pp.521-532.
- Fredlund, D.G., Xing A., Fredlund, M.D y Barbour, S.L., 1995. The relationship of the unsaturated soil shear strength

- to she soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 32, pp.440-448.
- Fredlund, M.D., Wilson, G.W y Fredlund, D.G., 2002. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 39, pp.1103-1117.
- Gan, J.K.M., Fredlund, D.G. y Rahardjo, H., 1988. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25.
- Goez Usuga, W., 2002. Interpretación de la resistencia a la compresión no confinada en suelos parcialmente saturados, aplicada al interior de la zona 12 y 13 de la microzonificación sísmica de Medellín (Tesis de pregrado). Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo. M, C. y Montoya. R, R., 2006. Curvas características de suelos volcánicos del oriente de Antioquia. *Memorias del XI Congreso Colombiano de Geotecnia*, Cartagena, pp. 273-279.
- Lee, H. C y Wray, W. K., 1995. Technics to evaluate to soil suction – a vital unsaturated soil water variable. *Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils*, Paris. Vol II, pp. 65-622-
- Lambe, W. T. y Whitman, R.V., 1991. *Soil mechanics*. Jhon Wiley & Sons Inc.
- Lu Ning y Likos W. J., 2004. *Unsaturated Soils Mechanics*. Jhon Wiley & Sons Inc, New Jersey.
- Meza Ochoa, V.E., 2005. Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos (Tesis de Maestría). Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Piedrahita N., E.D., 2001. *Propiedades geomecánicas de suelos parcialmente saturados* (Tesis de pregrado). Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Richards, B.G., 1965. Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors. in *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath covered areas*, A Symposium in print. Australia: Butterworths, pp. 39-46.
- Ridley. A. M., 1993. *The measurement of soil moisture suction* (PhD Thesis). University of London.
- Ridley, A.M. y Burland, J. B., 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique* Vol 43, No2, pp.321-324.
- Terzaghi K., 1925. *Erdbaumechanik*. Franz Deuticke, Viena.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. y Clifton, A.W., 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 33, No 3, pp.379-392.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 44, pp.892-898.
- Vargas Suaza, D., 2005. Influencia de la humedad, la densidad seca y la succión en la presión de expansión de arcillas plásticas compactadas (Tesis de pregrado). Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Vélez V., P.M, Valencia G., Y. y Echeverri R., O., 2010. Comparativo entre la succión medida en laboratorio y la succión medida en campo de la capa superficial de una ladera del corregimiento de Santa Elena, Antioquia. *Memorias XIII Congreso Colombiano de Geotecnia*.