



**MODELACION FISICA DEL EFECTO DE LOS ÁRBOLES EN LOS SUELOS
BLANDOS DE BOGOTÁ**

GUSTAVO ROSO GÓMEZ



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ
2005**



**MODELACION FISICA DEL EFECTO DE LOS ÁRBOLES EN LOS SUELOS
BLANDOS DE BOGOTÁ**

GUSTAVO ROSO GÓMEZ

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar el título de Magíster en
Ingeniería Civil**

ASESOR

ING. BERNARDO CAICEDO H. Ph.D



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA
2005**



AGRADECIMIENTOS

A Dios, Vilma Roció, Karen Lorena, Camilo Andrés y mi amigo Rodrigo E., por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	12
1. ANTECEDENTES	13
2. ANATOMIA DEL ARBOL	14
2.1. ESPECIES DE ÁRBOLES PLANTADOS EN BOGOTÁ	14
2.2. CARACTERISTICAS DE LAS RAÍCES	15
2.3. FISIOLOGIA DEL ARBOL	16
2.4. TRANSPIRACION	16
2.5. ABSORCION	17
3. EXPLORACION GEOTECNICA DE LOS SUELOS COMPRESIBLES DE BOGOTÁ	18
3.1 DETERMINACION DEL POTENCIAL EXPASIVO DE UN SUELO	18
3.2 CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL	21



4. SUCCION	23
4.1 SUCCION MATRIACIAL	23
4.2 SUCCION OSMOTICA	23
4.2.1 valores típicos de succión	25
4.3 CAPILARIDAD	26
4.3.1 altura capilar	26
4.3.2 presión capilar	26
4.4 RESISTENCIA AL CORTE	28
4.5 DEFORMABILIDAD	29
5. MODELO FÍSICO	31
5.1 MATERIALES	32
5.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES EMPLEADAS EN EL MODELO	33
5.2.1 efecto peltier	33
5.2.2 punto rocío	34



6. PSICROMETRO	35
6.1 SOFTWARE DEL PC	36
6.2 METODO DE CALIBRACIÓN	36
6.3 CORRECCION DE LA TEMPERATURA	37
6.4 FORMATO DE SALIDA DE DATOS	37
7. ANALISIS DE RESULTADOS	38
7.1 MODELO FÍSICO	38
7.1.1 temperatura	38
7.1.2 humedad relativa	38
7.1.3 comportamiento de la humedad relativa por efectos de la temperatura	38
7.1.4 deformación de la muestra	39
7.2 PSICOMETRO PELTIER	41
8. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	47
BIBLIOGRAFIA	49



ANEXOS

50



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación limite liquido Vs. Humedad natural	21
Figura 2. Modelo físico de capilaridad	28
Figura 3. Modelo de termodinámico	32
Figura 4. Efecto Seebeck y Peltier	33
Figura 5. Psicrómetro termocupla Peltier	35
Figura 6. Curva de calibración del psicrómetro	36
Figura 7. Formato de salida de lecturas del psicrómetro	37
Figura 8. Temperatura Vs. Humedad Relativa	39
Figura 9. Asentamiento Vs. Tiempo	40
Figura 10. Asentamiento total presentado en el modelo	41
Figura 11. Lecturas del Psicrómetro	41



Figura 12 Relación temperatura Vs. Succión	42
Figura 13. Humedad relativa Vs. Tiempo	42
Figura 14. Succión Vs. Tiempo	43
Figura 15. Temperatura Vs. Tiempo	43
Figura 16. Humedad relativa Vs. Succión	44



LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Peligrosidad de los árboles en arcillas expansivas	15
Tabla 2. Propiedades geomecánicas del suelo en estudio	19
Tabla 3. Hinchamiento potencial basado en los límites de Atterberg	19
Tabla 4. Valores típicos de succión	25
Tabla 5. Equipos de medición de succión	25



LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Exploración geotécnica	44
Foto 2. Asentamiento de la vía en la calle 116 (por succión)	45
Foto 3. Modelo físico	45
Foto 4. Data Logger CR7	46
Foto 5. Efectos de fisuración producidos por la succión	46



INTRODUCCION

Esta investigación ha sido orientada a la simulación y medición del efecto de la succión de las raíces de los árboles en los suelos blandos de Bogotá y su influencia en los fenómenos de expansividad y retracción de estos suelos.

Para el desarrollo del estudio, se tendrá en cuenta como el agua es removida del suelo a través de la transpiración que realizan los árboles por medio de las hojas, al realizar la fotosíntesis y la succión efectuada por las raíces de los árboles. Este proceso produce un flujo de agua, hacia fuera del suelo, generando cambios volumétricos (contracción), que se reflejan en fisuración y desecamiento de la masa de suelo. Al contrario en épocas de lluvias se presenta un flujo de agua hacia el interior del suelo produciendo saturación de la masa de suelo y reduciendo el efecto de la succión.

Mediante la simulación de la succión de las raíces de los árboles, a través del modelo físico del efecto PELTIER, se podrán tomar medidas correctivas para evitar que este efecto produzca daño y deterioro de las estructuras de pavimentos y asentamientos en los suelos compresibles que conforman la subrasante existente en los pavimentos de Bogotá. Adicionalmente se realizaron mediciones de la succión a través del Psicrómetro, con el objeto de encontrar la curva característica del suelo en estudio.



1. ANTECEDENTES

Estudios anteriores, sobre el efecto de la succión que producen los árboles en las estructuras de pavimento de la ciudad de Bogotá, ¹ han demostrado la influencia que este efecto tiene, sobre el comportamiento de los pavimentos existentes, debido a los cambios de humedad, presentándose en los suelos incrementos en la rigidez del suelo y deformaciones plásticas irreversibles en los suelos expansivos. Este estudio está dirigido a ampliar el conocimiento, que se tiene del efecto de la succión de las raíces de los árboles a través de la simulación del modelo físico del efecto Peltier.

¹ Nossa P. Efraín & Roa Saavedra Miguel. Modelación Física y Numérica del efecto de los Árboles en los Suelos Blandos de Bogotá.



2. ANATOMÍA DEL ÁRBOL

2.1 ESPECIES DE ÁRBOLES PLANTADOS EN BOGOTÁ

A modo de ilustración se presentan a continuación las diferentes especies de árboles que fueron plantadas para arborizar las calles y avenidas de Bogotá.

- Urapan (*Fraxinus Chinensis*) originario de Asia.
- Acacia (*Acacia Melanoxylon*) originaria de Australia.
- Eucalipto (*Eucalyptus Mobalaas*, *Viminalis* y *Camaldalensis*) originario de Australia.
- Pino (*Pinus Patuca*, *Radiata*, *Taeda*) originario de California y Europa.²

El grado de peligrosidad de los árboles depende de su naturaleza, en la tabla siguiente se da una relación establecida a estos efectos en Canadá, algunos de los relacionados en la tabla, se encuentran plantados en la ciudad de Bogotá.

² MORENO, B.L. Evaluación de daños producidos por árboles ornamentales en pavimentos de la zona norte de Bogotá En: Tercer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena, (1979)



Tabla 1. Peligrosidad de los árboles en arcillas expansivas, Según el criterio del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas de Canadá.

Muy peligrosos	Álamo, Chopo
	Aliso
	Acacia
	Sauce
	Olmo
Peligrosos	Arce
	Abedul
	Fresno
	Haya
	Encina
Poco peligrosos	Alerce
	Cedro
	Abeto
	Pino

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS RAÍCES

Las raíces se pueden dividir en leñosas (o permanentes), y no leñosas. Las raíces leñosas mas gruesas se desarrollan cerca de la raíz principal, bajo el tronco, con la única función de dar estabilidad al árbol, estas raíces se engruesan hasta unos 25 mm, rápidamente y permanecen del mismo tamaño hasta formar las raíces leñosas primarias.

Los daños producidos por los árboles suelen tardar bastante tiempo en presentarse (6 – 12 años), hasta que alcanzan su desarrollo adulto.



2.3 FISIOLÓGÍA DEL ÁRBOL

Toda planta para su supervivencia y desarrollo requiere cantidades determinadas de agua diaria. Esa cantidad es función de la especie y en particular de la edad y tamaño (altura, diámetro del tronco y follaje del árbol).

“El consumo diario de un árbol puede ser aproximadamente de 450 litros, especialmente en el verano y con vientos. Esa cantidad de agua es obtenida por medio de las raíces, aplicando succiones que normalmente llegan hasta los 1500 KN/m²³. En los suelos arcillosos normalmente la permeabilidad es tan baja, que lo más probable es que la tabla de agua no alcance a regresar a su nivel inicial antes de que llegue un nuevo periodo seco. La mayoría del agua para el árbol es suministrada por la red de abanicos de raíces muy finas, que se desarrollan al final de los sistemas no leñosos.

2.4 TRANSPIRACIÓN

Este proceso que realiza el árbol a través de la superficie de las hojas perdiendo agua en forma de vapor, depende de la temperatura, la humedad y el agua disponible. También, la anatomía afecta la pérdida de agua del árbol.

Condiciones ambientales de forma alterna en el proceso de transpiración, afectan las estomas abriéndolas con la luz y cerrándolas con la oscuridad.

El estudio de la temperatura en el movimiento del agua en el suelo, se hace necesario para diferenciar dos formas de enfocar el problema. La primera consiste

³ MORENO, B.L. Evaluación de daños producidos por árboles ornamentales en pavimentos de la zona norte de Bogotá En: Tercer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena, (1979)



en verificar el efecto de la temperatura, en el desarrollo de un problema supuesto ISOTERMICO, y la segunda corresponde al estudio del fenómeno asociado a la existencia de un GRADIENTE TERMICO, que a su vez origina un flujo de agua. El movimiento del agua líquida es debido a la variación de la succión con la temperatura. Esta variación es debida a la variación de la tensión superficial con la temperatura, y por otra parte a la variación de la presión del aire disuelto y ocluido.

2.5 ABSORCIÓN

Todos los árboles necesitan cierta cantidad de humedad atmosférica y humedad del suelo; estos continuamente se hallan sujetos a la acción de ambas variables.

El efecto más importante en la vida de un árbol es el agua, este elemento puede ser seguido, paso a paso, desde su entrada por las raíces, hasta su salida por los brotes. Si bien el efecto estimulante de la humedad atmosférica queda confinado principalmente a los brotes y el de la humedad del suelo a las raíces, las dos actúan juntas determinando el crecimiento.



3 EXPLORACION GEOTECNICA DE LOS SUELOS COMPRESIBLES DE BOGOTA

Para la determinación de las propiedades geomecánicas de los suelos compresibles de Bogotá, se realizaron tres (3) apiques en la autopista Norte entre calles 190 y 200 a una profundidad de tres (3) metros, a las muestras obtenidas se realizaron los siguientes ensayos.

- Perfiles estratigráficos.
- Granulometría por Hidrómetro.
- Límites de Atterberg (Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad).
- Compresión in confinada.
- Humedad natural.
- Gravedad específica
- Consolidación unidimensional
- Densidad de campo
- Límite de contracción.

Los resultados de estos ensayos sirvieron de parámetro para diseñar el suelo de subrasante del modelo físico. De esta forma el suelo del modelo satisface las condiciones del suelo de Bogotá.

3.1 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO DE UN SUELO

En el presente estudio se hacen consideraciones con respecto a los valores de los límites de Atterberg obtenidos en campo, los cuales se presentan en las siguientes tablas (2 y 3) de propiedades geomecánicas del suelo de soporte para los pavimentos de Bogotá.

**Tabla 2. Propiedades geomecánicas del suelo en estudio**

Clasificación del suelo	CH
Wn (%)	45
LL (%)	67.13
LP (%)	28.05
IP (%)	39.08
<i>I. liquidez</i>	0.466
e Vacíos inicial	1.183
e Vacíos final	1.106
Cc	0.26
Cr	0.10
Pc, presión de consolidación (Kg/cm ²)	2.0
E, módulo elástico (Kg/cm ²)	47.91
P0, presión inicial (Kg/cm ²)	0.36
OCR	5.62
Qu. Resistencia al corte (Kg/cm ²)	1.43
Cu (Kg/cm ²)	0.72

Tabla 3. Hinchamiento potencial basado en los límites de Atterberg según el departamento de transportes de Louisiana.

LL %	IP %	Hinchamiento Potencial
20-49	15-24	Bajo a medio
50-70	25-46	Alto
>70	>46	Muy alto

De acuerdo con el tipo de suelo encontrado, tenemos que se trata de arcilla gris con vetas de óxidos amarillo rojizo de alta plasticidad, con presencia de raíces y



consistencia firme, limite líquido de 67.13%, índice plástico de 39.08 y clasificación USCS (CH), se tiene que el potencial de expansión según la tabla anterior es Alto.

Los valores de dicha relación dan una idea de la expansividad de un material que se encuentre en unas condiciones determinadas de humedad.

- Relación Limite Liquido- Humedad Natural

Partiendo de los ensayos de hinchamiento efectuados con muestras inalteradas se puede establecer una correlación entre la presión de hinchamiento e hinchamiento.

Según la figura No.1 y los límites de Atterberg que se tienen, se encuentra que el hinchamiento es del 1 al 4% y la presión de hinchamiento de 0.3 a 1.25 Kg/cm².

Se han determinado las siguientes expresiones, para estimar el hinchamiento S (en tanto por ciento) y la presión de hinchamiento Ph .⁴

$$\text{Log } S = \frac{1}{12} * (0.4 * LL - W + 5.5) \quad (1)$$

$$\text{Log } Ph = \frac{1}{12} * (0.4 * LL - W - 0.4) \quad (2)$$

Donde,

LL = Límite líquido.

W = Humedad natural.

De acuerdo con los parámetros del suelo empleado en el modelo tendremos valores de S y Ph de:

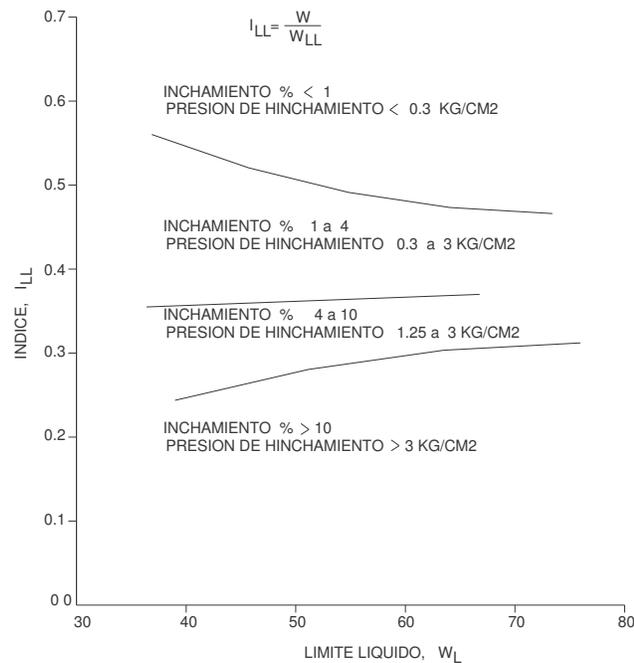
⁴ FREDLUND, D.G. & RAHARDJO. Soil Mechanics For Unsaturated Soils (1993)



$$S=0.08$$

$$Ph = 0.028 \text{ Kg / cm}^2$$

Figura 1. Relación límite líquido Vs. Humedad natural, según el departamento de transportes de louisiana, (1993)



3.2 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

La compresión de un suelo es causada por la expulsión de agua o aire de los espacios vacíos, produciendo una reducción en el volumen de la masa del suelo y generando un asentamiento. Para los suelos arcillosos, el asentamiento por consolidación depende del tiempo.

“También se puede definir como un proceso que es gradual e involucra, simultáneamente, un flujo lento de agua y una compresión gradual en la estructura, el proceso es llamado consolidación”.⁵

⁵ DAS, B.M. Principles of Foundation Engineering. Boston (1990)



Para el suelo encontrado (CH), tenemos que:

Presión de consolidación	P_c	= 2.0 Kg. /cm ²
Presión inicial	P_o	= 0.36 Kg. /cm ²
Sobre consolidación	OCR	= 5.62

Por lo tanto el suelo es fuertemente sobre consolidado.



4 SUCCIÓN

Un suelo parcialmente saturado, tiene el agua de sus poros sometida a una tensión de tracción, cuando la presión del aire intersticial es igual a la atmosférica. Aunque el suelo esté saturado, el agua intersticial también puede estar en un estado de tracción. Al valor de dicha tensión negativa se le llama succión que es la capacidad de un suelo de retener agua capilar.

φ = Succión total.

π = Succión osmótica.

$(\mu_a - \mu_w)$ = Succión matricial.

4.1 SUCCIÓN MATRICIAL

Se define como la diferencia entre la presión del aire (μ_a) y la presión del agua (μ_w) en los poros del suelo.

Es decir, es la presión negativa, relativa a la exterior de gas que actúa en el agua intersticial, a que debe someterse una solución de composición idéntica a la del agua intersticial, para estar en equilibrio, a través de un elemento poroso permeable, con el agua intersticial.

4.2 SUCCIÓN OSMÓTICA (DEL SOLUTO)

Se define como la presión negativa a la que se debe someter un recipiente de agua pura para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable, con otro recipiente que contenga una solución idéntica en composición con el agua intersticial.



La succión de un suelo es comúnmente referida al estado de energía libre del agua del suelo. Puede ser medida en términos de presión de vapor de agua del suelo y presión parcial del vapor de agua de poros. (Richards, 1965):

$$\phi = \frac{RT}{V_{wo} * W_v} * \ln \left(\frac{\overline{U_v}}{U_{vo}} \right) \quad (3)$$

Donde,

ϕ = Succión total en Kpa.

R = Constante universal de gas [(molar) (8.31432 J/ molK)].

T = Temperatura absoluta $T = (273.16 + t^\circ)$ (K).

t° = Temperatura en $^\circ\text{C}$.

V_{wo} = Volumen Específico del Agua o inverso de la densidad del agua ($1/\rho_w$) m^3/Kg .

ρ_w = Densidad del agua $998 \text{ Kg}/\text{m}^3$ a una Temp. 20°C

W_v = Masa Molecular del Vapor de Agua. (Kpa).

U_v = Presión de Vapor de Agua de Poros. (Kpa).

U_{vo} = Presión de Saturación de Vapor de Agua sobre una superficie de Referencia de Agua Pura a la Misma Temperatura. (Kpa).

El término, $\overline{U_v}/\overline{U_{vo}}$ es llamado humedad relativa, RH (%)⁶.

Para una temperatura de 20°C , el valor constante es igual a 135022 Kpa, entonces:

⁶⁶ Richards, 1965. Citado: por FREDLUND, D.G. & RAHARDJO. Soil Mechanics For Unsaturated Soils, (1993)



$$\varphi = -135022 * Ln\left(\frac{\overline{U}_v}{\overline{U}_{vo}}\right) \quad (4)$$

$\varphi=0$, cuando RH = 100%

Para RH<100%, indica la presencia de succión en un suelo.

4.2.1 Valores típicos de succión. La tabla 4 muestra valores de succión total para un suelo, el cual a menudo forma parte de la subrasante para caminos construidos en Canadá. La arcilla de Regina es altamente plástica y orgánica, con un límite líquido de 78% y un límite plástico de 31%.

Tabla 4. Valores típicos de succión.

Tipo de Suelo	W (%)	φ (Kpa)
Arcilla Regina	Optima 30.6	460
$\gamma_{max} = 13.81 \text{ KN/m}^3$	28.6	556

Los equipos comúnmente usados para la medición de la succión total, matricial y osmótica se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Equipos de medida de succión

Nombre del Equipo	Componente De succión Medida	Rango Kpa
Psicrómetros	Total	100-~8000
Papel filtro	Total	Completo
Tensiometros	Matricial	0-90
Translación de ejes	Matricial	0-1500
Sensores de conductividad térmica	Matricial	0-~400+
Presión de fluido de Poros	Osmótica	Completo



4.3 CAPILARIDAD

El fenómeno de la capilaridad es asociado con la succión matricial componente de la succión total. La altura de ascensión de agua y el radio de curvatura (menisco), tienen una influencia directa sobre la relación entre el contenido de agua versus la succión matricial en los suelos.

4.3.1 Altura capilar. Para entender este concepto consideremos un pequeño tubo de vidrio que es insertado dentro del agua bajo condiciones atmosféricas (figura 2), el agua asciende en el tubo como un resultado de la tensión superficial en la fase contráctil y la adhesividad a la superficie húmeda del tubo de vidrio (propiedades higroscópicas). Esta altura de ascenso es lo que se conoce como altura capilar, y es medida en unidades lineales. La altura capilar se puede calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_S} \quad (5)$$

Donde:

R = Radio del tubo capilar.

T_S = Tensión superficial del agua.

α = Angulo de contacto.

h_c = Altura capilar.

g = Aceleración de la gravedad.

R_S = Radio de curvatura del menisco ($r/\cos \alpha$).

4.3.2 Presión capilar. Los puntos A, B y C, en el sistema de capilaridad, mostrado en la figura 2 están en equilibrio hidrostático. La presión del agua en el punto A y B, corresponde a la presión atmosférica ($A = \mu w$ en B, la cual es igual a



cero). La elevación de los puntos A y B, sobre la superficie del agua es considerado como nivel de referencia para el sistema. Como un resultado, la cabeza hidráulica en los puntos A y B es igual a cero.

El punto C, esta localizado a una altura h_c , del nivel de referencia. El equilibrio hidrostático en medio de los puntos C, B y A, requiere que la cabeza hidráulica de los tres puntos sea igual, es decir que la cabeza hidráulica en el punto C sea igual a cero. Esto significa que la presión de la cabeza en el punto C es igual al valor negativo de la elevación de la cabeza en el punto C. Por lo tanto la presión del agua en el punto C, puede calcularse como:

$$\mu_w = -\rho_w g h_c \quad (6)$$

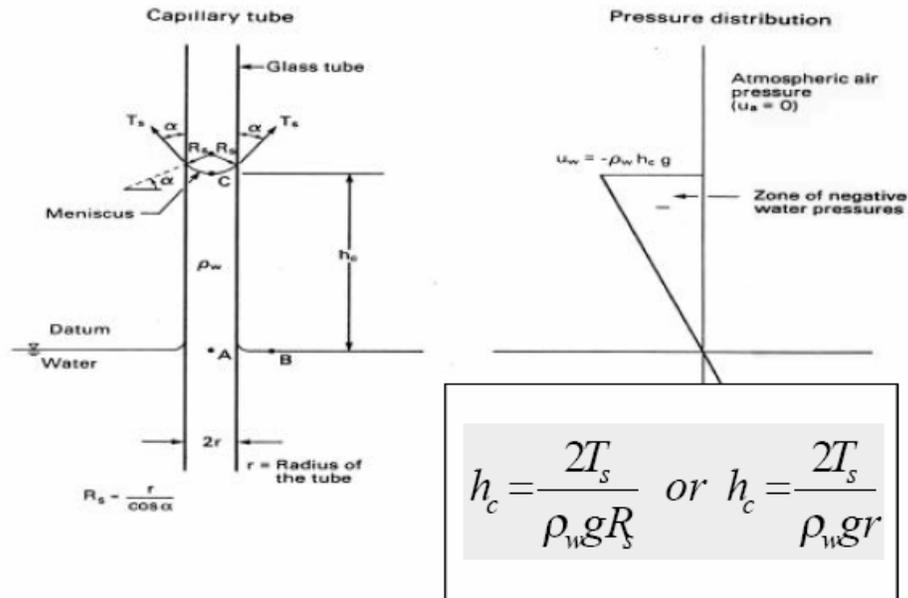
La succión matricial ($\mu_a - \mu_w$), en el punto C, puede ser expresada como:

$$(\mu_a - \mu_w) = \rho_w g h_c \quad (7)$$

Reemplazando h_c , en esta ecuación la succión matricial escrita en términos de tensión superficial es:

$$(\mu_a - \mu_w) = 2T_s/R_s \quad (8)$$

Figura 2. Modelo físico de capilaridad, Tomado de Fredlund, D.G. Soils Mechanics for Unsaturated Soils.



La succión matricial definida por la ecuación 10, esta en función de la fuerza capilar y del radio del menisco. Dicho fenómeno se simulo en el modelo con la ascensión del agua a través del papel filtro.

4.4 RESISTENCIA AL CORTE

La densidad seca (índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura son factores que afectan la resistencia al corte.

El efecto de la succión en la resistencia se puede considerar como un incremento de la rigidez del suelo, producido por la succión intergranular que se genera, que tiende a mantener más fuertemente unidas las partículas.



La resistencia al corte crece con el incremento de succión, que corresponde a un incremento de las tensiones efectivas. Este aumento de resistencia con la succión disminuye progresivamente hasta alcanzar un valor máximo. A partir de ahí se puede producir una ligera disminución de la resistencia hasta cuando el suelo esté completamente seco, en donde desaparece el efecto de succión.

El proceso de la succión como afectación de la resistencia al corte de un suelo también se ve influenciado por las raíces de los árboles, debido al efecto de absorción que realiza la raíz en su proceso de crecimiento y desarrollo del árbol. Este efecto se manifiesta por la presencia de asentamientos y fisuraciones.

Una de las primeras y más utilizadas expresiones para relacionar la resistencia al corte con la succión se debe a Bishop (1960), la cual se basa en el criterio de Mohr – Coulomb:

$$T = C' + (\sigma - \mu_a + X * (\mu_a - \mu_w) * \tan \phi) \quad (9)$$

T = Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

C' = Cohesión efectiva.

ϕ = Ángulo de rozamiento interno efectivo.

X = Parámetro relacionado con el grado de saturación.

μ_a = Presión intersticial del aire.

μ_w = Presión intersticial del agua bajo la atmosférica.

4.5 DEFORMABILIDAD

El aumento de succión contribuye a un incremento de la rigidez y del grado de sobre consolidación del suelo. La succión puede provocar deformaciones plásticas



irrecuperables. En los suelos expansivos los procesos críticos de humedecimiento y secado provocan una expansión irre recuperable (plástica).

La tensión principal (o vertical) controla el hinchamiento experimentado por una arcilla potencialmente expansiva, sometida a una disminución de la succión. La mayor parte del hinchamiento se produce a bajas succiones.



5 MODELO FISICO

El modelo físico realizado en esta investigación tiene como objetivo primordial simular el efecto de la succión de las raíces de los árboles en los suelos compresibles de Bogota. La medición de la succión se realizó mediante el empleo del Psicrómetro. El suelo utilizado en la modelación se preparó llevándolo al límite líquido (LL).

La simulación del sistema radicular y cuerpo del árbol, se realizó con papel filtro tipo Wathman 42, el cual una parte (raíz) se encuentra dentro del suelo y otra (cuerpo del árbol) sobre el suelo. El papel se ubico dentro de una burbuja de vidrio para no permitir que el papel filtro sufriera pérdida de humedad debido al ambiente, ya que el papel tiene la propiedad de saturarse completamente por ascensión capilar, transportando humedad a la parte superior del mismo.

Con el objeto de condensar el caudal a escala, se utilizaron Placas Peltier. Estos son unos dispositivos termoeléctricos que se caracterizan por aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por el circula corriente.

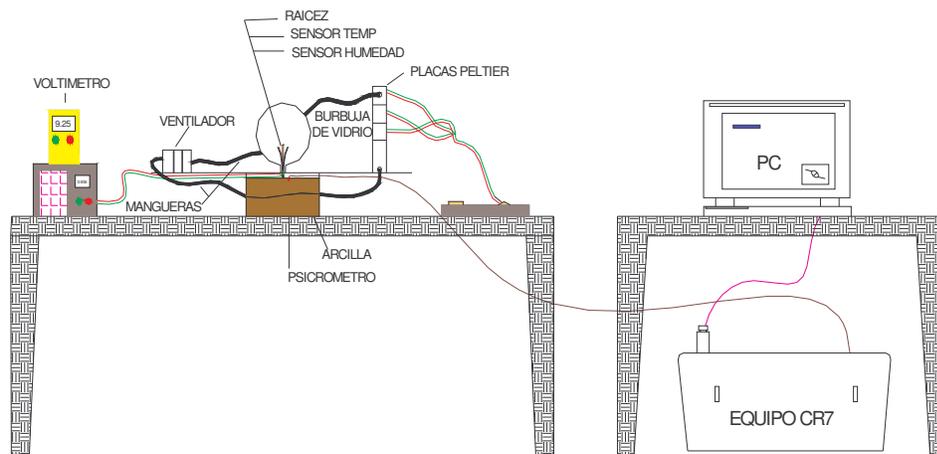
Este modelo se encuentra en un circuito cerrado en donde el aire circundante es producido por un ventilador de 110 voltios. Este aire producido por el ventilador choca contra el papel filtro desprendiendo aire húmedo, continuando su flujo a través de una manguera hasta estrellarse contra las caras frías de las placas Peltier. En donde se baja la temperatura hasta el punto en el cual se inicia la condensación de la humedad contenida en el aire. Este aire es succionado por el ventilador y recirculado nuevamente.

Se emplearon cuatro de placas Peltier de tamaño 5*5 cms, con el objeto de condensar una mayor cantidad de agua. La humedad condensada es extraída del

circuito cerrado y depositada en una pipeta graduada, para luego medir el volumen de agua y obtener el caudal en un determinado tiempo.

Adicionalmente, dentro de la burbuja de vidrio se colocaron dos sensores, con el fin de medir la humedad relativa y la temperatura del modelo (Figura 3)

Figura 3. Modelo físico termodinámico



5.1 MATERIALES

El material empleado para la construcción del modelo fue en acrílico y se utilizó una burbuja de vidrio, empleada en la tesis Modelación Física y Numérica del Efecto de la Succión de los Árboles en los Suelos Blandos de Bogotá.⁷

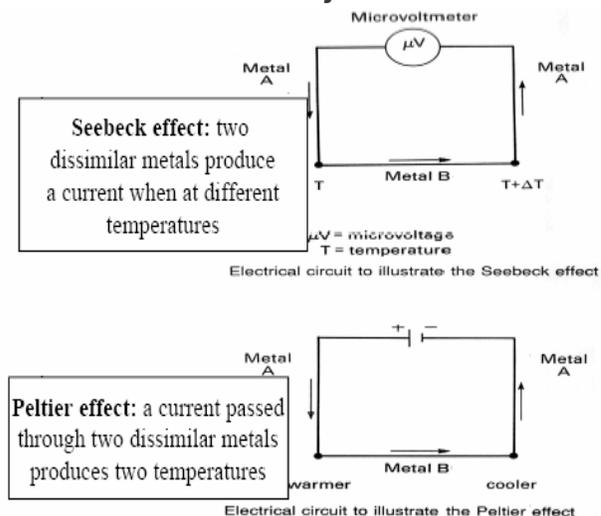
⁷ Nossa P. Efraín & Roa Saavedra Miguel. Modelación Física y Numérica del efecto de los Árboles en los Suelos Blandos de Bogotá.

La muestra de suelo utilizada es una arcilla orgánica (CH), extraída de las calles 190 y 200 de la Autopista Norte de la vía que comunica a Bogotá con la ciudad de Tunja.

5.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES EMPLEADAS EN EL MODELO

5.2.1 Efecto Peltier. El efecto Peltier fue descubierto en el año 1834 por el físico francés Peltier J. C. A, el cual surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán Seebeck T.J. en 1821. Seebeck observó que en un circuito formado por dos conductores distintos aparece entre ambos una diferencia de potencial, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas. Este dispositivo se conoce como termopar. La esencia del efecto Peltier, que básicamente es el contrario del efecto Seebeck, consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua, a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede. El calor que cede el foco caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termo elemento y el calor que absorbe el foco frío. Estos termo elementos, configurados de este modo, constituyen una máquina frigorífica (Figura 4)

Figura 4. Efecto Seebeck y Efecto Peltier.



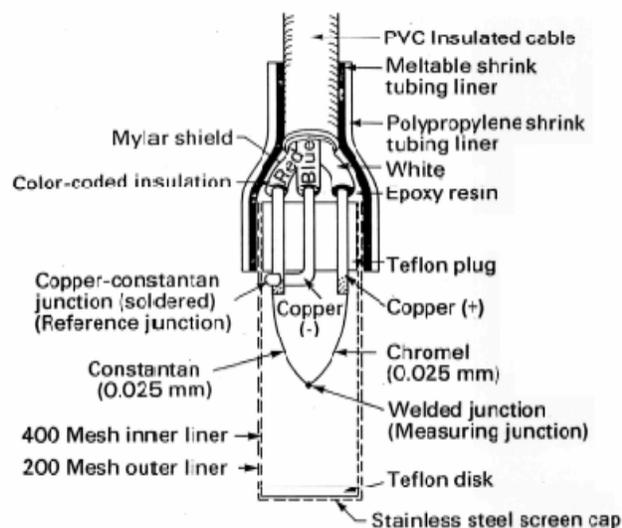


5.2.2 Punto rocío. El aire, en determinadas condiciones de temperatura y presión, es capaz de retener una concentración máxima de vapor de agua. Cuando se sobrepasa este límite el exceso de vapor de agua se condensa, formando agua líquida. Se dice entonces que el aire está "saturado". Si la humedad relativa llega al 100 % (generalmente porque baja la temperatura del ambiente) el aire está saturado de vapor de agua y se alcanza el llamado punto de rocío. En este punto el vapor de agua se licua o condensa. Si el fenómeno ocurre cerca del suelo se forman el rocío, la escarcha, nieblas, neblinas y brumas. Si ocurre en capas más altas de la atmósfera se originan las nubes.

6 PSICROMETRO

El psicrómetro es un instrumento que sirve para medir la humedad relativa de su entorno. Si este instrumento se ubica en una cámara con la muestra o in situ en una cavidad, se puede utilizar para determinar la succión total del suelo (Figura 5). El principio de funcionamiento es el siguiente: haciendo circular una débil corriente en la dirección apropiada, la junta del termopar se enfría por el efecto Peltier hasta alcanzar el punto de rocío, momento en que se condensa entonces una gota de agua. Este proceso toma aproximadamente 15 segundos, después del cual se corta la corriente y se deja evaporar la gota. Al evaporarse el agua toma calor de la junta. La magnitud de la depresión originada depende de la humedad relativa y la temperatura del aire que lo rodea. Esta reducción de temperatura da lugar a una fuerza electromotriz debida al efecto Seebeck que se mide con un psicrómetro Peltier tipo Wescor, operado por un CR7 data logger. Estos son los dos principales componentes del sistema de medición del potencial de agua de un suelo.

Figura 5. Peltier Thermocouple Psychrometer (tomado de Brown and Collins, 1980).





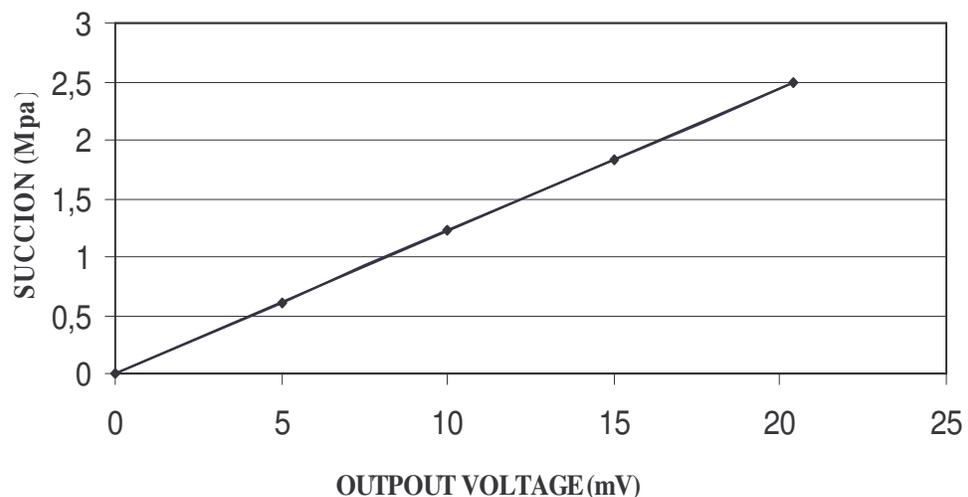
6.1 SOFTWARE DEL PC

El software PC208W, se usa para hacer medidas de potencial de agua empleando el psicrómetro y el data logger (CR7). El formato de la programación esta resumido en el manual del operador del CR7.

6.2 MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración para el sistema de medidas del potencial de agua consiste en transformar medidas de muestras de potencial conocido. Para la calibración del psicrómetro se utilizó una solución de NaCl, con una concentración de 0.5514 molal, equivalente a un potencial de agua de -25.1 BARS o 2510 Kpa. En la figura 6 se muestra la curva de calibración del psicrómetro.

Figura 6. Curva de calibración del Psicrómetro.





6.3 CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA

El método del psicrómetro es altamente dependiente de la temperatura. El procedimiento estándar para ajustar todas las calibraciones y medidas a una temperatura de 25° C, se realiza empleando la siguiente ecuación:

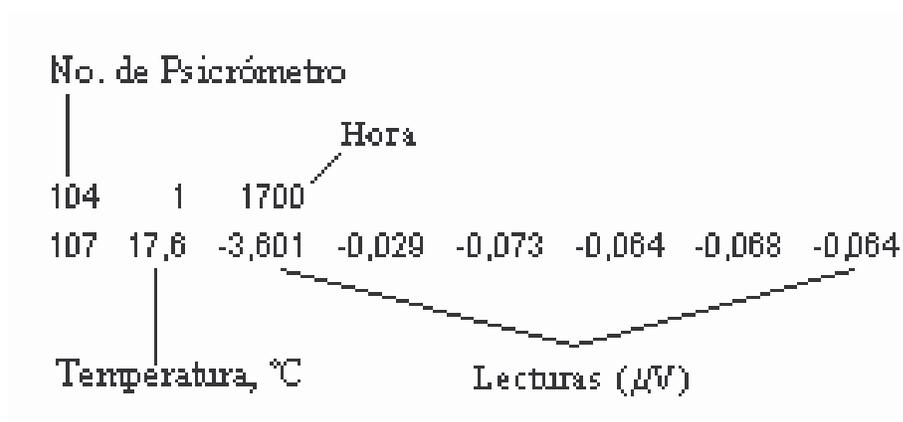
$$Lec.Corre = (Lec.Medida) / (0.325 + 0.027 T) \quad (10)$$

Donde T , es la temperatura a la cual se tomó la lectura.

6.4 FORMATO DE SALIDA DE DATOS

Los datos de salida del psicrómetro tienen el siguiente orden de interpretación, de acuerdo con la figura 8, el primer dato es la temperatura base, y luego la secuencia de lecturas del bulbo húmedo. Estos datos quedan almacenados en un archivo de datos de salida, ubicado previamente por el usuario.

Figura 7. Formato de salida de lecturas del psicrómetro





7 ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 MODELO FÍSICO

De la implementación del modelo físico, se obtuvieron resultados con respecto a los siguientes parámetros:

7.1.1 Temperatura. Para la determinación de la temperatura presente en el modelo se utilizó un sensor tipo LM35, donde los datos de salida en voltios, son linealmente proporcionales a la temperatura en °C.

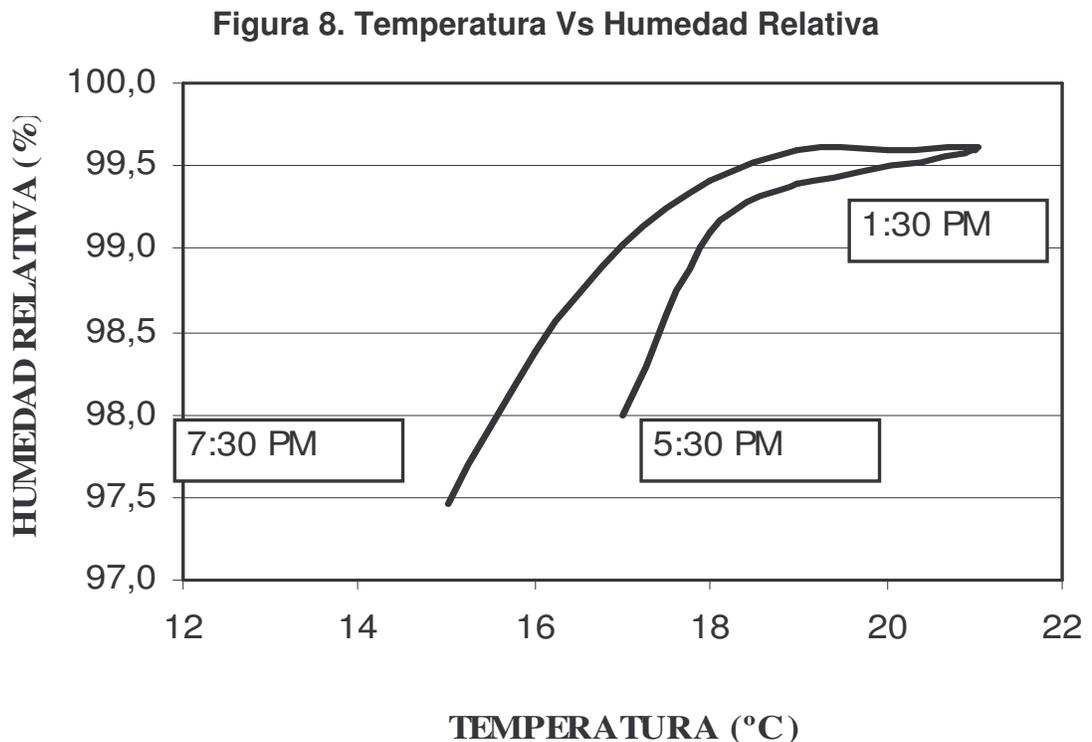
Existe una relación directa entre la temperatura y la capacidad del sensor, con esta relación se determina la constante de calibración del sensor ($10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$). Con esta constante se transforman las lecturas leídas con el voltímetro en milivoltios (mV) a temperatura en °C.

7.1.2 Humedad relativa. Para determinar la humedad relativa en el modelo se empleó un sensor de humedad tipo HIH – 3610, el cual posee un rango de operación entre 0 y 100% de humedad relativa.

7.1.3 Comportamiento de la humedad por efectos de temperatura. El estudio de la temperatura en el movimiento del agua en el suelo, es necesario para diferenciar dos formas de enfocar el problema: La primera consiste en verificar el efecto de la temperatura en el desarrollo de un problema supuesto isotérmico por su parte, la segunda corresponde al estudio del fenómeno asociado a la existencia de un gradiente térmico que a su vez origina un flujo de agua. El movimiento del agua líquida se debe a la variación de la succión con la temperatura, esta variación se origina por la variación de la tensión superficial con



la temperatura y por otra parte a la variación de la presión del aire disuelto y ocluido. Lo anterior se ve reflejado en la figura 8. Al aumentar la temperatura se incremento la humedad relativa presente en el modelo y por lo tanto, se presento mayor condensación de agua.



7.1.4 Deformación de la muestra. La salida del agua de la muestra del suelo debido a la fuerza de tensión capilar ejercida por el papel filtro, se convirtió en vapor de agua al chocar el aire producido por el ventilador con este. Continuando su recorrido en forma gaseosa hasta chocar con las placas Peltier, donde ocurrió la condensación y se presentaron gotas de agua adheridas a las placas.

Luego de transcurrido el primer día de funcionamiento del modelo, se presento un asentamiento de forma cóncava en la muestra de suelo, con una deflexión en el centro (debajo de la raíz), de aproximadamente 1 mm., y en los costados



izquierdo y derecho a una distancia de 10 cm. no se presentó ningún asentamiento. En la superficie del suelo comenzaron a presentarse grietas de tensión debidas al desecamiento del suelo por el fenómeno de la succión, simulado por el papel filtro. El comportamiento del asentamiento es observado en la figura 9. Luego de transcurridos 10 días el asentamiento total en el centro de la muestra es de un (1) centímetro, y en los costados de nueve (9) milímetros, como se observa en la figura 10.

El objetivo específico del modelo Peltier se cumplió, el cual era simular el efecto de la succión generada por la raíz del árbol.

Figura 9. Asentamiento (mm.) Vs. Tiempo (Días), ubicada en el centro de la muestra.

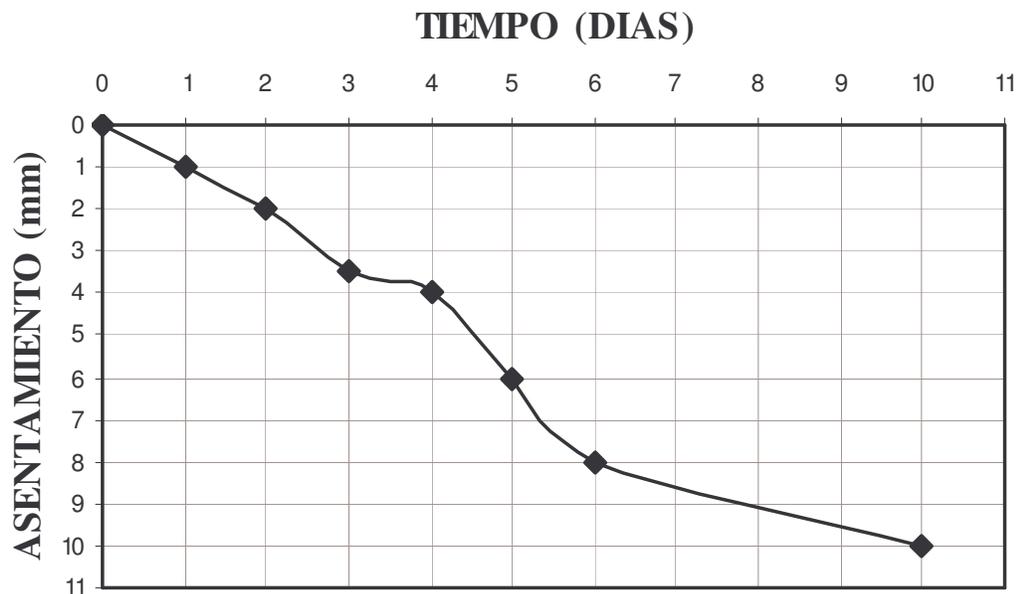
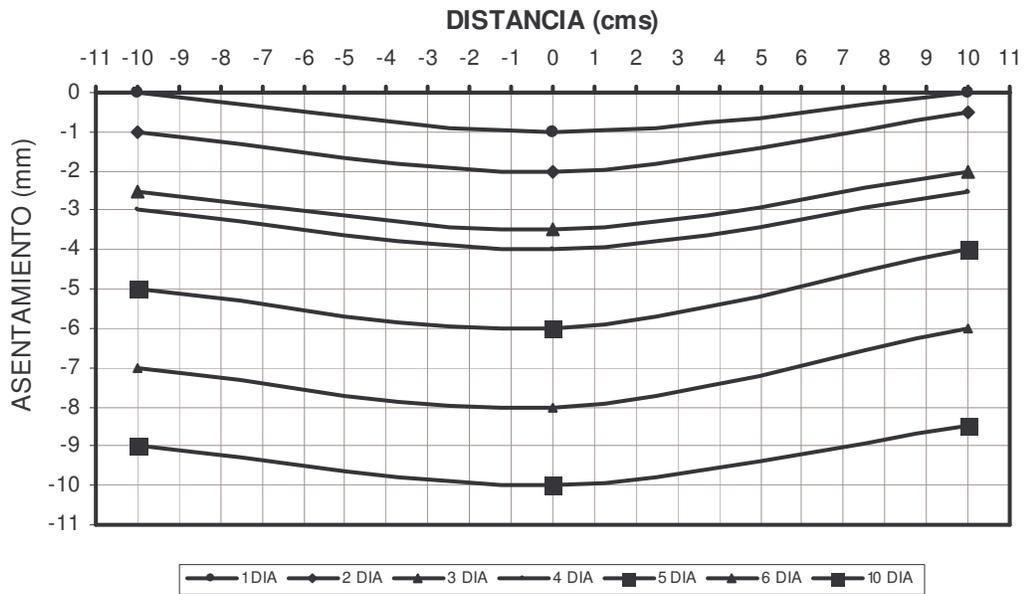




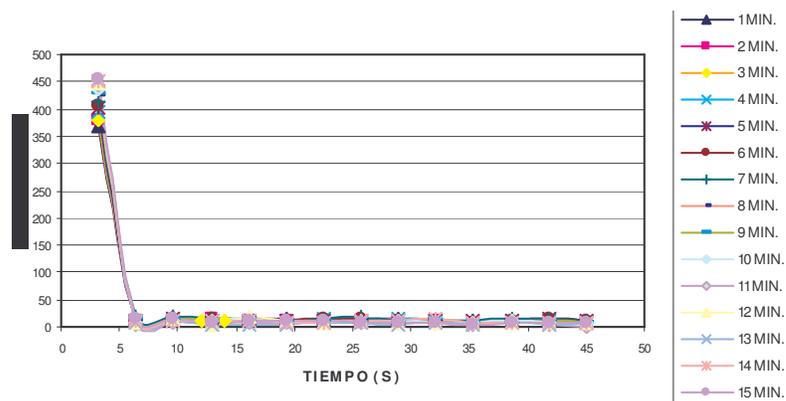
Figura 10. Asentamiento total presentado en el modelo



7.2 PSICRÓMETRO PELTIER

Los datos de salida de las lecturas del psicrómetro, corresponden a un periodo de tiempo de 45 segundos, según la programación que se le dio al instrumento. Los datos de salida se muestran en la figura 11, donde se registra un valor máximo de succión para cada lapso de tiempo de captura de información.

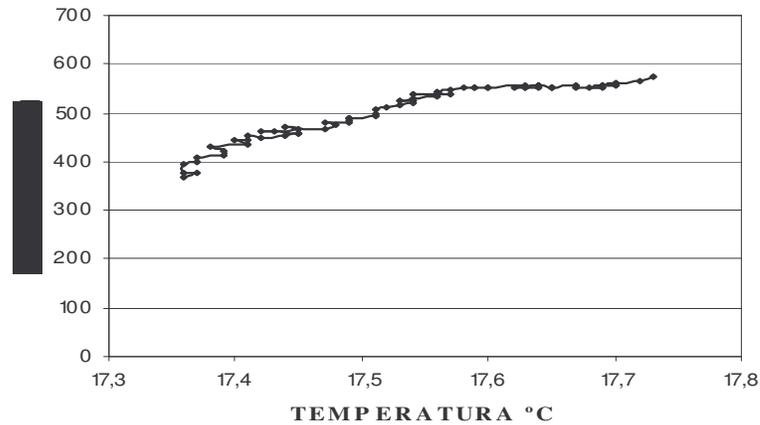
Figura 11. Lecturas de Psicrómetro, para un periodo de 15 minutos.





La Figura 12 muestra una curva de Succión (Kpa) versus temperatura °C, se observa la influencia de la temperatura en las lecturas de succión en Kpa. A medida que esta aumenta se incrementa la succión, esta relación de proporcionalidad era la esperada, y el valor máximo de succión es comparable con el de la arcilla de Regina, la cual presenta unas características similares a la arcilla empleada en el modelo.

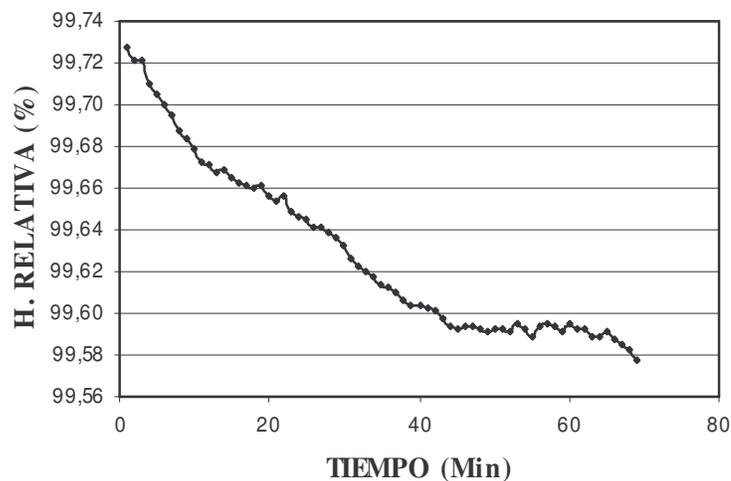
Figura 12. Relación Temperatura Vs. Succión



En la siguientes figuras (13, 14, 15, y 16) se muestran, los resultados obtenidos de la medición de succión en el suelo, mediante la técnica psicrométrica.

En la figura 13, se ve la influencia del tiempo de funcionamiento del modelo, con respecto a la humedad relativa. A medida que este se incrementa disminuye la humedad relativa, esto se debe a la condensación del aire húmedo, al chocar con las placas Peltier.

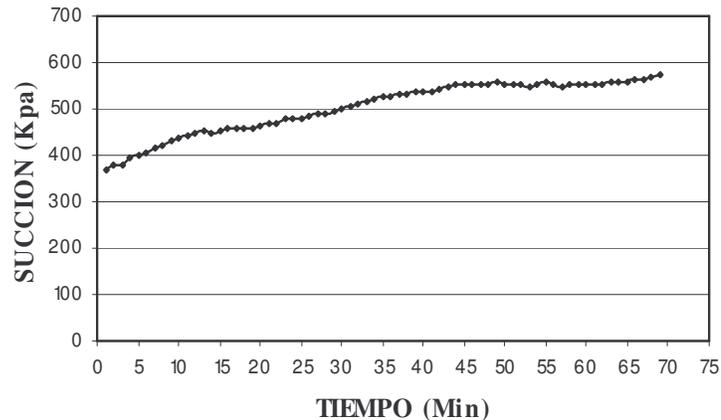
Figura 13. Humedad relativa Vs. Tiempo





En la figura 14, se aprecia que a medida que transcurre el tiempo de funcionamiento del modelo se incrementa la succión del suelo, debido también a la disminución de la humedad relativa.

Figura 14. Succión Vs. Tiempo



En la figura 15, se observa el incremento de la temperatura interna del modelo (dentro de la burbuja), debido al tiempo. Este factor es influenciado por la temperatura del medio ambiente.

Finalmente, se obtuvo la curva que relaciona la humedad relativa en %, versus la succión total en Kpa., para el periodo de tiempo seleccionado, tal como se muestra en la Figura 16. En ella se observa claramente que a medida que disminuye la humedad relativa, se incrementa la succión.

En el suelo ensayado, CH (arcilla orgánica), se determinó un valor de succión promedio de 562 Kpa, el cual es un valor bajo, debido a la alta humedad relativa circundante en el modelo, causado por el alto contenido de humedad presente en el suelo (el suelo se preparo a un valor de humedad natural igual al limite liquido).

Figura 15. Temperatura Vs. Tiempo

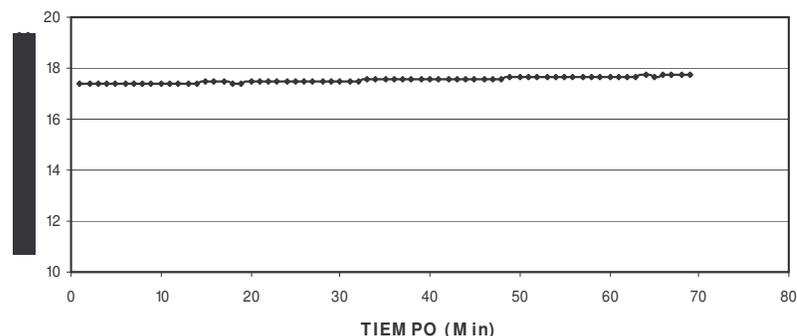
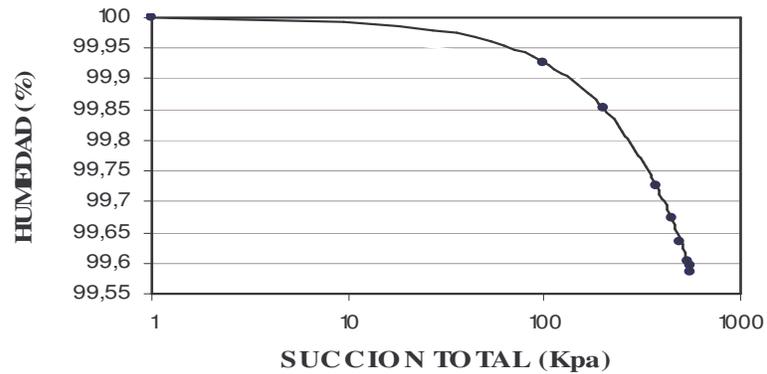


Figura 16. Humedad Relativa Vs. Succión

El valor de la succión que se presentó en la muestra de suelo ensayada se vio influenciado por la temperatura, como se refleja en la figura 12. A medida que la temperatura se incrementaba, aumentaban las lecturas del psicrómetro, las cuales son proporcionales a los valores de succión.

Para una mejor ilustración del proyecto el montaje del modelo y sus efectos se muestran en las fotos 1, 2, 3, 4 y 5

Foto 1. Exploración Geotécnica



**Foto 2. Asentamiento de la Via en la Calle 116
Producto de la Succión**



Foto 3. Modelo Físico





Foto 4. Data Logger CR7



Foto 5. Efectos de Figuración Producidos por la Succión





8. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- El modelo termodinámico de la simulación de la succión ejercida por las raíces de los árboles en los suelos blandos, mediante la utilización de las placas Peltier cumplió con el objetivo específico de comprobar la tensión superficial ejercida por la raíz del árbol. El modelo simuló apropiadamente el fenómeno de evapotranspiración a través del papel filtro, el cual es similar al que realizan las hojas. Dicho fenómeno se evidencia en la desecación, fisuración y asentamiento que presentó la muestra de suelo ensayada, como resultado del efecto de la succión a través del tiempo. La presencia de grietas de tensión provocan daños a las estructuras civiles existentes.
- Los suelos blandos que conforman la subrasante de las estructuras civiles que se construyen en la ciudad de Bogotá, son muy susceptibles al fenómeno de la succión que ejercen las raíces de los árboles, como se evidencia en la investigación llevada a cabo, donde en la superficie del suelo se presentaron grietas de tensión, desecamiento y fisuración. Es necesario conocer la cantidad de agua absorbida para la especie de árbol plantada, con el fin de que las nuevas estructuras civiles construidas no presenten daños causados por este fenómeno. Es de vital importancia que en proyectos donde surjan incertidumbres por el efecto de la vegetación, se apliquen las nuevas técnicas de medición de succión para de esta manera, involucrar en los análisis las variables de estado (matricial y osmótica).
- Se implementó la técnica psicrométrica, para la medida de la succión del suelo ensayado, con el fin de interpretar los cambios volumétricos (desecamiento y expansión) de los suelos finos debidos a la entrada y salida de agua por los efectos ambientales y antropicos. Por medio de esta técnica se pueden



predecir a corto plazo el comportamiento de estos suelos. Para la caracterización de las variables de estado de los suelos, los modelos tradicionales (para los suelos saturados) no contemplan los efectos de la succión matricial causados por los efectos ambientales. Por medio de esta investigación se pretendió ampliar el conocimiento del comportamiento de los suelos parcialmente saturados, que son los que se presentan en nuestro medio.

- Poner en conocimiento a los ingenieros, interesados en el comportamiento de los suelos que existen otras variables de estado externas (ambientales y vegetación), que afectan la resistencia al corte de los suelos, como son la succión matricial y osmótica. Este conocimiento es vital para que sean tenidas en cuenta en sus análisis de capacidad portante de las diferentes estructuras civiles (edificaciones, vías, presas etc.), que en determinado periodo de servicio, pueden afectar las condiciones de diseño óptimo como son: humedad óptima, densidad de compactación, límites de Atterberg, grado de consolidación etc.
- Para una mejor interpretación, se debe implementar un modelo termodinámico que mejore las condiciones de condensación de agua debidas a la succión, con el fin de poder medir el volumen de agua extraído del suelo, lo cual se podría lograr si el aire generado para producir el efecto de condensación se aplicara directamente a todas las placas Peltier, y no como ocurrió en el modelo que solamente el aire húmedo chocaba con la placa Peltier colocada en la parte superior. Se recomienda también implementar el uso de deformímetros (tipo LVDT) en el modelo, para poder predecir de forma exacta la deformación que se presenta, con el propósito de mejorar las medidas de deformación manuales que se hicieron en esta investigación.



BIBLIOGRAFIA

- Bowles, J. 1982. Foundations Analysis and Design. Mc Graw Hill (ed), New York.
- Campbell, .S. 1997. CR7 Measurement and Control System Intruction Manual.Campbell Scientific, Inc (ed).
- Das, B.M. 1990. Principies of Foundation Engineering. P.W.S. Kent (ed), Boston.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. 1993. Soil Mechanics for Un saturated soils. John Wiley & Sons, Inc (ed).
- Hoyos, P.F. 2001. Diccionario Básico de Geotecnia. Hombre Nuevo Editores (ed), Medellín.
- Nossa P. E. Roa S.M. 2003. Modelación Fisica y Numerica del Efecto de los Árboles en los Suelos Blandos de Bogota. Bogota: Universidad de los Andes.



ANEXOS