

Universidad de Chile
Departamento de Ingeniería Civil
Proyecto MECESUP UCH 0303
Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de
Pregrado en Ciencias de la Tierra

Área Temática: Hidrología
Módulo: Balance Hídrico en un Lisímetro de Drenaje
Desarrollado por: Mauricio Cartes / Ximena Vargas
E-mail: mcartes@ing.uchile.cl / xvargas@ing.uchile.cl

Versión Semestre Otoño 2007

Índice

<u>1</u>	<u>ANTECEDENTES</u>	<u>2</u>
1.1	Balance Hidrológico del Suelo	3
1.2	Tensión de Succión del Suelo	4
1.3	Métodos para Determinar la Humedad del Suelo	5
<u>2</u>	<u>EXPERIENCIA PRÁCTICA</u>	<u>8</u>
2.1	Objetivos de la Experiencia	8
2.2	Materiales	8
2.3	Metodología para Determinar el Contenido de Humedad Mediante Tensiómetros	8
<u>3</u>	<u>GUIA DE TRABAJO</u>	<u>15</u>

1 Antecedentes

El ciclo hidrológico es un concepto más bien teórico, pero útil, que corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra. De acuerdo a este concepto, el ciclo hidrológico abarca no solamente el movimiento y distribución del agua dentro de las masas continentales (escorrentía, infiltración, percolación, etc.) sino también el movimiento y circulación desde la hidrósfera a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la litósfera (precipitación) y desde esta última nuevamente a la hidrósfera y la atmósfera (escorrentía, evaporación, transpiración).



Fig. 1.1: Ciclo Hidrológico

Desde el punto de vista global, el ciclo hidrológico es un proceso continuo, pero que contiene elementos de azar y variaciones no continuas o discretas al considerar extensiones o territorios más reducidos. Por ejemplo, en el caso de una cuenca hidrológica, la precipitación, no puede ser considerada como un proceso continuo sino discreto en el tiempo. Sin embargo, subsisten procesos continuos, como la evaporación y evapotranspiración, que ocurren en todo momento, pero con cambios graduales de sus tasas de acuerdo a las variaciones de la energía solar.

Una cuenca (y en general cualquier subsistema hidrológico: subcuenca, tramo de un río, etc) puede describirse y analizarse por medio de un balance hidrológico que no es otra cosa que la aplicación detallada de la ecuación general de balance de masa, o ecuación de continuidad, cuya expresión general es:

$$\frac{dS}{dt} + Q(t) - I(t) = 0 \quad (1.1)$$

Donde que $Q(t)$ representa los insumos o entradas al sistema por unidad de tiempo, $I(t)$ las salidas por unidad de tiempo y dS/dt es la tasa de variación con el tiempo del almacenamiento de masa o volumen en el sistema.

1.1 Balance Hidrológico del Suelo

Supongamos que desde el punto de vista hidrológico el sistema suelo-agua-planta se puede esquematizar como se indica en la figura 1.2.

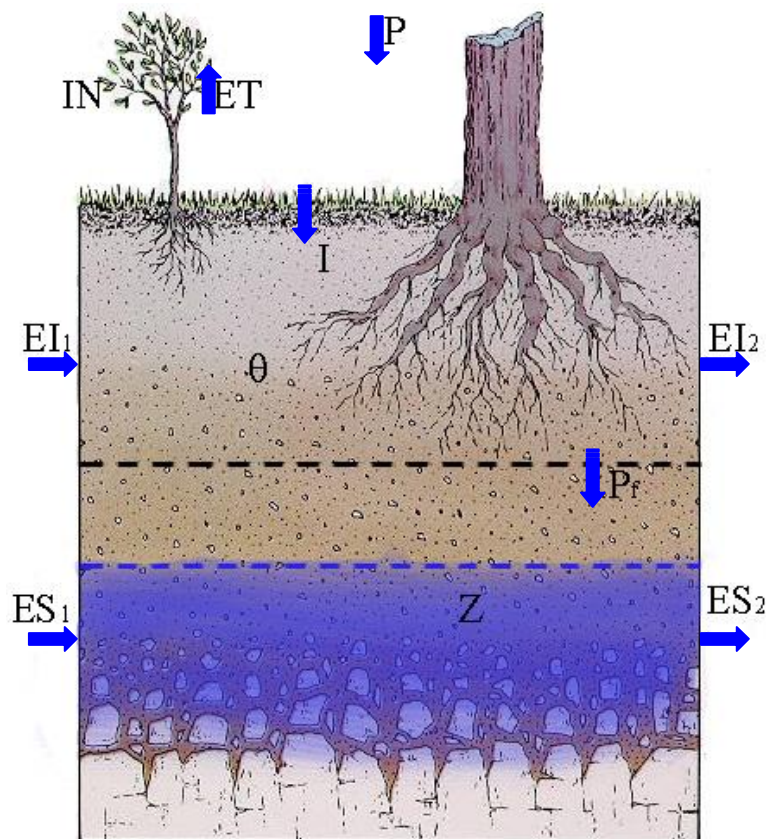


Fig. 1.2: Esquema del subsistema suelo - agua - planta

En que para un cierto período de tiempo Δt :

- P : precipitación
- ET : evapotranspiración
- EI : escorrentía superficial inmediata
- I : infiltración
- θ : humedad del suelo
- P_f : percolación profunda

ES : escorrentía subterránea
IN : intercepción
Z : almacenamiento subterráneo

Aplicando la ecuación de continuidad básica, se puede establecer el siguiente balance hidrológico para este sistema durante un período Δt .

$$P + EI_1 + ES_1 = IN + ET + EI_2 + ES_2 + D\theta + DZ \quad (1.2)$$

Donde $\Delta\theta$ y ΔZ son los cambios en la humedad del suelo y las variaciones del almacenamiento subterráneo, respectivamente, propiedades que tienen relación directa con la tensión de succión del suelo.

1.2 Tensión de Succión del Suelo

La tensión de succión del suelo o potencial mátrico corresponde a la fuerza de unión entre la fase sólida del suelo y la líquida. Esta fuerza es de carácter electrostático, ya que se produce a cargas superficiales negativas que presentan las partículas coloidales del suelo, suficientes como para atraer a las moléculas dipolares de agua. Se presenta con la letra ψ y como es una fuerza por unidad de superficie, se expresa en unidades de presión anteponiendo un signo negativo, pues es una fuerza que se opone al movimiento del agua. Tradicionalmente se le ha expresado en atmósferas¹ y ahora se hace en kilopascales (kPa), en bares o centibares (cbar).

La tensión de succión puede ser llevada a unidades de longitud, ya que es equivalente a la presión de poros h (P/γ) [L], pero con signo negativo:

$$y = -h \quad (1.3)$$

Cuando ya no queda agua utilizable en un poro, sólo permanece el agua higroscópica que está unida a las partículas del suelo por cargas eléctricas. Estas moléculas de aguas permanecen cuando el suelo se seca al aire y sólo puede ser extraída introduciendo una muestra en el horno a una temperatura de 135°C.

Los límites para la humedad aprovechables son los contenidos de humedad a Capacidad de Campo (C.C.) y el Punto de Marchitez Permanente (P.M.P.).

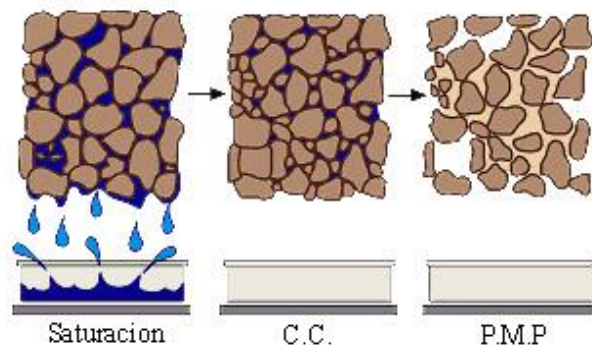
1.2.1 Saturación

Ocurre cuando todo el espacio poroso está ocupado por el agua. La tensión es inferior a 0.3 bares y el agua esta sujeta por la fuerza de gravedad.

(1) 1 atm = 1,01325 bar = 101325 Pa = 10,1325m columna de agua

1.2.2 Capacidad de Campo

Se denomina al contenido de agua en el suelo una vez que ha drenado libremente, aproximadamente 24 a 48 hrs. después de la saturación. Sólo una parte de los poros está llena de agua (microporos). Esta situación se asocia a un potencial matricial en el suelo de 0,3 bares.



1.2.3 Punto de Marchitez Permanente

Corresponde al contenido de agua en el suelo en el cual una planta es incapaz de extraer agua y se marchita sin poder recuperarse al reestablecer el contenido de humedad. El agua está retenida en delgadas películas y con mucha fuerza alrededor de las partículas de suelo asociadas a una potencial de 15 bares.

Tabla 1.1: Contenido de Humedad a C.C y a P.M.P. para distintos tipos de suelo

<i>Textura</i>	<i>C.C. (%)</i>	<i>P.M.P (%)</i>
<i>Arcilla</i>	23-46	13-29
<i>Franco Arcillosa</i>	18-23	9-10
<i>Franca</i>	12-18	4-11
<i>Franco Arenosa</i>	8-13	4-6
<i>Arena</i>	5-7	1-3

1.3 Métodos para determinar la humedad del suelo

Los métodos para determinar la humedad del suelo se dividen en dos grandes grupos:

- Métodos Directos
- Métodos Indirectos.

Los métodos directos miden la cantidad de agua que hay presente en el suelo, mientras que los métodos indirectos estiman la humedad mediante una calibración entre humedad y una propiedad física que es más fácil de medir, por ejemplo, la tensión con la que el agua se adhiere al suelo.

1.3.1 Métodos Directos

1.3.1.1 Método Gravimétrico

Es el más exacto de todos, de hecho se utiliza para calibrar otros, pero tiene la desventaja de ser muy lento y además inevitablemente se destruye la muestra de suelo. El procedimiento es el siguiente:

- Se toman muestras de suelo in-situ.
- Se pesan las muestras obteniendo el peso natural del suelo (M_t)
- Se secan las muestras de suelo en horno a 105°C
- Se pesan las muestras obteniendo el peso seco (M_s)

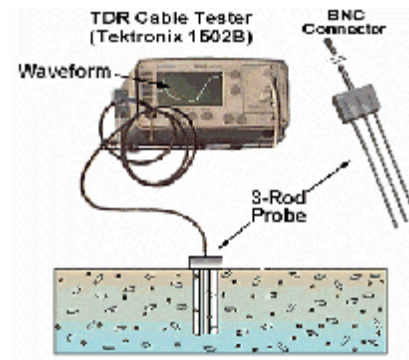
Luego la humedad del suelo se determina como:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (1.4)$$

Donde: $M_w = M_t - M_s$

1.3.1.2 Reflectometría

Se basa en la relación que existe entre el contenido de humedad y su constante dieléctrica. La constante dieléctrica del suelo (K_a) se mide aplicando al suelo una onda electromagnética de alta frecuencia, mediante una sonda T.D.R (Time Domain Reflectometry) la cual mide la velocidad de propagación de la onda.



1.3.1.3 Método de Campo

Este método es el más básico de todos ya que consisten en tomar una muestra y analizarla cualitativamente, de forma de asociar un rango de humedad a la muestra de suelo que permita comparar con algún otro método más preciso.



1.3.2 Métodos Indirectos

1.3.2.1 Tensiómetros

Este instrumento mide la tensión con la que el agua se encuentra adherida al suelo (potencial matricial). El rango en que funciona un tensiómetro generalmente es de 0-100cbares. No son adecuados para suelos secos. La humedad se obtiene relacionando la tensión con el contenido de humedad mediante lo que se denomina curva de retención de agua, la cual se confecciona en un laboratorio.



1.3.1.2 Bloques de resistencia

Se trata de utilizar bloques confeccionados con algún tipo de material, generalmente yeso. La operación de estos bloques se basa en el hecho de que la conductividad de los bloques aumenta a medida que la cantidad de agua en el suelo absorbida por bloque aumenta.

2 Experiencia Práctica

2.1 Objetivos de la Experiencia

- Familiarizar el uso y modo de operación in situ de equipos ampliamente utilizados en hidrogeología y agronomía, como son los tensiómetros.
- Cuantificar los volúmenes de agua referidos a la humedad del suelo y a la percolación profunda. Para ello se utilizará una estructura experimental ubicada en las inmediaciones del Departamento de Ingeniería Civil
- Determinar el volumen de agua producto de la evaporación.
- Evaluar los diferentes volúmenes de agua en porcentaje.

2.2 Materiales

Los materiales que se usarán en esta experiencia son los siguientes:

- Tensiómetro de 30cm
- Tensiómetro de 60cm
- Tensiómetro de 90cm
- Estructura experimental (lisímetro)
- Probeta

2.3 Metodología para Determinar el Contenido de Humedad Mediante Tensiómetros

Como se mencionó anteriormente, los tensiómetros son instrumentos que permiten obtener directamente el contenido de humedad del suelo puesto que miden la tensión o energía a la que el agua está retenida por las partículas del suelo y no la humedad directa.

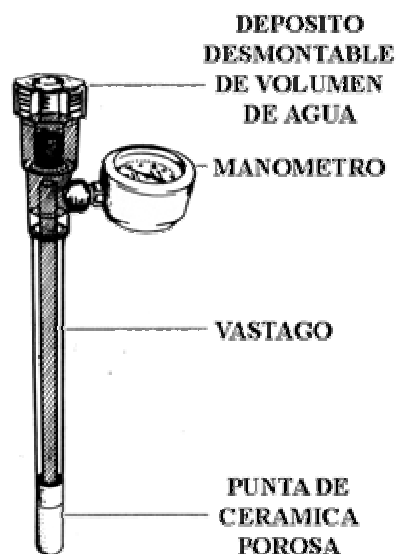
Para obtener el contenido de humedad del suelo en la zona no saturada mediante los tensiómetros se hace necesario de una relación entre la tensión de succión del suelo o potencial matricial y su contenido de humedad, la cual puede ser obtenida mediante la confección de una curva de retención de agua.

2.3.1 Determinación del potencial matricial o fuerza de retención del suelo

El tensiómetro es un instrumento que se introduce en el suelo y permite medir la energía o tensión con la que el agua se encuentra retenida por las partículas del suelo.

Está constituido por cuatro partes principales:

- a. Depósito de agua: se atornilla en la parte superior del tensiómetro. Contiene una goma sellante que permite el cierre hermético del depósito.
- b. Manómetro o vacuómetro: se ubica en el extremo superior del tubo. Este dispositivo permite medir succión (o tensión) al generarse un vacío dentro del tensiómetro. Posee una escala de 0 a 100 cbar.
- c. Vástago (tubo): este tubo se llena totalmente de agua y se cierra de forma hermética.
- d. Cápsula de cerámica porosa: ubicada en el extremo inferior del tubo. Debe estar en íntimo contacto con el suelo para permitir la salida y entrada del agua, desde y hacia el tensiómetro.



Existen tensiómetros de diferentes magnitudes según la necesidad (30, 60, 90cm, etc.).

Una vez que el tensiómetro es llenado con agua y se le inserta en el suelo, el agua se puede mover dentro y fuera del instrumento a través de los poros de la punta conforme se va secando el suelo, el agua se mueve hacia fuera del tensiómetro, creando un vacío dentro del instrumento el cual es indicado en el manómetro.

Cuando el vacío producido equivale a la succión del suelo, el agua deja de fluir fuera del tensiómetro. El manómetro leerá lo que es conocido como una medida directa de la fuerza requerida para remover el agua del suelo. Si el suelo se seca más, más agua se moverá hacia fuera hasta que alcance un nivel de vacío más alto.

Cuando se agrega agua al suelo se lleva a cabo el proceso opuesto. El agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros de la punta de cerámica reduciendo el nivel de vacío hasta igualar el valor de succión más bajo. En este punto el movimiento de agua se detiene. Si se agrega suficiente agua al suelo hasta el punto de saturación, la lectura del manómetro en el tensiómetro bajará a cero.

En la tabla 2.1 se presentan rangos de tensión del suelo para distintas condiciones de disponibilidad de agua.

Tabla 2.1: Interpretación de las lecturas del Tensiómetro

<i>Lectura [cbar]</i>	<i>Condición del Suelo</i>
0-10	Saturado
10-25	Capacidad de Campo
25-50	Zona Intermedia, buena disponibilidad de agua
50-80	Seco

2.3.2 Curva de Retención de Agua

Esta curva describe la capacidad del suelo de almacenar y liberar agua, y corresponde a la relación entre el contenido volumétrico de agua presente en el suelo y la succión presente en la matriz de suelo (Rawls et al., 1993). Existe una gran variedad de ecuaciones que describen la forma de la curva de retención. En especial, la siguiente expresión muestra el modelo propuesto por Van Genuchten para la curva de retención de agua.

$$q(h) = \begin{cases} q_{res} + \frac{q_{sat} - q_{res}}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^m} & parah < 0 \\ q_{sat} & parah > 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde:

θ_{sat} : contenido volumétrico saturado del agua, equivalente a la porosidad del suelo [L^3/L^3]

θ_{res} : contenido volumétrico residual de agua, corresponde a la humedad del suelo para un nivel mínimo de presión interna [L^3/L^3]

$m = 1 - 1/n$, donde n es un parámetro empírico

α : factor de escala [$1/n$]

La curva de succión puede ser generada utilizando el método de la “olla y plato de presión” (figura 2.1).

Este método se compone de una olla o cámara que, cerrada herméticamente, recibe presión de aire o un gas inerte (N) desde un compresor. De esta manera, aplicando una presión se simula la condición de succión a la cual se ve sometida el agua en el suelo. Se utilizan platos de presión, los cuales están compuestos por un plato de cerámica poroso, cuya cara inferior está cubierta por un delgado diafragma de neopreno, con una red interna entre el plato y el diafragma que permite el flujo de agua. Un tubo interno comunica este conducto con un tubo de flujo externo que conecta la olla con la atmósfera.

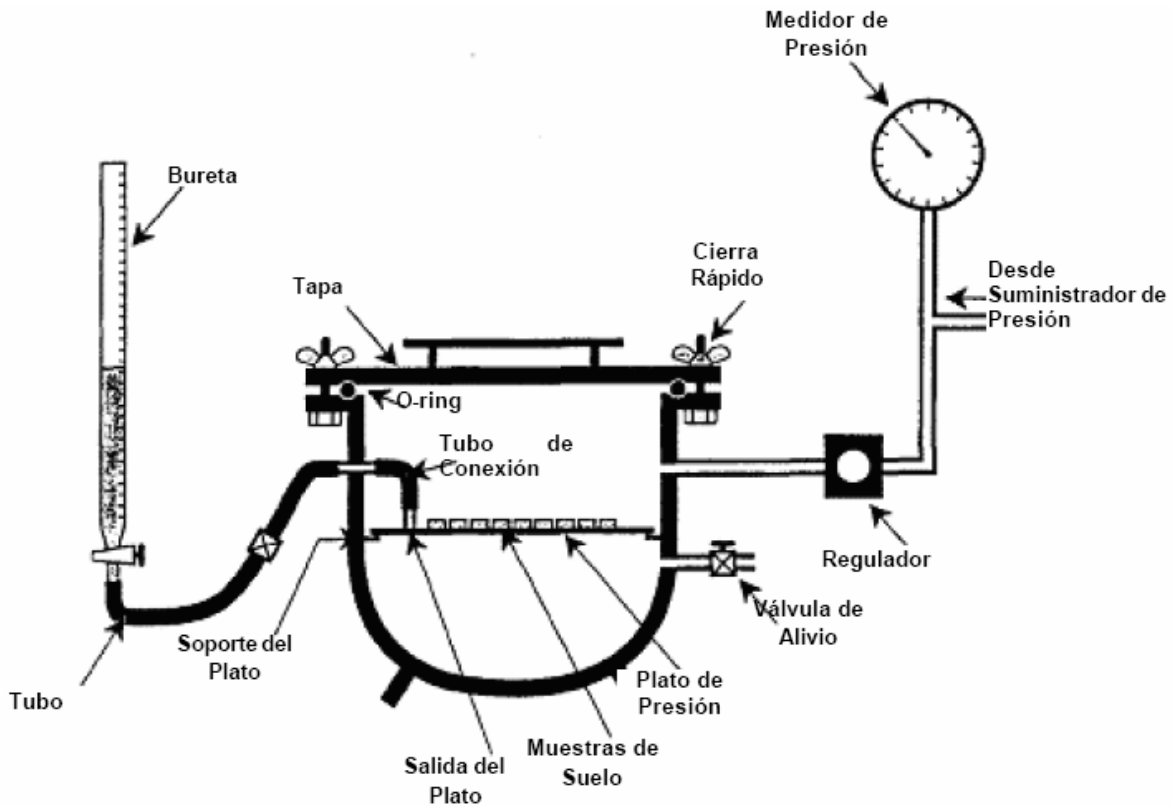


Figura 2.1: Sistema para determinar la curva de retención de agua en el Suelo.

Los poros del plato permiten que se forme una continuidad líquida con los poros del suelo analizado, para así poder evacuar el agua que es desplazada desde el suelo por la presión ejercida por el aire comprimido. El agua desplazada, corresponde a aquella fracción de agua del suelo que no es capaz de retener a una presión dada. De igual forma, el agua que se queda retenida por el suelo a una determinada tensión. Una vez equilibrada las muestras a una presión determinada se secan y se determina su contenido de agua. Repitiendo este procedimiento para diferentes presiones, es posible de generar la curva característica del suelo (Facultad de Agronomía, U.de Chile, 2003).

Las muestras antes de ser ubicadas dentro de la olla, deben ser secadas al aire, molidas y tamizadas a 2mm.

El método contempla ubicar una o más muestras de suelo con tres repeticiones en la superficie del plato cerámico. Dentro de los puntos típicos utilizados para definir la curva de succión se tienen el de saturación, capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La figura 2.2 muestra la curva característica para un suelo arcilloso y uno arenoso. Ambos suelos a C. de C. tienen distinto contenido de humedad, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso, sin embargo, la tensión o potencial mátrico a que está retenida esta agua es el mismo, -0.33 bares. De igual forma ambos suelos a P.M.P. tienen distinto contenido de humedad, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso.

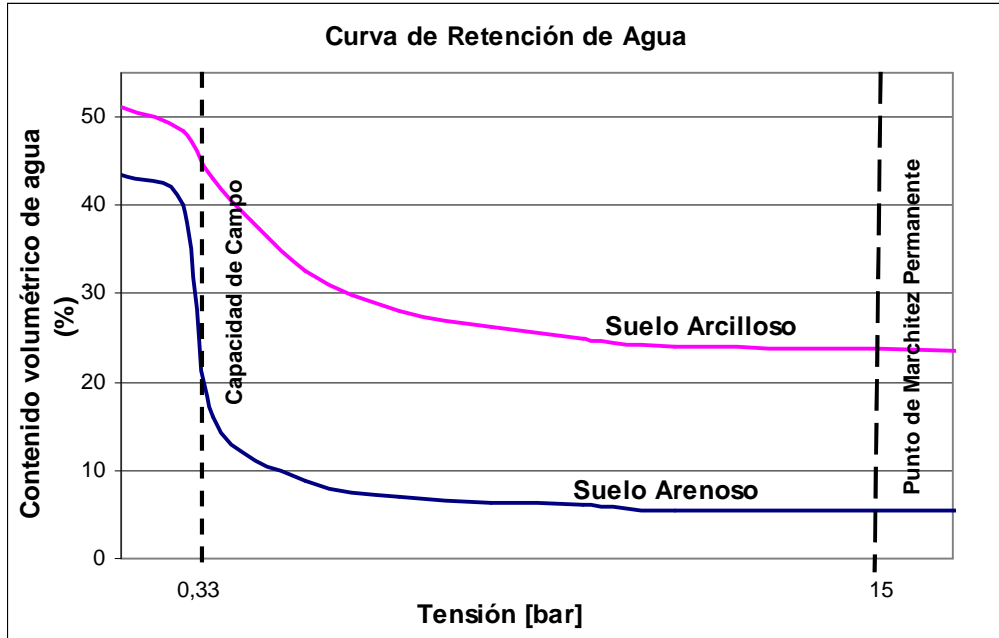


Figura 2.2: Curvas de Retención de Agua.

2.3.3 Lisímetro de Drenaje



El lisímetro es una estructura con forma cuadrada de lado 1,0m en la superficie y altura de 0,9m (figura 2.3), la cual contiene un suelo característico y permite el flujo libre de la parte superior a la parte inferior.

El espesor h de la capa de suelo a estudiar es de 0,6m.

Figura 2.3

En la estructura se ubican tres tensiómetros de diferentes longitudes a diferentes profundidades como se muestra en la figura 2.4. Estos se distancian a 0,15m entre si verticalmente.



Figura 2.4: Ubicación de los Tensiómetros

A è Tensiómetro de 30 cm

B è Tensiómetro de 60 cm

C è Tensiómetro de 90 cm

La capa de suelo se desarrolla 0,15m por debajo del tensiómetro C y 0,15m sobre el tensiómetro A. En la parte inferior, se ubica una canaleta, que permitirá conducir el agua proveniente de la percolación profunda hacia una probeta graduada. En la parte superior, se ubica una boca de salida, que permite conducir el agua que no se infiltra hacia una probeta graduada.

3 Guía de Trabajo

Durante la experiencia se instalará un tensiómetro de 30cm en las inmediaciones del edificio de Civil.

Luego se medirán las diferentes lecturas de los tensiómetros ubicados en el lisímetro.

Además se medirán los diferentes volúmenes de agua almacenados en los recipientes correspondientes a la escorrentía superficial y percolación profunda.

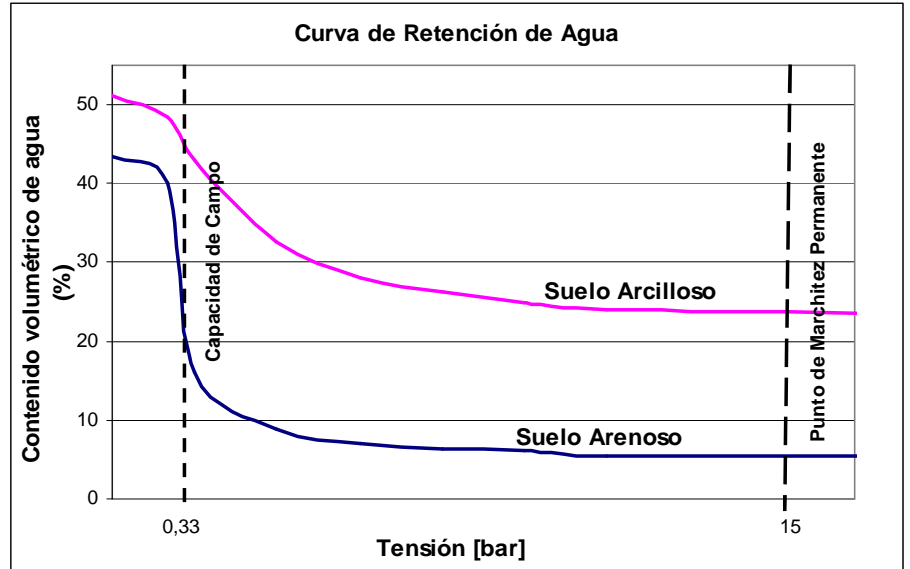
Una vez realizadas las mediciones, como trabajo post-experiencia se deben calcular los Volúmenes de agua almacenados en los diferentes perfiles del suelo mediante la curva de retención de humedad (datos Tabla 3.1).

Finalmente se debe elaborar un informe explicativo de la experiencia, señalando claramente los diferentes volúmenes de agua involucrados en el balance, comentando la metodología empleada y posibles aplicaciones de esta.

Análisis.

Tabla 3.1: Resultados Análisis “Retención de Agua”

	<i>Retención de Agua %</i>
<i>C.C. (33 [cbar])</i>	<i>25,8</i>
<i>P.M.P. (1500 [cbar])</i>	<i>13,6</i>



Condiciones Iniciales (48 hrs. antes de las mediciones):

1. Antes de verter agua

Volumen de Agua en el suelo: _____ [cm³]

2. Luego de verter agua

Volumen de Agua vertido en el lisímetro: _____ [cm³]

Volumen de Agua almacenado por escorrentía superficial: _____ [cm³]

Volumen de Agua almacenado por percolación profunda: _____ [cm³]

Resultados

<i>Lecturas Tensiómetros</i>	<i>- h [cbar]</i>	<i>% Agua</i>	<i>Volumen capa suelo</i>	<i>Volumen Agua</i>
<i>A</i>				
<i>B</i>				
<i>C</i>				

Volumen de Agua almacenado en el suelo: _____ [cm³]

Volumen de Agua almacenado por percolación profunda: _____ [cm³]