



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

Instituto de Geología

Departamento de Edafología

The logo of the Instituto de Geología is a circular emblem. It features a central landscape with mountains, a city, and a river. The emblem is flanked by two crossed hammers. The text 'INSTITUTO DE GEOLOGIA' is written around the perimeter of the circle.

Manual de Procedimientos Analíticos

Laboratorio de
Física de Suelos

Dra. Lourdes Flores Delgadillo
flordel@servidor.unam.mx

Téc. Jorge René Alcalá Martínez
jrene@servidor.unam.mx

Contenido

	Página
Agradecimientos	
1. Introducción general	3
2. Instrucciones para el laboratorio	3
3. Instrucciones para el muestreo	4
4. Determinaciones físicas en laboratorio	5
4.1 Humedad del suelo	5
4.2 Densidad de partículas	6
4.3 Porosidad del suelo y términos relacionados	8
4.4 Distribución del tamaño de los poros	9
4.5 Análisis del tamaño de las partículas del suelo	11
4.6 Curva característica de humedad	21
4.7 Conductividad hidráulica saturada	25
4.8 Consistencia del suelo	29
4.9 Color del suelo	32
5. Determinaciones físicas en campo	
5.1 Densidad aparente	36
5.2 Humedad volumétrica	38
5.3 Resistencia a la penetración	41
5.4 Conductividad hidráulica	44
5.5 Reflectancia e irradiancia	54
6. Referencias bibliográficas	56

Agradecimientos

Los autores de la presente recopilación (metodologías actualizadas para la construcción del este Manual de Procedimientos Analíticos), expresan su más sincero agradecimiento a la Dra. Blanca Prado Pano, por la revisión crítica y sugerencias para mejorar la calidad de este Manual.

1. Introducción general

La caracterización física de los suelos tiene como objetivo principal establecer la respuesta del suelo a las prácticas asociadas en los diferentes sistemas de producción, así como evaluar la susceptibilidad de los suelos a sufrir algún proceso de degradación.

Las propiedades físicas del suelo están relacionadas con la capacidad que tiene éste para ofrecer diferentes usos que sean de provecho para el ser humano. Para el buen uso, conservación, manejo y recuperación del recurso suelo, se requiere de conocer los fundamentos primordiales de las características físicas del suelo. La productividad de un suelo no sólo depende de sus contenidos nutrimentales, sino también, de las condiciones físicas del mismo, condiciones que en ocasiones, no se determinan. Hay que recordar, que el desarrollo de la parte aérea de una planta depende del desarrollo de la raíz la que, a su vez, dependerá de que el suelo tenga un buen balance de aireación y humedad.

El presente manual pretende ser una guía para estudiantes y académicos que requieran hacer evaluaciones de algunas propiedades físicas de los suelos. Por lo tanto, se presentan los procedimientos analíticos para estimar y determinar, tanto en campo como en laboratorio, las principales propiedades físicas del suelo.

No existe una estandarización de todos los métodos de caracterización física. Sin embargo, toda la metodología que se presenta en este manual, está documentada por el Laboratorio de Levantamiento del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Burt, 2004), y por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (Dane and Topp, 2002).

2. Instrucciones para el trabajo en el laboratorio de física de suelos

Dentro de los cuidados que se deben de tener en un laboratorio de suelos se mencionan, principalmente, los siguientes:

- No tirar suelo en los lavaderos o tarjas. El suelo debe vaciarse en recipientes de desecho para posteriormente ser llevado al exterior.

- Asegurarse de que los instrumentos estén calibrados y estandarizados en su punto de referencia.
- Asegurarse de que las balanzas estén niveladas.
- En el caso de la olla y membrana de presión, asegurarse de que no existan escapes de aire en las tapas o en alguna conexión (ver con detalle las sugerencias en la sección 4.6.6 de este manual).

3. Instrucciones para el muestreo

Tradicionalmente, los análisis de suelos se realizan en una muestra disgregada, secada al aire y pasada por un tamiz de 2 mm (plasticidad y composición química, entre otras). Algunas propiedades del suelo, por ejemplo la temperatura, pueden ser medidas en un punto; mientras que, otras propiedades son altamente dependientes del volumen, como por ejemplo la porosidad del suelo. En el caso de la estructura del suelo, el análisis deberá llevarse a cabo sobre una muestra no perturbada, donde la porosidad original del material no haya sido alterada.

Si esta porosidad original del suelo se establece con base en muestras de volumen pequeño, es muy posible seleccionar aleatoriamente una muy baja o muy alta porosidad; es decir, el volumen de la muestra no es lo suficientemente representativo como para permitir la caracterización completa de la porosidad de la masa de suelo. Por lo tanto, se requeriría una muestra más grande. El volumen mínimo aleatoriamente seleccionado que conserva los rasgos de porosidad del volumen completo del sitio es llamado **Volumen Elemental Representativo (REV)**. Obviamente, el REV tiende a ser mayor en suelos que están fuertemente agregados, pedregosos, agrietados, o extremadamente heterogéneos, que en suelos más uniformes. El problema con el concepto REV es que diferentes propiedades del suelo pueden exhibir diferentes patrones espaciales o temporales, de manera que, el REV para un parámetro del suelo puede diferir del REV para otros parámetros. Cada propiedad del suelo puede tener su propia escala característica de medición. Sin embargo, en terrenos que varíen sistemáticamente en una dirección o en otra, el incrementar el tamaño de la muestra, muy probablemente, no produzca un valor consistente en todas sus propiedades.

3.1 Conservación de una muestra de suelo

Cuando algunas determinaciones de laboratorio no puedan realizarse poco después del muestreo, o muestras inalteradas de suelo tengan que ser almacenadas por largos períodos con su contenido de humedad de campo, es recomendable inhibir la actividad biológica en el suelo, adicionando directamente a la muestra, unas gotas de óxido de propileno, taparlas y preservarlas en refrigeración (5° C). La actividad biológica tiene efectos importantes en los valores de conductividad hidráulica, densidad aparente y curva de retención de humedad, principalmente, debidos a un incremento en la macroestructura del suelo por el

desarrollo de lombrices, o a un decremento en la porosidad por el desarrollo de algas y bacterias. El óxido de propileno no causa cambios en la viscosidad del agua, en la tensión superficial del agua, y/o en la humectabilidad del suelo.

4. Determinaciones físicas en laboratorio

4.1 Humedad del suelo

4.1.1 Introducción

La humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión total de agua y color del suelo. La humedad del suelo es muy dinámica y depende del clima, vegetación, profundidad del suelo, y de las características y condiciones físicas del perfil. Se entiende por humedad del suelo a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo.

La humedad del suelo se puede expresar gravimétricamente, con base en la masa, o volumétricamente, con base en el volumen. La humedad gravimétrica (w) es la forma más básica de expresar la humedad del suelo. Tiene las unidades de kg kg^{-1} . La humedad volumétrica, generalmente, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f} \qquad V_f = V_a + V_w$$

donde V_w es el volumen del agua, V_s volumen de sólidos, V_f volumen de poros, y V_t el volumen total de la muestra representativa.

4.1.2 Materiales

Balanza granataria con aproximación de 0.01 g

Estufa para secar suelo a 105-110° C

Recipientes de aluminio

4.1.3 Procedimiento

La masa de suelo secada en estufa se obtiene colocando una muestra de suelo en la estufa a 105-110° C hasta obtener el peso constante de la muestra que, en la mayoría de los suelos, se logra entre 24 y 48 horas, dependiendo del tamaño de la muestra. A este estado se le denomina “suelo seco” y es de naturaleza constante y reproducible bajo varias condiciones ambientales. Varios análisis químicos utilizan como base la masa de suelo secada en estufa. Para obtener esta información sin alterar la naturaleza de la muestra de suelo al colocarla en la estufa, se acostumbra tomar una cantidad de suelo para determinar la humedad de la muestra, adecuadamente mezclada, en su estado de humedad “secada al aire”.

4.1.4 Cálculos

$$w = \frac{M_{ag}}{M_s} = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}} = \left(\frac{M_{sh}}{M_{ss}} - 1 \right) 100$$

donde w es el contenido de humedad gravimétrica, M_{ag} es la masa del agua, M_s es la masa de los sólidos, M_{sh} es la masa de suelo húmedo, M_{ss} es la masa de suelo secado en estufa.

Para efectos prácticos, la humedad volumétrica se puede calcular utilizando la siguiente relación:

$$\theta = w(\rho_b / \rho_w)$$

donde ρ_b es la densidad aparente del suelo, ρ_w es la densidad del agua (1000 kg m⁻³) a presión y temperatura estándar.

4.2 Densidad de las partículas del suelo

4.2.1 Introducción

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad. La densidad de la fase sólida del suelo está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos.

$$\rho_p = M_s/V_s$$

Los valores típicos varían de 2.5 a 2.8 Mg/m³, siendo 2.65 Mg/m³ el valor representativo de muchos suelos y el valor de densidad de partícula para el cuarzo. La densidad de las partículas no proporciona información acerca de los procesos físicos del suelo. Sin embargo, es un valor muy útil que participa en el cálculo de propiedades del suelo como la porosidad y la distribución del tamaño de las partículas. La mayoría de los métodos estándares señalan la remoción de la materia orgánica, de tal manera que, la densidad de las partículas refleje solamente la fase mineral. Éste es el mejor valor para utilizarse en el análisis del tamaño de las partículas, pero quizás no sea el mejor valor para el cálculo de la porosidad. El incluir la fracción orgánica en esta determinación significa que los valores obtenidos pueden cambiar con las prácticas de manejo del suelo.

La determinación más común utiliza un picnómetro o matraz volumétrico. Un picnómetro (gravedad específica volumétrica) es un pequeño recipiente de vidrio con tapa. Esta tapa presenta un capilar que sirve para desalojar el exceso de agua. Algunas veces, los picnómetros presentan un termómetro en la tapa como parte integral y, en el cual, el mercurio siempre está en contacto con el agua del matraz. Cuando la muestra de suelo es abundante, se pueden utilizar matraces aforados de 25, 50 o 100 ml en lugar del picnómetro, lo cual ayuda a compensar la disminución en precisión del volumen del líquido.

4.2.2 Materiales

Picnómetros o matraces volumétricos de 25 ml

Desecador al vacío

Bomba de vacío

Balanza analítica

Suelo tamizado (2 mm) y seco en estufa (110° C)



Figura 4.2.1. Picnómetro



Figura 4.2.2. Desecador con vacío

4.2.3 Procedimiento

1. Pesar un picnómetro limpio y seco (Fig. 4.2.1), y adicione 10 g de suelo seco, si es de textura gruesa, o 5 g de suelo, si es de textura fina, que ha pasado a través de un tamiz de 2 mm de abertura. Si se elige un matraz aforado de 100 ml para hacer esta determinación, adicione 50 g de suelo, con o sin materia orgánica, dependiendo del uso que se le vaya a dar al valor de densidad.
2. Limpie las partículas de suelo que hayan quedado en las paredes externas del picnómetro o matraz. Pese el picnómetro (incluyendo la tapa) con el suelo y anote este dato. En forma separada, determine el contenido de humedad, secando otra muestra de suelo a 105° C.
3. Llene el picnómetro hasta la mitad con agua destilada, lavando el suelo que haya quedado en el cuello del picnómetro.
4. Remueva el aire entrampado o retenido en el suelo, introduciendo el picnómetro a una cámara o desecador para vacío por varios minutos (Fig. 4.2.2), agitando con cuidado para evitar pérdida de suelo por burbujeo intenso. La succión de la bomba deberá aumentarse paulatinamente para evitar pérdidas de material por formación de espuma. Deje reposar el picnómetro dentro del desecador durante 30 min y, si continúa el burbujeo, repita el vacío.
5. Posteriormente, llene el picnómetro con agua destilada. Inserte la tapa y asíntelo cuidadosamente. Limpie y seque la parte externa del picnómetro o matraz con un pedazo de tela seca, teniendo el mayor cuidado para evitar pérdida de material por el capilar. Pese el picnómetro con su contenido, anote el dato, y determine la temperatura de éste.

6. Remueva el suelo del picnómetro a una cubeta para desechos, y lave el picnómetro con agua destilada.
7. Llene el picnómetro con agua destilada hervida y fría; inserte la tapa y seque el agua que haya quedado en el exterior del picnómetro; péselo con el agua dentro, anote el dato y, nuevamente, tome la temperatura.

4.2.4 Cálculos

Para calcular la densidad de las partículas utilice la siguiente expresión:

$$\rho_P (\text{Mg m}^{-3}) = \rho_w (W_s - W_a) / [(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)]$$

donde:

ρ_w = Densidad del agua en gramos por centímetro cúbico a la temperatura observada

W_s = Peso del picnómetro con la muestra corregida a 105° C

W_a = Peso del picnómetro con aire

W_{sw} = Peso del picnómetro llenado con suelo y agua

W_w = Peso del picnómetro llenado con agua a la temperatura observada.

4.3 Porosidad del suelo y términos relacionados

4.3.1 Introducción

El espacio poroso de un suelo es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y/o agua. El volumen de este espacio poroso depende mucho de la disposición de las partículas sólidas. La importancia agrícola de la porosidad del suelo es muy grande y sus características dependen de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, tipo e intensidad de cultivos, labranza y otras propiedades del suelo y su manejo.

La porosidad de un suelo se puede medir en forma directa suponiendo que es igual a la humedad de saturación. Sin embargo, esta suposición es cierta en casos de suelos con porosidad conectada. Generalmente, la porosidad determinada a partir de la densidad aparente da valores mayores que el contenido volumétrico de agua a saturación. Esto es debido a que no toda la porosidad está conectada y, por tanto, algunos poros permanecen llenos de aire, incluso, después de saturar la muestra. Esta diferencia será mayor, cuanto más poros aislados hayan (vesículas o cavidades), como ocurre en sellos o costras superficiales, o en ciertos horizontes con colapso de estructura.

La reducción de la porosidad del suelo repercute en propiedades físicas desfavorables debidas a una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración de agua y dificultad para la penetración de las raíces. La aparición de horizontes compactados dentro de un perfil puede deberse a procesos genéticos o deposicionales, o bien, puede ser una compactación creada por el paso de maquinaria, por el laboreo en condiciones de humedad inadecuadas, o por el paso repetido del arado a cierta profundidad, creando un piso de labor (piso de arado) en la base del horizonte A.

4.3.2 Cálculos

El término para describir la cantidad de espacio poroso es la siguiente:

$$\text{Porosidad} = \varphi = \text{volumen de huecos o vacíos} / \text{volumen del suelo}$$

Esta definición es equivalente a la siguiente expresión (si la densidad de las partículas incluye a la materia orgánica):

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

4.3.3 Interpretación

Generalmente, los suelos bajo sistemas de producción agrícola intensiva tienden a compactarse, y al reducir su porosidad pierden parte de su potencialidad de producción.

Cuadro 4.3.1. Valores orientativos de la porosidad total de un suelo y su interpretación

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

4.3.4 Porosidad de aireación

$$\text{Porosidad de aireación} = \varphi_a = \text{volumen de aire} / \text{volumen del suelo} = \varphi - \theta$$

La porosidad de aireación o espacio aéreo influye en la difusividad del aire en el suelo y, consecuentemente, en la aireación de las raíces.

4.3.5 Relación de poros

$$\text{Relación de poros} = \text{volumen de poros} / \text{volumen del suelo} = \varphi / (1 - \varphi)$$

4.4 Distribución de poros por tamaño

4.4.1 Introducción

A menudo resulta importante diferenciar los espacios porosos del suelo por su tamaño al estudiar las funciones que desempeñan en el suelo y al considerar el movimiento y retención del agua en el suelo. El diámetro promedio de los poros en suelos arenosos es

claramente mayor que en suelos arcillosos; por tanto, en suelos arenosos la velocidad de infiltración de agua es muy rápida, pero su capacidad de retención de humedad es baja. En suelos arcillosos sucede lo contrario, la velocidad de infiltración es baja y la capacidad de retención de humedad es alta.

Cuadro 4.4.1. Diferenciación de los poros por su tamaño

Nombre	Tamaño (micras)	Función
Macroporos	> 100	Aireación y drenaje (flujo de gravedad)
Mesoporos	30 – 100	Conducción de agua (flujo capilar rápido)
Microporos	3 – 30	Retención de agua (flujo capilar lento)

4.4.2 Procedimiento

Los macroporos son visibles a simple vista. Se denominan también poros no capilares o poros de aireación (Cuadro 4.4.1). Este tamaño de poro se puede drenar aplicando una tensión de 0.1 bar a un suelo saturado. Incluyen grietas o fisuras de suelos arcillosos secos. Los mesoporos son los poros capilares típicos de un suelo de textura media; el agua que los permea sigue las leyes de capilaridad y la ley de flujo de Darcy. Los microporos se presentan típicamente en suelos arcillosos. El agua de los microporos más pequeños, menores a una micra, puede alejarse de las leyes de capilaridad y de la ley de flujo de Darcy; además, su composición iónica, viscosidad y fluidez pueden diferir de la del agua contenida en los microporos más grandes. El agua contenida en los microporos menores a 1µm es referida, algunas veces, como agua adsorbida, agua de enlace, agua residual o agua higroscópica.

Algunos autores han señalado que el porcentaje de los microporos de un suelo puede estimarse con algunas características de la curva de retención de humedad con la siguiente ecuación:

$$\text{Microporos}(\%) = \rho_b P_{sat} - \frac{P_{sat} - CC}{3}$$

donde ρ_b es la densidad aparente del suelo, P_{sat} es el porcentaje de humedad a saturación, CC es el contenido de humedad del suelo a una tensión de 0.3 bar.

La porosidad total (%) del suelo, también puede ser estimada utilizando el término $\rho_b \times P_{sat}$.

4.5 Análisis del tamaño de las partículas del suelo

4.5.1 Introducción

La textura del suelo es una de las características físicas más importantes, pues a través de ella, se puede predecir el comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes. La textura indica la proporción de partículas fundamentales en el suelo: arcilla, limo y arena, que se agrupan en suelos de textura fina, media y gruesa. Con la proporción relativa de estas fracciones minerales se puede obtener un gran número de combinaciones que dan origen a las clases texturales. Su fraccionamiento sigue una función logarítmica con límites entre 0.002 y 2.0 mm. La fracción arcillosa es menor a 0.002 mm, el limo entre 0.002 y 0.05 mm, y la arena entre 0.05 y 2.0 mm. Para estudios de tipo mineralógico la fracción arena se puede cuantificar en sus diferentes tamaños: a) arena muy fina, con diámetro de 0.05 a 0.1 mm; b) arena fina, con diámetro de 0.1 a 0.25 mm; c) arena media, con diámetro de 0.25 a 0.5 mm; d) arena gruesa, con diámetro de 0.5 a 1.0 mm; y e) arena muy gruesa, con diámetro de 1.0 a 2.0 mm. Esta clasificación es la que utiliza la FAO y el USDA, mientras que, la Sociedad Mundial de Suelos limita el limo a un diámetro que va de 0.002 a 0.02 mm. La determinación de la textura del suelo o análisis granulométrico consiste en la separación y cuantificación de las partículas de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo, y en la consulta del triángulo de texturas para obtener la clase textural del mismo. La cuantificación de las partículas minerales puede hacerse por el método de los tamices, y por el de sedimentación de las partículas. Este último se fundamenta en la Ley de Stokes para partículas sólidas que caen dentro de un fluido viscoso. La fórmula propuesta por Stokes para calcular la velocidad de sedimentación de las partículas es la siguiente:

$$v = \frac{d^2 g (\rho_p - \rho_f)}{18\eta}$$

donde v es la velocidad de sedimentación (cm/seg), d es el diámetro de las partículas (cm), g es la gravedad (cm/seg^2), ρ_p y ρ_f son las densidades de las partículas sólidas y del fluido o agua, respectivamente (g/cm^3), y η es la viscosidad del fluido (Poise). Los métodos más utilizados para el análisis granulométrico que se fundamentan en la ley de Stokes son el método del hidrómetro, la pipeta y centrifugación.

4.5.2 Selección del método apropiado con base en la ley de Stokes

La elección del método a seguir depende de los objetivos particulares del investigador. Cuando se desea hacer una deducción aproximada de las propiedades generales del suelo, y así elegir las prácticas de manejo, labranza, riego, y fertilización del mismo, para obtener mayor eficiencia en la producción agrícola, el método recomendable es el del hidrómetro. Este método también se puede utilizar para clasificar suelos, evaluar y valorar tierras, así como para determinar su capacidad de uso. Sin embargo, el interés del investigador puede estar enfocado en el análisis de los diferentes procesos edafogénicos que se han realizado en un suelo. Para ello, el método de análisis granulométrico recomendado es el de pipeta, el cual es más laborioso pero más exacto. El método de pipeta requiere tratar la muestra de suelo con diferentes reactivos para eliminar los agentes cementantes y asegurar una máxima dispersión de las partículas. La elección de estos reactivos se tiene que hacer tomando en consideración su agresividad para evitar la alteración de las fracciones finas de las

partículas minerales, la posibilidad de una destrucción parcial del material parental del suelo, así como una probable interferencia en la interpretación de un estudio de difracción de rayos X.

4.5.2.1 Método de la pipeta

Este método cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica, y se considera el más exacto en la determinación granulométrica.

4.5.2.1.1 Materiales

Vasos de precipitado de 100 a 1000 ml

Recipientes de vidrio y plástico de 500 ml con tapa para centrífuga

Probetas de 1000 cm³

Agitador de motor para dispersión (Fig. 4.5.1)

Agitador de plástico para probetas de 1000 cm³

Soporte especial para pipeta

Pipeta especial de 25 ml

Juego de tamices de 3" de diámetro y con aberturas de 1000, 500, 250, y 106 μm

Tamiz de 8" de diámetro con abertura de 53 o 47 μm

Centrífuga de baja velocidad (1500 rpm), y de alta velocidad (12,000 rpm)

Potenciómetro

Parrilla eléctrica o baño maría

Estufa para secar a 105-110° C

Puente para medir conductividad eléctrica



Figura 4.5.1. Agitador de motor para dispersión con botellas de plástico

4.5.2.1.2 Reactivos

Peróxido de hidrógeno al 30 %, o hipoclorito de sodio (menos agresivo)

Acetato de sodio (NaOAc) 1M pH 5

Solución amortiguadora de citrato-bicarbonato de sodio.- preparar citrato de sodio 0.3 M (88.4 g/L) y adicionar 125 ml de bicarbonato de sodio 1M (84 g/L).

Ditionito de sodio
Solución saturada de cloruro de sodio (NaCl)
Cloruro de sodio (NaCl)10%
Nitrato de plata (AgNO₃)1M
Cloruro de bario (BaCl₂)1M
Acetona
Hexametáfosfato de sodio (HMF) 50.0 g/L (dispersante)
Cloruro de magnesio (MgCl₂)1M
Acido clorhídrico (HCl) 1M

4.5.2.1.3 Procedimiento

Los procedimientos para el análisis granulométrico por hidrómetro y por pipeta inician con una muestra de suelo secada al aire. Sin embargo, en el caso de suelos de clima tropical o de origen volcánico ricos en materiales no cristalinos, es necesario iniciar este análisis con una muestra de suelo con humedad de campo; esto se debe a que la rehidratación de un suelo que contiene minerales amorfos no es completa. En este caso, es necesario trabajar con dos muestras de suelo, una de ellas (10 g), se empleará para determinar el peso seco del suelo y, la otra, se empleará para el análisis granulométrico.

4.5.2.1.4 Tratamientos previos a la separación de las fracciones del suelo

La presencia de carbonatos, principalmente de Ca y Mg, pueden causar agregación en el suelo y, por lo tanto, una mala dispersión de las partículas. Los carbonatos pueden ser removidos antes de la dispersión y sedimentación acidificando la muestra, y el calentar acelera la reacción. El tratamiento con HCl puede destruir minerales arcillosos, por lo que se recomienda utilizar NaOAc 1M pH 5.

La remoción de la materia orgánica depende, principalmente, de su naturaleza y concentración, pH, y la presencia de carbonatos, yeso, óxidos y sales solubles. Para destruir la materia orgánica se han utilizados reactivos como peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, y permanganato de potasio, entre otros. El peróxido de hidrógeno ha sido recomendado como el oxidante estándar (Day, 1965).

Las cubiertas o películas y cristales de varios óxidos de hierro como la hematita y goetita, a menudo actúan como cementantes, y el removerlos ayuda a una mejor dispersión de las partículas. Sin embargo, en suelos donde los óxidos de hierro son parte dominante de la mineralogía, no es recomendable la remoción de los óxidos de Fe, ya que se destruye parte de la fracción arcillosa del suelo.

Una gran variedad de sales solubles son comunes en suelos alcalinos, y altas concentraciones de ellas pueden causar floculación en la suspensión del suelo. Por otra parte, las sales alcalinas pueden causar la descomposición del peróxido de hidrógeno, disminuyendo su efectividad como oxidante. Las sales de Ca y Mg se presentan como carbonatos y pueden presentar problemas en la cuantificación de limos y arcillas.

El investigador tendrá que elegir el o los tratamientos que deban realizarse en sus muestras de suelo, dependiendo de las características de éste.

Remoción de carbonatos y sales solubles. Pesar una muestra de suelo secado al aire y tamizada en malla de 2 mm de abertura (malla 10), de 10 g para suelos arcillosos, 20 g para francos, 40 g para franco arenosos, y de 80 a 100 g para suelos arenosos. Coloque la muestra en tubos de centrífuga de 250 ml y adicione 100 ml de agua destilada, mezcle y

agregue 10 ml de NaOAc 1M pH 5. Centrifugue 10' a 1500 rpm y descarte el sobrenadante. Repita dos o tres veces el procedimiento, y lave dos veces más con agua destilada, asegurándose de que el sobrenadante esté claro. Si no lo está, lo cual ocurre con muestras que tienen grandes cantidades de yeso, entonces repita la operación anterior. Asegúrese de que el sobrenadante esté libre de sales utilizando AgNO_3 para cloruros y BaCl_2 para sulfatos, o medir la conductividad eléctrica cuyo valor deberá ser $< 40 \mu\text{S/cm}$.

Remoción de materia orgánica. Después de remover carbonatos y sales solubles, pase la muestra (con la menor cantidad de agua destilada) a vasos de precipitado de forma alta con capacidad de 600 ml, adicione 5 ml de H_2O_2 a la suspensión de suelo, agite, y observe por varios minutos. Si se presenta un exceso de efervescencia, agregue agua fría, si no es así, ponga a calentar en una parrilla eléctrica (60°C), o en baño maría, y cuando la reacción haya disminuido, agregue otra dosis de peróxido. Note que el MnO_2 descompone el peróxido, por lo que sería necesaria otra etapa para removerlo antes del tratamiento con el peróxido. Continúe agregando peróxido y repita el calentamiento hasta que la materia orgánica sea destruida, lo cual se observa al ya no hacer reacción el peróxido y con un cambio de color del suelo hacia una tonalidad más clara. Caliente a 90°C durante una hora más después de la adición final de peróxido, para eliminar la mayor parte de éste, sin llegar a sequedad. Transfiera la muestra a tubos de vidrio de centrífuga de 250 ml.

Remoción de óxidos de hierro. Agregue solución amortiguadora de citrato-bicarbonato para hacer un volumen aproximado de 150 ml. Agite para dispersar las partículas del suelo. Agregue 3 g de ditionito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) lentamente, y observar la reacción en la muestra (presencia de abundante espuma). Después, ponga la botella en baño maría a 80°C y agite la suspensión intermitentemente por 20'. Saque la muestra del baño y adicione 10 ml de NaCl saturado, mezcle, centrifugue, y deseche el sobrenadante, si no se desea cuantificar Fe, Al, Mn, y Si. Si se tiene interés en determinar dichos elementos, guarde el sobrenadante en un matraz aforado de 500 ml. Si la muestra de suelo está completamente gris, pase a la siguiente etapa. Si persiste un color parduzco, repita la operación. Lave la muestra una vez con 50 ml de solución amortiguadora citrato-bicarbonato y agregue 20 ml de NaCl saturado, agite, centrifugue, y decante. Después, lave la muestra dos veces con 50 ml de NaCl al 10%, y dos veces con agua destilada. Si la solución lavada no es clara, transfiera la muestra a un tubo de centrífuga y centrifugue a alta velocidad. Si aún continua turbio el sobrenadante, agregarle un poco de acetona, caliente en parrilla eléctrica y recentrifugue. Adicione 150 ml de agua destilada, agite la muestra y mida el pH. Si el suelo está saturado con Na, el valor de pH debe estar cercano a 8. Transfiera la suspensión a una botella de centrífuga de 1 L, agite la botella, y adicione 400 ml de agua destilada y 10 ml de HMF (dispersante), tape y agite toda la noche en posición horizontal (Fig. 4.5.1).

4.5.2.1.5 Separación de las fracciones

Fracción de arenas. Pase la suspensión anterior a través de un tamiz de 8" con malla de 53 μm de abertura (No. 270), que debe tener una base de plástico o una cápsula de porcelana para recoger el residuo. Lave las arenas que quedan sobre el tamiz con ayuda de chorros de agua destilada que se aplican vigorosamente. Antes de esta etapa, puede agregar una solución jabonosa que ayudaría al paso de la muestra por la malla. Una vez que las arenas

han sido lavadas, se pasan a una cápsula de porcelana o de aluminio (tarada), a la que se le ha determinado su peso constante, se secan en estufa a 105° C, y se pesan.

Transfiera las arenas secas a los tamices de 3" colocados en el siguiente orden: malla 1000, 500, 250, 106 y tape. Coloque los tamices en un agitador y agite durante unos 3'. Pese cada una de las fracciones de arenas, el limo residual, arcilla u otro material que haya pasado a través del tamiz de malla 270 (53 µm). Las pesadas deben realizarse con una precisión de 0.01 g.

Fracción de limo. Las fracciones de 5 y 20 µm son determinadas con la pipeta, usando la siguiente ecuación (derivada de la ley de Stokes) para determinar el tiempo requerido en la suspensión para obtener las fracciones deseadas:

$$t = 18 \eta h / [g (\rho_s - \rho_w) X^2]$$

o el siguiente cuadro:

Cuadro 4.5.1. Tiempo requerido en la suspensión para obtener las fracciones de 20 y 5 µm a una profundidad de 10 cm usando una solución dispersante de 0.5 g/L HMF, cubriendo un rango de temperatura de 20 a 30°C.

Temperatura	Tamaño de 20 µm			Tamaño de 5 µm		
	Densidad de partículas (Mg/m ³)			Densidad de partículas (Mg/m ³)		
	2.4	2.6	2.8	2.4	2.6	2.8
°C	tiempo en minutos					
20	5.5	4.8	4.3	87.7	76.8	68.3
21	5.4	4.7	4.2	85.7	75.0	66.7
22	5.2	4.6	4.1	83.7	73.2	65.1
23	5.1	4.5	4.0	81.7	71.5	63.6
24	5.0	4.4	3.9	79.9	69.9	62.1
25	4.9	4.3	3.8	78.0	68.3	60.7
26	4.8	4.2	3.7	76.3	66.8	59.3
27	4.7	4.1	3.6	74.6	65.3	58.0
28	4.6	4.0	3.5	73.0	63.9	56.8
29	4.5	3.9	3.5	71.4	62.5	55.6
30	4.4	3.8	3.4	69.9	61.2	54.4

$\rho_t = \rho^\circ (1 + 0.630 C_s)$. En donde ρ_t = densidad de la solución a la temperatura t , g/mL; ρ° = densidad del agua a una temperatura t , g/mL; C_s = concentración del HMF, g/mL, y $\eta = \eta^\circ (1 + 4.25 C_s)$. En donde η = viscosidad de la solución a una temperatura t , $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (cpoise), y η° = viscosidad del agua a una temperatura t , $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (cpoise). Las ecuaciones anteriores se aplicaron con una solución HMP en el rango de 0 a 50 g/L. Para análisis con solución HMF en el rango de 0 a 0.5 g/L, el error de 0.3 % en el tiempo de caída resultó cuando la densidad de la solución se estimó ser de pura agua. Muchos estudios del tiempo de caída de las partículas se han llevado a cabo para el método de pipeta (ejemplo: Day, 1965; Green, 1981) en donde se ha estimado que la solución dispersante tiene la viscosidad del agua. Sin embargo, el error en el tiempo de caída es mayor de 2 % por no considerar la viscosidad del medio usando una solución de HMP 5 g/L. La densidad del agua y la viscosidad en varias temperaturas son tomadas de Weast (1983). Nota que Weast (1983) reportó la viscosidad en centipoise (cpoise). Para convertir a unidades SI, 1 cpoise = $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. La densidad de las partículas debe conocerse con una precisión de $\pm 0.05 \text{ Mg/m}^3$. El error en el tiempo de caída es más del 2 % si la densidad de las partículas no se conocen con precisión. Ver tabla anterior.

Determinación de arcilla (< 2 μm). Lleve el limo y la arcilla contenida en el recipiente de plástico o cápsula de porcelana a una probeta de 1 L. Agregue 10 ml de solución dispersante HMF y lleve a la marca con agua destilada (cubra la probeta con un vidrio de reloj). Permita que la suspensión se equilibre durante varias horas. Posteriormente, agite vigorosamente la suspensión durante 1 min con un agitador manual. Registre y anote el tiempo (hora en su reloj) y la temperatura de la suspensión. Utilizando los tiempos de los cuadros 4 y 5, introduzca la pipeta lentamente a la profundidad indicada, gire la llave del vacío, y llene la pipeta en un tiempo aproximado de 12 seg. Es necesario controlar dicho tiempo. Descargue el contenido de la pipeta en una cápsula de porcelana o de aluminio de peso conocido. Lave la pipeta con agua destilada de una piceta, agregando dicho lavado a la cápsula. Evapore el exceso de agua y seque la arcilla a 105° C, enfríe en un desecador y pese.

Cuadro 4.5.2. Tiempo de caída de partículas de 2 μm con diferentes grados de temperatura, calculados para una profundidad de 10 cm en agua destilada, 0.5 g/L y 5.0 g/L de soluciones dispersantes de HMF con partículas de una densidad igual a 2.60 Mg/m³

Temperatura °C	Viscosidad			Tiempo de caída		
	Agua destilada	0.5 g/L HMF	5.0 g/L HMF	Agua destilada	0.5 g/L HMF	5.0 g/L HMF
	10 ⁻³ Kg m ⁻¹ s ⁻¹			h		
18	1.0530	1.0553	1.0759	8.39	8.41	8.58
20	1.0020	1.0042	1.0238	7.99	8.00	8.16
22	0.9548	0.9569	0.9756	7.61	7.63	7.78
24	0.8705	0.9131	0.931	7.26	7.28	7.42
26	0.8327	0.8724	0.8895	6.94	6.95	7.09
28	0.8327	0.8345	0.8508	6.64	6.65	6.78
30	0.7975	0.7992	0.8149	6.36	6.37	6.50

Cuadro 4.5.3. Profundidad requerida para obtener arcilla de 2 μm, tomando en consideración el tiempo y la temperatura, asumiendo una densidad de partículas de 2.60 Mg/m³ y usando una solución HMF 0.5 g/L

Temperatura °C	Viscosidad 10 ⁻³ kg m ⁻¹ s ⁻¹	Profundidad de la muestra cm			
		4 - 5	5.0	5.5	6.0
		horas			
20	1.0042	5.6	6.2	6.9	7.5
21	0.98	5.8	6.4	7	7.7
22	0.9569	5.9	6.5	7.2	7.9
23	0.9345	6	6.7	7.4	8.1
24	0.9131	6.2	6.9	7.6	8.2
25	0.8923	6.3	7	7.7	8.4
26	0.8724	6.5	7.2	7.9	8.6

27	0.8532	6.6	7.4	8.1	8.8
28	0.8345	6.8	7.5	8.3	9
29	0.8166	6.9	7.7	8.4	9.2
30	0.7992	7.1	7.8	8.6	9.4

Determinación del peso del suelo residual al final del análisis. Adicione 10 ml de $MgCl_2$ 1M y 1 ml de HCl 1M a la suspensión que permanece en la probeta de 1 L, con la finalidad de prevenir la formación de $CaCO_3$. Sifonear la solución cuando se ha terminado la floculación (el suelo está totalmente sedimentado en el fondo de la probeta, y la solución está transparente) y descártela. Transfiera el suelo de la probeta a una cápsula de porcelana, previamente tarada, ayudado con un poco de agua destilada. Evapore a sequedad a $105^\circ C$, y pese hasta peso constante. La diferencia entre el peso original y el peso encontrado en el cilindro son atribuidos a la pérdida de material debida a los pre-tratamientos, pérdida por solución, pérdida por tamizado, etc. El peso de la muestra tratada se utiliza como base para calcular las fracciones de las partículas.

El peso total seco puede ser expresado como: $W_t = W_s + W_p + W_r$, donde:

W_t = Peso total de la muestra tratada

W_s = Peso seco a $105^\circ C$ de las arenas

W_p = Peso seco a $105^\circ C$ corregido de las muestras de suelo pipeteadas

W_r = Peso seco a $105^\circ C$ corregido de limo y arcilla residual, y

Cálculos. El Cuadro 4 muestra el uso del método de pipeta para determinar el porcentaje del tamaño de las fracciones usando una pipeta de 25 ml de capacidad.

Cuadro 4.5.4. Ejemplo para calcular el porcentaje de tres fracciones usando una pipeta de 25 ml

Tamaño de Partículas mm	Peso de la muestra g	Concentración g/L	Concentración	Porcentaje %
0.020	0.114	4.36	4,06	39.8
0.005	0.073	2.92	2.42	23.7
0.002	0.057	2.28	1.78	17.4

† Concentración del dispersante = 0.5 g/L

‡ Peso base seco a $105^\circ C$ de la muestra tratada, $W_t = 10.21$

4.5.2.2 Método del hidrómetro

El método que se describe a continuación es una modificación del método de Day (1965) y ASTM (1985d), citado por Burt, 2004.

4.5.2.2.1 Materiales

Hidrómetro estándar, ASTM No. 152 H, con escala Bouyoucos en g/L
Conjunto de tamices de 7.6 cm Ø, con aberturas de 1000, 500, 250, 106, 75 y 53 μm
Agitador eléctrico para dispersión (tipo licuadora, con motor de 10,000 rpm)
Agitador de plástico para probetas de 1 L
Probetas de 1 L de 36 cm \pm 2
Vasos de precipitado de 600 ml de cuello alto
Botellas de plástico con tapa para agitación mecánica
Agitador de motor para dispersión (Fig. 4.5.1)
Estufa para secar suelo a 105° C
Balanza granataria
Cápsulas de porcelana
Agitador de tamices
Parrilla eléctrica o baño maría



Figura 4.5.2. Suspensión de suelo en probetas de 1000 cc

4.5.2.2.2 Reactivos

Alcohol Amílico
Solución de hexametafosfato de sodio (HMF) 50g/L

4.5.2.2.3 Procedimiento

Calibración del hidrómetro.- Adicione 100 ml de la solución HMF a una probeta y afofe a 1 L en un cuarto de temperatura controlada. Mezcle vigorosamente con el agitador de plástico y tome la temperatura. Introduzca el hidrómetro en la solución y determine R_i leyendo la parte superior del menisco en la escala del hidrómetro. Periódicamente, cheque R_i durante el análisis de textura. Los valores de calibración R_i se utilizan en el análisis para corregir la viscosidad de la solución y para corregir la concentración del suelo en la suspensión C.

Dispersión del suelo.- Pese 40.0 g de suelo y coloque en un vaso de 600 ml de cuello alto, adicione 250 ml de agua destilada, 100 ml de solución de HMF, y permita que la muestra se

remoje toda la noche. El tamaño de la muestra depende del tipo de textura del suelo. Podrían utilizarse de 10 a 20 g para suelos de texturas finas: limos y arcillas; y de 60 a 100 g para texturas gruesas, con lo cual se obtienen resultados reproducibles. Transfiera la muestra tratada con el dispersante al vaso de metal del agitador eléctrico (tipo licuadora) y agite durante 5 min, o transfiera la suspensión a botellas y agite mecánicamente durante toda la noche en posición horizontal (Fig. 4.5.1). Transfiera la suspensión a una probeta de 1 L y adicione agua destilada hasta la marca. **Recomendación.**- Para suelos de textura limosa o arenosa es recomendable dejar agitando las botellas en forma horizontal toda la noche, en lugar de poner la muestra a agitar en la licuadora.

Lecturas con el hidrómetro.- Dar tiempo para que la suspensión se equilibre y tome nota de la temperatura. Introduzca el agitador manual a la probeta (Fig. 4.5.2), y mezcle la suspensión vigorosamente pero con precaución, sujetando la probeta de la parte baja para prevenir que se caiga. Asegúrese de que se muevan las arenas de la parte inferior de la probeta, y agite durante 1 min. Adicione unas gotas de alcohol amílico si la superficie de la suspensión está cubierta con espuma. Tan pronto haya terminado de agitar, introduzca el hidrómetro en la suspensión y tome una lectura después de 30 seg, y otra, después de 1 min. Saque el hidrómetro, enjuague y seque. Nuevamente, introduzca el hidrómetro cuidadosamente 10 seg antes de los siguientes tiempos de lectura: 3, 10, 30, 60, 90, 120 y 1440 min. Estos tiempos pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades particulares del analista. Saque y enjuague el hidrómetro después de cada lectura. Anote las lecturas (R) cada vez que las tome. Tome una lectura del hidrómetro en la solución en blanco (no contiene suelo), y anote la lectura como R_i , además de la temperatura de la solución.

Separación de las fracciones de arena.- Pase el sedimento y suspensión de la probeta de 1 L a través de un tamiz de malla 270 (53 μm de abertura) de 8" de \varnothing . Lave el sedimento que queda sobre la malla usando una piceta o el chorro de agua de la llave. La malla puede ser mojada con una solución jabonosa para mejorar el paso de la muestra y la velocidad de flujo. Transfiera las arenas a una cápsula de aluminio previamente tarada, seque a 105° C y pese. Transfiera las arenas secas al conjunto de tamices arreglados, de arriba hacia abajo, con los siguientes diámetros: 1000, 500, 250, y 106 μm , agite durante 3 min y pese cada fracción, además, pese la del limo y arcilla residual que pasó a través del tamiz de 53 μm .

Cálculo del tamaño de las partículas.- Determine la concentración del suelo (C) en suspensión en g/L, con la siguiente expresión: $C = R - R_i$ donde R es la lectura del hidrómetro no corregida en g/L, y R_i es la lectura del hidrómetro de la probeta que se usó como blanco. R y R_i son lecturas tomadas en cada intervalo señalado. Determine P , como el porcentaje de la suma de los intervalos dados con la siguiente expresión:

$$P = (C/C_o) 100$$

donde C_o = Peso seco a 105° C de la muestra de suelo.

Determine X , diámetro promedio de las partículas en suspensión en μm en tiempo t , usando la siguiente ecuación: $X = \theta t^{-1/2}$ donde θ es un parámetro de sedimentación y está en función de la caída de las partículas con respecto a la profundidad, viscosidad y densidad del medio, así como al tamaño de las partículas. Utilizando la siguiente ecuación: $t = 18 \eta h / [g (\rho_s - \rho_l) X^2]$ para despejar $X = (18 \eta h' / [g (\rho_s - \rho_l)])^{1/2} t^{-1/2}$.

Weast (1983) reportó la viscosidad en centipoise (cpoise). Para convertir a unidades en el SI se tiene que 1 cpise = $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Por lo tanto, $\theta = (18 \eta h' / [g (\rho_s - \rho_l)])^{1/2}$ en donde

4.6 Curva característica de humedad y parámetros relacionados

4.6.1 Introducción

La curva característica o curva de retención de humedad se define como la relación entre el potencial matricial y el contenido de agua en un suelo. Esta relación expresa, indirectamente, la distribución de los diámetros de los poros en un suelo, ya que la retención capilar depende de su tamaño. El agua en el suelo está retenida por distintas fuerzas que determinan su potencial hídrico, expresado en unidades de presión. Este potencial hídrico, en un suelo insaturado, se compone de:

- ❖ Potencial matricial (retención por capilaridad)
- ❖ Potencial osmótico (retención por los iones en solución)
- ❖ Potencial gravitacional (ejercido por la fuerza de la gravedad)

Debido a que los poros del suelo retienen el agua impidiendo su drenaje, el potencial matricial es negativo. El rango de potenciales matriciales en el que se determina la curva característica va desde 0 kPa (saturación) hasta aproximadamente -10^6 kPa (suelo seco en estufa). La curva se determina equilibrando una muestra de suelo saturado con una serie de potenciales matriciales conocidos, y midiendo el contenido de agua retenida en cada uno de ellos. Se recomienda utilizar los siguientes potenciales matriciales: -6, -10, -33, -100, -200, -400, -800, -1200, y -1500 kPa. Se recomienda verificar que no existan escapes de aire por las tapas o alguna conexión, principalmente, cuando la presión señalada en los manómetros no se mantenga por espacio de 5 o 10 minutos.

Es posible obtener la equivalencia entre el potencial matricial y el diámetro equivalente de los poros, lo que convierte a la curva característica de humedad en una estimación de la distribución acumulada del volumen de porosidad en función del tamaño de los poros. Esto se realiza de acuerdo con la siguiente relación de capilaridad:

$$r = \frac{0.15}{h}$$

donde h = potencial matricial de una columna de agua (cm); r = radio equivalente de los poros (cm).

La curva característica de humedad se utiliza para: 1) determinar la capacidad de retención de agua disponible para las plantas, 2) evaluar cambios en la estructura del suelo, ya sea por compactación, laboreo, adición de materia orgánica, etc.; 3) estimar la distribución del tamaño de poros, y 4) conocer la relación entre el potencial matricial y otras propiedades físicas del suelo.

4.6.2 Materiales

Olla y membrana de presión (Fig. 4.6.2)

Platos de cerámica de 100, 300, 500 y 1500 kPa (Fig. 4.6.1)

Anillos de hule de 1 cm de alto y 5 cm de diámetro

Anillos de acero inoxidable de 4 cm de alto y 5 cm de diámetro
Balanza granataria con aproximación de 0.01 gr
Estufa para secar suelos a 110° C
Recipientes de aluminio o pesafiltros
Compresor de aire de 1 a 20 kg/cm² con regulador de presión



Figura 4.6.1. Saturación de muestras inalteradas de suelo sobre platos porosos

4.6.3 Reactivos

Alcohol etílico al 95% grado técnico

Acido clorhídrico (HCl) 1N. Diluir 83.3 ml de HCl concentrado en 1 L de agua desionizada.

Peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 10%. Diluir 333 ml de peróxido en 1 L de agua desionizada.

4.6.4 Procedimiento

1. Se colocan por duplicado, anillos de hule en el plato de cerámica, y se llenan con suelo secado al aire y tamizado (2 mm), emparejando la superficie. Es necesario utilizar muestras inalteradas de suelo (Fig. 4.6.1) para los valores de 0 a 100 kPa, debido a que la estructura tiene una función importante en la retención del agua, para lo cual se utilizan anillos de acero inoxidable de 5 cm de Ø y 4 cm de alto. A potenciales menores o más negativos, se utiliza muestra perturbada (secada al aire y tamizada < 2 mm). Se recomienda utilizar una muestra estándar y analizarla por duplicado al mismo tiempo que las muestras problema, con el objetivo de tener un mayor control en la calidad de los resultados.
2. Se coloca el plato poroso en una bandeja de plástico (Fig. 4.6.1) y adicione agua para cubrir el plato de cerámica, teniendo cuidado de no cubrir los anillos con la muestra de suelo. Continúe agregando lentamente agua hasta la completa saturación del suelo (16 a 18 horas). Si las muestras no se humedecen (cuando haya mucha materia orgánica), aplique alcohol etílico a la superficie de la muestra.
3. Se coloca el plato poroso en la olla o membrana de presión (Fig. 4.6.2), y se aplica aire con incrementos de presión cada 15 minutos hasta llegar a la presión requerida. Cheque la descarga de agua del tubo de salida. Periódicamente, sumerja el tubo de salida en agua para asegurar que no haya burbujas de aire que indiquen alguna fuga.

Las muestras de suelo estarán en equilibrio cuando deje de salir agua por el tubo de salida.

4. Cuando las muestras estén en equilibrio, transfíralas rápidamente a los recipientes de aluminio previamente tarados (M_c), y pese. Anote este peso como M_{s+w} . Antes de quitar la presión de la olla, conviene poner una pinza de presión en el tubo de salida de cada plato, para evitar movimiento del agua hacia las muestras al quitar la presión.
5. Lleve las muestras en los recipientes de aluminio a la estufa y seque a 110°C durante toda la noche. Pese y anote este peso como M_s .



Figura 4.6.2. Membrana y olla de presión

4.6.5 Cálculos

$$\text{H}_2\text{O} (\%) = 100 (M_{s+w} - M_s) / (M_s - M_c)$$

donde

$\text{H}_2\text{O} \%$ = contenido de agua gravimétrica

M_{s+w} = Peso del suelo + agua + recipiente de aluminio

M_s = Peso del suelo + recipiente de aluminio

M_c = Peso del recipiente de aluminio

Con los datos de humedad para diferentes potenciales matriciales se puede hacer un gráfico que representa la curva característica de humedad del suelo. Generalmente, el eje de las abscisas corresponde al potencial matricial negativo y, el eje de ordenadas, a los contenidos de humedad (Gráfico 4.6.1).

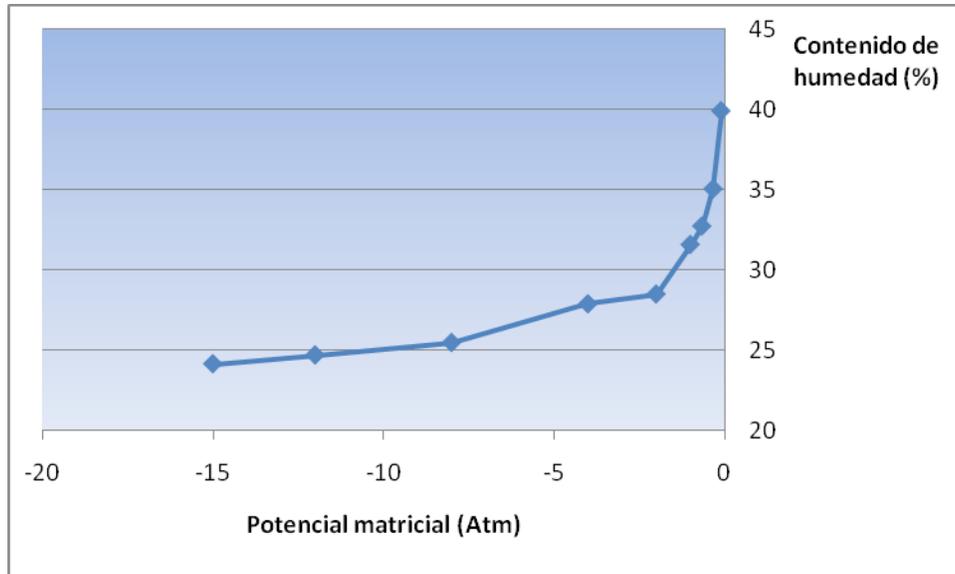


Gráfico 4.6.1. Curva de retención de humedad de un suelo arcilloso

4.6.6 Interferencias y seguridad

Una fuga en la presión ocasionaría un mal equilibrio de las muestras. Se recomienda verificar la salida de aire de la olla y membrana para evitar pérdidas de presión. La presión debe ser monitoreada hasta que sea estable. El equilibrio debe ser realizado a temperatura y humedad constante.

Con el uso prolongado, los platos de cerámica pueden obstruirse y la salida de agua puede verse restringida. Los platos deben ser lavados de la siguiente manera: con 500 ml de H₂O₂ al 10%, 1000 ml de HCL 1N y 500 ml de agua desionizada. Las soluciones son extraídas del plato a través de vacío, y el desecho capturado en un recipiente.

Debe verificarse que la membrana de caucho colocada en la parte baja de los platos de porcelana no tenga pérdidas, para lo cual se le aplica aire y después se sumerge en agua. Si se desprenden burbujas de aire de la membrana, el plato deberá ser reemplazado.

En suelos de textura fina, que contienen cantidades significativas de arcillas expandibles, se recomienda utilizar CaSO₄ 0.005 M para saturar el suelo. El agua destilada o desionizada, posiblemente puedan promover la dispersión de las arcillas en la muestra. A menudo, el agua se sobresatura con aire, lo cual afecta el contenido de agua en la presión requerida. Los datos de retención de humedad obtenidos en laboratorio serán más altos que los determinados en campo.

La tubería de alta presión debe tener siempre un buen mantenimiento. Verifique que la presión en los manómetros marque cero antes de aflojar los tornillos de las tapas de la olla y membrana de presión. Verifique que los tornillos de las tapas de la olla y membrana de presión estén adecuadamente apretados antes de aplicar cualquier presión. Verifique que no gotee la tapa de la olla o membrana de presión.

4.6.7 Parámetros de humedad relacionados

4.6.7.1 Punto de saturación

El punto de saturación del suelo se obtiene en el laboratorio al preparar una pasta saturada. Se considera como la cantidad máxima de agua que un suelo puede retener. Este parámetro se ve afectado por el tipo y contenido de arcilla, así como por el tipo y contenido de materia orgánica. El punto de saturación de un suelo va de menos del 10% para suelos arenosos, hasta 150% para suelos muy arcillosos y/o con muy alto contenido de materia orgánica.

4.6.7.2 Capacidad de campo

La capacidad de campo (CC) de un suelo representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad, después de un riego o lluvia que ha humedecido todo el suelo. En este punto el drenaje interno es insignificante. Al igual que el punto de saturación, también se ve afectado por el tipo y contenido de arcillas y materia orgánica. En términos de tensión, el valor de capacidad de campo se obtiene, generalmente, cuando se aplica al suelo una tensión de 1/3 de atmósfera (-33 KPa), utilizando el procedimiento de las membranas de presión, descrito en el inciso 4.6.4.

4.6.7.3 Punto de marchitamiento permanente

El punto de marchitamiento permanente (PMP) se define como la cantidad de agua del suelo en el que las hojas de las plantas que en él crecen se marchitan y no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera casi saturada de agua durante una noche. En la práctica, se utiliza este concepto para indicar el límite inferior del intervalo de agua disponible en el suelo. El valor de este parámetro se puede obtener aplicando al suelo una tensión de -1500 kPa.

4.6.7.4 Agua disponible

La cantidad de agua fácilmente accesible o humedad aprovechable es el agua retenida en un suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La CC representa el límite superior o 100% de disponibilidad de la humedad del suelo. El PMP es el límite inferior de esta disponibilidad o 0%. Los suelos de textura fina tienen límites más amplios de agua disponible que los suelos de textura gruesa.

4.6.7.5 Capacidad de retención de agua disponible

La capacidad de retención de agua disponible es la cantidad de agua retenida por el suelo que puede ser absorbida por las plantas. La diferencia entre los valores de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente representa la capacidad de retención de agua disponible.

4.7 Conductividad hidráulica saturada

4.7.1 Introducción

La conductividad hidráulica (K) se refiere a la velocidad con la que el agua pasa a través de la masa del suelo, por unidad de gradiente de carga hidráulica. Este parámetro depende de

la porosidad del suelo, particularmente, de la proporción de poros con radio equivalente mayor a $15 \mu\text{m}$ que se mantienen abiertos en condiciones de saturación. El método para laboratorio que aquí se describe, se basa en la aplicación directa de la Ley de Darcy a una columna de suelo saturado con área uniforme conocida, se refiere a la conductividad hidráulica saturada (K_s) con carga constante, utilizando cilindros de suelo sobre los que se mantiene una carga constante de agua, y midiendo el volumen de ésta que pasa por la columna en un tiempo determinado.

4.7.2 Materiales

Toma muestras tipo Uhland (Fig. 4.7.1)

Cilindros de acero inoxidable (5 cm de diám x 11 cm de alto) de 100 cm^3

Soporte para equipo de conductividad hidráulica

Cilindros de plástico (5 cm de diámetro x 11 cm de alto) con entrada y salida de agua, diseñados por el Téc. Jorge René Alcalá Martínez.

Embudos Buchner de plástico de 62 mm \varnothing externo, desmontable la parte superior de la inferior por tracción

Papel filtro del No. 5 y 55 mm \varnothing

Charolas de plástico (20 x 30 x 8 cm)

Probetas graduadas de 50 ml



Figura 4.7.1. Toma muestras tipo Uhland

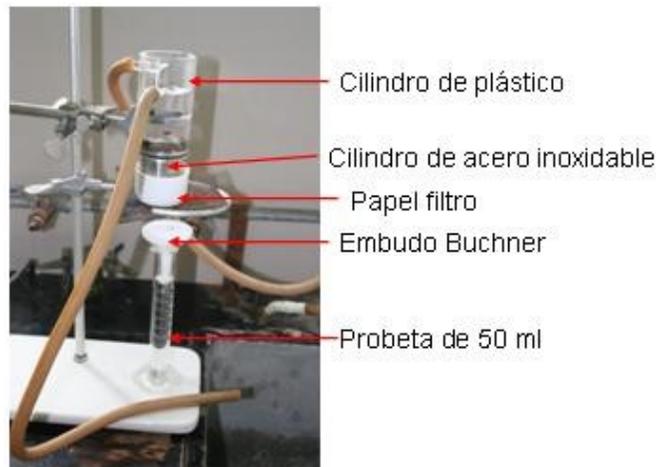


Figura 4.7.2. Equipo para conductividad hidráulica

4.7.3 Reactivos

Agua corriente

4.7.4 Procedimiento

1. Se toman por lo menos tres muestras inalteradas de suelo, utilizando cilindros de acero inoxidable con el toma-muestras tipo Uhland (Fig. 4.7.1).
2. Se coloca un cilindro de plástico en la parte superior del cilindro de acero y, la parte inferior de éste, se coloca dentro de la parte superior de un embudo Buchner. Si es necesario, se puede colocar una hoja de papel filtro en la parte inferior del cilindro de acero, sujetada con una liga, para detener el suelo. Asegúrese de que la conductancia del embudo de plástico como la del papel filtro, sean altas para que la pérdida de flujo al atravesarlas sea insignificante en comparación con la de la columna de suelo.
3. Se lleva este conjunto de cilindros y muestra de suelo a una charola o bandeja de plástico para saturar por capilaridad, colocando en el fondo de la bandeja una malla de alambre.
4. Agregue poco a poco agua o CaSO_4 0.005M, a la bandeja para humedecer la muestra. Posteriormente, agregue suficiente agua, y deje transcurrir por lo menos 12 horas para una completa saturación. Los cilindros estarán saturados cuando se observe que la superficie del suelo esté brillante. En caso de que al cabo de 48 horas no se haya alcanzado la saturación, se pueden pasar los cilindros con su bandeja a un desecador para aplicar vacío de 0.2 a 0.3 bares durante una o dos horas, lo cual ayudará a extraer el aire de los poros y facilitar la penetración del agua. Si aún así no se logra saturar el suelo, posiblemente se deba a que, en el proceso de separar el exceso de suelo de uno o ambos extremos del cilindro, se haya sellado la superficie. En este caso, es preferible dejar secar nuevamente el suelo del cilindro y eliminar cuidadosamente este sello rascando con una espátula.
5. Una vez saturado el suelo, se coloca el conjunto de cilindros sobre una malla de alambre en el soporte de medición (Fig. 4.7.2). Por debajo de la malla de alambre coloque una probeta graduada de 50 ml y la parte inferior del embudo Buchner.
6. Conecte la manguera de hule que viene de la llave de agua corriente al tubo de entrada (6 mm \varnothing) del cilindro de plástico. Conecte otra manguera de hule del

mismo diámetro en el tubo de salida de agua del mismo cilindro, y abra la llave de agua lentamente.

7. Cuando el nivel de agua de salida se ha estabilizado, colecte el agua que pasa por la columna en la probeta de 50 ml, registrando el tiempo en que inicia el paso de agua a la probeta.
8. Espere a coleccionar cerca de 50 ml de agua. Anote el volumen exacto y el tiempo requerido para ello. Repita la colecta dos veces más para verificar que el tiempo requerido es el mismo. Si en más de 12 horas no se han recogido 50 ml, se mide el volumen recogido hasta ese momento, dando por terminada la determinación.
9. Cierre la llave de agua, desconecte las mangueras y permita que escurra el agua. Una vez escurrido el exceso de agua del cilindro de acero que contiene al suelo, éste puede utilizarse para las determinaciones de porosidad, densidad aparente y contenido de humedad a saturación. Durante todo el proceso deben tomarse precauciones para que las superficies superior e inferior del cilindro de suelo no se alteren, pues en suelos con poca estabilidad estructural, dichas superficies se sellan con gran facilidad alterando sensiblemente los resultados.

4.7.3 Cálculos:

$$K_s = (Q / At)(L / \Delta H)$$

donde

K_s = conductividad hidráulica saturada (cm/hora)

Q = volumen de agua recogido en la probeta graduada (cm³)

A = área de la sección circular horizontal del cilindro (cm²)

t = tiempo transcurrido desde que comenzó a recolectarse el agua percolada hasta la medición final del volumen (Q) de ésta (horas).

L = altura del cilindro de suelo (cm)

ΔH = es la carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm)

Cuadro 4.7.1. Valores orientativos de conductividad hidráulica en suelos con diferente textura

Clase textural	Ks (cm h⁻¹)
Arena	21.0
Arena migajosa	6.11
Franco arenoso	2.59
Franco arcillo arenoso	0.43
Franco	1.32
Franco limoso	0.68
Franco arcilloso	0.23
Arcilla arenosa	0.12
Franco arcillo limoso	0.15

Arcillo limoso	0.09
Arcilla	0.06

4.7.4 Interpretación

Cuadro 4.7.2. Rango de conductividad hidráulica en muestras alteradas de suelo de textura fina y su interpretación

Conductividad hidráulica (cm h ⁻¹)	Interpretación
< 1	Muy baja
1 - 2	Baja
2.1 – 3.0	Moderadamente baja
3.1 – 5.0	Media
5.1 – 10.0	Moderadamente alta
10.1 – 20.0	Alta
> 20.1	Muy alta

Los valores bajos de K_s podrían ser debidos a una baja porosidad, pocos poros grandes y una pobre interconectividad entre ellos, así como a la presencia de una elevada cantidad de arcillas expandibles. Valores altos de K_s , generalmente, se presentan en suelos de textura gruesa, a pesar de su baja porosidad.

4.8 Consistencia del suelo

4.8.1 Introducción

La consistencia del suelo es la resistencia que éste opone a la deformación o ruptura por las prácticas de la labranza; se refiere al tipo y grado de cohesión y adhesión que existe entre las partículas del suelo. La adhesión se define como la atracción de materiales desiguales, manteniéndose unidas con mayor o menor firmeza por sus superficies adyacentes. La cohesión se define como la atracción de sustancias con características muy similares, como la atracción entre moléculas de agua.

La consistencia del suelo depende de la textura, tipo y contenido de los coloides orgánicos y minerales, de la estructura y, principalmente, del contenido de humedad del suelo. Cuando disminuye la humedad, el suelo pierde su adherencia y plasticidad volviéndose desmenuzable y blando, y cuando se seca, se vuelve duro y coherente.

Algunas arcillas pueden ser duras cuando están secas, plásticas cuando están húmedas y pegajosas cuando están muy húmedas. Los óxidos de hierro o de aluminio y el carbonato de calcio son sustancias que provocan resistencia a la disrupción en algunos horizontes

endurecidos, aunque esta resistencia a la disrupción también puede ser resultado de cierta compactación del suelo.

4.8.2 Procedimiento

La consistencia del suelo se determina en 3 condiciones de humedad, iniciando la determinación en seco, posteriormente en húmedo y, finalmente, en condición muy húmedo.

Se emplean 2 o 3 terrones de suelo de 3 a 5 cm de diámetro, previamente secados al aire, que se colocan sobre una superficie plana. La consistencia se determina apretando el suelo entre los dedos pulgar e índice, sintiendo y observando los cambios que se registran. La evaluación se realiza de acuerdo con la descripción que aparece en el Cuadro 4.8.1 (Cuanalo, 1975).

Cuadro 4.8.1. Grado de consistencia del suelo en seco

Consistencia	Descripción
Suelto	No coherente y presente como granos aislados.
Blando	Débilmente coherente y frágil. Se desmorona a polvo o a partículas individuales bajo muy ligera presión.
Ligeramente duro	Débilmente resistente a la presión. Se rompe fácilmente entre el pulgar y el índice.
Duro	Moderadamente resistente a la presión. Puede romperse con las manos sin dificultad, pero difícilmente se rompe entre el pulgar y el índice.
Muy duro	Muy resistente a la presión. Con mucha dificultad puede romperse con las manos. No se rompe entre el pulgar y el índice.

Tome otro de los terrones secados al aire y humidézcalo ligeramente con ayuda de una piceta. El contenido de humedad del suelo debe ser aproximadamente la mitad entre el secado al aire y la capacidad de campo. Se caracteriza por la desmenuzabilidad. Los términos empleados se presentan en el cuadro 4.8.2.

Cuadro 4.8.2. Grado de consistencia del suelo en húmedo

Consistencia	Descripción
Suelto	No coherente y presente como granos aislados.
Muy friable	El suelo se desmorona bajo muy ligera presión, pero no es coherente cuando se aprieta.
Friable	Se desmenuza bajo una presión de ligera a moderada entre el pulgar y el índice, y es coherente cuando se aprieta.
Firme	Se desmenuza bajo presión moderada entre el pulgar y el índice,

	pero su resistencia se nota fácilmente.
Muy firme	Se desmenuza bajo fuerte presión, apenas desmoronable entre el pulgar y el índice.
Extremadamente firme	Se desmenuza únicamente bajo fuerte presión, no se puede desmoronar entre el pulgar y el índice, se rompe en pedazos.

Humedezca en mayor grado el mismo suelo hasta aproximadamente capacidad de campo o ligeramente arriba. Esta determinación se basa en adhesividad y plasticidad. La adhesividad es la cualidad de adhesión a los objetos y la determinación se hace presionando el suelo entre el pulgar y el índice para observar su grado de adherencia. Las clases de adhesividad se dan en el cuadro 4.8.3.

Cuadro 4.8.3. Consistencia del suelo cuando está muy húmedo

Consistencia	Descripción
No adhesivo	Después de disminuir la presión, prácticamente ningún material se adhiere al índice o pulgar.
Ligeramente adhesivo	Después de presionar el suelo, éste se adhiere al pulgar y al índice, pero alguno de ellos queda casi limpio.
Moderadamente adhesivo	El suelo no se estira cuando se separan los dedos. El suelo se retira con facilidad de los dedos.
Adhesivo	El suelo se adhiere a ambos dedos y tiende a estirarse más que a separarse de uno de los dedos.
Muy adhesivo	El suelo se adhiere fuertemente a ambos dedos y, definitivamente, se estira al separar los dedos.

La plasticidad se refiere a la habilidad del suelo para cambiar de forma continuamente bajo la influencia de una fuerza, y mantener la forma impresa después de dejar de aplicar dicha fuerza. Las clases de plasticidad se dan en el cuadro 4.8.4.

Cuadro 4.8.4. Grados de plasticidad del suelo cuando está muy húmedo

Plasticidad	Descripción
No plástico	No se forma cordón.
Ligeramente plástico	Se forma cordón con dificultad.
Plástico	Se forma cordón, pero no se pueden formar anillos. La masa de suelo se deforma con una presión moderada.
Muy plástico	Se forma cordón largo y se pueden formar anillos. Se requiere mucha presión para deformar la masa de suelo.

Los suelos comúnmente plásticos y pegajosos con un elevado contenido de sodio intercambiable, dan una marcada sensación de jabón describiéndolos, adicionalmente, como de consistencia jabonosa.

4.8.3 Interpretación

Si un suelo presenta valores extremos en la evaluación de su consistencia, ello señala su dificultad para la preparación a la siembra y para el desarrollo de las plantas de cultivo. La determinación de la consistencia del suelo, en conjunto con otras propiedades físicas y químicas, informa sobre la naturaleza y grado de deterioro de la estructura del suelo.

4.9 Color del suelo

4.9.1 Introducción

El color del suelo es una propiedad física relacionada con la longitud de onda del espectro visible que el suelo refleja al recibir los rayos de luz. El tono y la intensidad de los colores del suelo superficial y de sus horizontes permiten hacer inferencias sobre sus características y procesos pedogenéticos. El color del suelo está determinado por la cantidad y estado de los minerales de hierro y/o manganeso, así como de la materia orgánica, además de la existencia de procesos de oxidación o reducción. El color del suelo afecta, indirectamente, la temperatura y la humedad, a través de su efecto sobre la energía radiante. Un suelo de color oscuro, bajo la misma cantidad de energía radiante, se secará más rápidamente que uno de color claro, debido a que el suelo oscuro absorberá mayor cantidad de energía radiante y, por tanto, tendrá mayor cantidad de energía calorífica disponible para un mayor grado de evaporación. Una cubierta vegetal o de residuos de cultivo, reducirá estos efectos.

Para fines prácticos, el color del suelo puede ser determinado por comparación con las tablas o cartas estándar de color como las de Munsell (Fig. 4.9.1). Estas cartas de color incluyen tres características y un nombre para cada color. Por ejemplo, la clave del color café rojizo podría ser 5YR 5/3. La primera característica, 5YR, corresponde al matiz o tinte (hue), el cual indica la relación del color con el rojo, amarillo, verde, azul o púrpura, y se asigna una carta para cada matiz. La segunda característica, 5/, se refiere al brillo o pureza (value) e indica la claridad del color; varía desde oscuro en la parte inferior de la carta hasta más claro en la parte superior. La tercera característica, 3, que expresa la intensidad o saturación (chroma), indica la fuerza del color o su desviación del gris, con una misma claridad.



Figura 4.9.1. Cartas de color estándar de Munsell

4.9.2 Procedimiento utilizando las cartas de color estándar de Munsell

Para determinar el color se toma una muestra de suelo secada al aire y se coloca sobre una placa de porcelana. Se compara el color de la muestra con el de las tablas estándar hasta obtener las tres propiedades del color del suelo: matiz, brillo, e intensidad cromática (Fig. 4.9.1). Posteriormente, se humedece la muestra de suelo en la placa de porcelana y se compara, nuevamente, con las tablas estándar. Conviene reportar el color del suelo en seco y en húmedo, y realizar las comparaciones con las cartas de color bajo una intensa luz solar.

4.9.3 Determinación de color utilizando el colorímetro para muestras sólidas

Cuando se requiera una mayor precisión en la determinación del color, se deben eliminar los efectos de apreciación del analista y las condiciones de luz ambiente. Para ello, se puede hacer uso de un colorímetro para muestras sólidas como el que se muestra en la figura 4.9.2.



Figura 4.9.2. Chroma Meter Minolta CR310

Este analizador de color chroma meter Minolta CR310 (Fig. 4.9.2), mide los colores reflectivos de las superficies de los objetos. El equipo consiste de una cabeza de medición

(Fig. 4.9.3), y un procesador de datos (Fig. 4.9.4). La cabeza de medición dispone de un área de 50 mm de diámetro para determinar el color. Como fuente de iluminación utiliza una lámpara de arco de xenón pulsado. Las mediciones se muestran en cinco diferentes sistemas de color: Yxy (CIE 1931), Lab (CIE 1976), LCH, Hunter Lab, o valores tristímulus XYZ, además del Munsell. El procesador de datos utiliza como base para los cálculos 20 estándares de calibración almacenados en su memoria para proporcionar consistentemente una alta exactitud. Los datos pueden ser almacenados en la memoria del equipo hasta que puedan ser descargados a una computadora.

4.9.4 Procedimiento

Para la utilización de este equipo se recomienda utilizar el suelo homogeneizado (molido y tamizado con malla 270 o 0.053 mm de abertura). La determinación del color en suelo seco debe hacerse en muestras secadas al horno (105° - 110° C, 24 hrs).

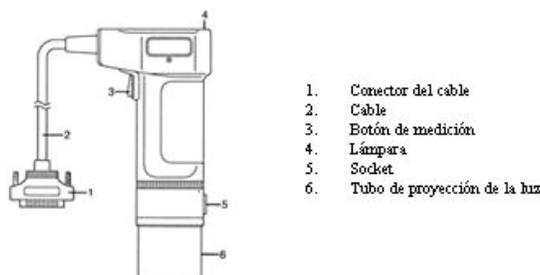


Figura 4.9.3.- Cabeza de medición del colorímetro

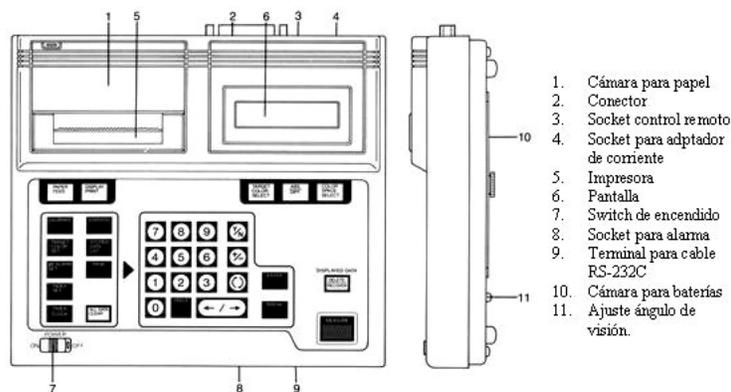


Figura 4.9.4.- Procesador de datos del colorímetro

1. Inserte el cable de la cabeza de medición (Fig. 4.9.3) en la parte posterior del procesador de datos (Fig. 4.9.4), y asegúrese de que el conector esté colocado correctamente.

2. Asegúrese de que el procesador de datos tenga 6 baterías, o esté conectado a la corriente alterna.
3. Asegúrese de que halla un rollo de papel térmico en el procesador de datos; o instale uno de la siguiente manera: coloque el switch de encendido en ON. Quite la cubierta de la cámara de papel. Introduzca el papel dentro de la ranura del frente inferior de la cámara. Presione y mantenga presionado el botón PAPER FEED hasta que el papel entre a la impresora. Coloque la cubierta de la cámara.
4. Coloque en el procesador de datos las siguientes funciones: presione el botón INDEX SET: “Print”, Y; “Color Space”, Y; “Multi Measure”, Y; “Multi Cal.”, Y; al final presione ENTER.
5. Realice la calibración del equipo de la siguiente manera: presione el botón CALIBRATE en el procesador de datos. Introduzca los valores de Y, x, y, que se muestran al interior de la cajita del plato de calibración (presione repetidamente el botón COLOR SPACE SELECT hasta que aparezca en la pantalla el sistema Y,x,y); para el índice “Light Source” colocar C o D₆₅. Colocar la cabeza de medición sobre el plato de calibración blanco y presione MEASURE. Haga tres mediciones consecutivas sin mover la cabeza de medición. Los datos de calibración (valores Y, x, y) que fueron introducidos, serán almacenados en la memoria del equipo. En la pantalla aparece “Cal” que es reemplazado por “End” cuando ha concluido la calibración.
6. Proceda a hacer mediciones en muestras secas y homogeneizadas de suelo presionando el botón MEASURE.

4.9.4 Interpretación

El color oscuro de un suelo se puede deber al contenido de materia orgánica muy descompuesta, denotando alto contenido de humus o de pequeñas partículas envueltas en materiales húmicos altamente polimerizados. En suelos con escaso contenido de materia orgánica el exceso de sodio puede formar colores oscuros debido a la disolución de la materia orgánica que se presenta con valores de pH muy alcalinos y que tiende a migrar a la superficie. El color oscuro del suelo también puede ser producido por la presencia de óxidos de manganeso o carbón elemental inmediatamente después de la quema. El suelo húmedo presentará un color más oscuro que el del suelo seco. El horizonte superficial del suelo es comúnmente, más oscuro, por su alto contenido de humus

El color rojo, generalmente corresponde a suelos muy intemperizados desarrollados bajo condiciones aeróbicas de zonas tropicales y subtropicales. El color rojo se debe a la hematita (Fe_2O_3) y otros compuestos de hierro. Los suelos de regiones húmedas son pardo rojizos, pardos o incluso amarillos, lo cual es debido a la presencia de goetita ($FeO-OH$). Las formas altamente hidratadas son amarillas y conocidas como limonitas. Los colores rojos y amarillos provienen de la oxidación e hidratación de los compuestos minerales de hierro, cuando el drenaje permite la aireación y las condiciones de humedad y temperatura son favorables para la actividad química. En los suelos tropicales con alto contenido de materia orgánica, los colores rojos se convierten en color caoba; mientras que, con bajos contenidos de humus, los óxidos férricos anhidros originan colores rojos brillantes. En el subsuelo la hidratación de estos óxidos da colores amarillos.

Los suelos mal drenados desarrollados bajo condiciones anaerobias o reductoras, presentan colores muy oscuros en las capas superficiales por la acumulación de materia orgánica y, en el subsuelo con poca cantidad de humus, el color puede ser gris claro. Si el drenaje es intermedio, se logra observar un moteado rojo-amarillento que denota condiciones alternas de oxidación y reducción, debido a la fluctuación del manto freático.

Los colores azul y verde olivo son debidos a la presencia de hierro en forma reducida, con la formación de livianita de color azul, o bien, la nontronita, clorita o glaucomita de color verde. Los subsuelos de color azulado, grisáceo o verdoso con o sin vetas, indican largos períodos durante el año en condiciones inundadas y, por tanto, inadecuada aireación. El color gris puede ser debido a la eliminación del óxido férrico por eluviación bajo condiciones ácidas.

El color gris claro y blanco del suelo se origina por la falta de intemperización de la roca madre de color gris o blanco, depósitos de CaCO_3 , afloración de sales o como resultado de la remoción de hierro, quedando gran cantidad de minerales ricos en sílice como cuarzo, feldespatos y caolinita.

Al considerar el color de los suelos es muy importante diferenciar si el color refleja un proceso de formación reciente del suelo, o si se trata sólo del color procedente del material parental que lo formó.

5. Determinaciones en campo

5.1 Densidad aparente del suelo. Método del cilindro de volumen conocido.

5.1.1 Introducción

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso. En agricultura, la masa del suelo se refiere al peso después de secar el suelo en estufa a 110°C durante 24 hr o hasta peso constante y, el volumen, se refiere a la fábrica menor de 2 mm de diámetro.

$$\rho_b = M_s/V_t$$

Esta medida permite ver la facilidad de penetración de las raíces al suelo, permite la predicción de la transmisión de agua, la transformación de los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica y, consecuentemente, calcular la lámina de agua en el suelo. Además, permite calcular la porosidad total de un suelo cuando se conoce la densidad de las partículas, y estimar la masa de la capa arable.

En un mismo suelo, el valor de densidad aparente es un buen índice del grado de compactación por medio del cálculo de la porosidad, es decir, la reducción del espacio poroso con radio equivalente mayor, llamado también espacio poroso no capilar,

responsable del drenaje rápido del exceso de agua y, por ende, de la aireación del suelo; resultando ser la densidad aparente, un buen indicador de la calidad del suelo.

En suelos con desarrollo estructural muchos de esos poros, al menos los que tienen mayores diámetros, se encuentran entre agregados o entre grupos de éstos que forman terrones estables. Por tanto, el método de terrones no reflejará bien el grado de compactación, obteniéndose valores mucho más altos.

5.1.2 Materiales

Balanza granataria con aproximación de 0.01 g

Estufa para secar suelo a 110° C

Barrena de muestreo (tipo Uhland para muestras inalteradas; Fig. 5.1.1)

Cilindros de acero inoxidable de 100 cc con tapas herméticas

Platos de aluminio



Figura 5.1.1. Barrena de muestreo

5.1.3 Procedimiento

Es necesario realizar un mínimo de tres repeticiones para obtener un valor representativo. Seleccione la superficie de suelo a muestrear, ya sea vertical u horizontal. Se introduce la barrena con el cilindro, teniendo cuidado de no compactar el suelo y tener un volumen conocido con la estructura de campo. Selle herméticamente el cilindro para que no haya pérdida de humedad, y péselo. La muestra se lleva a secar en estufa (110° C) durante 24 horas o hasta peso constante, y determine la humedad. También, determine el volumen del cilindro midiendo el diámetro y la altura del mismo (medidas internas). Se expresa en megagramos por metro cúbico (Mg m^{-3}).

5.1.4 Cálculos

$$V_t = \frac{D^2 \pi}{4} h$$

$$\rho_b = \frac{P_{ss}}{V_t}$$

donde V_t es el volumen de la muestra, D es el diámetro del cilindro, h es la altura del cilindro, P_{ss} es el peso del suelo seco.

Este método no es apropiado en suelos roturados, agrietados, de textura muy suelta o con gran contenido de elementos gruesos. En estos casos, es más adecuado el método del hoyo o excavación que se realiza en campo. Con este método se trabaja con una muestra de suelo más grande, con lo que se mejora la representatividad del parámetro evaluado.

5.1.5 Interpretación

Pueden considerarse altos aquellos valores superiores a 1.3 Mg m^{-3} en suelos de textura fina (arcillosos o franco arcillosos), a 1.4 Mg m^{-3} en suelos de textura media (francos a franco limosos), y a 1.6 Mg m^{-3} en suelo de textura gruesa (franco arenosos) (Cuadro 5.1.1). El valor de densidad aparente aumenta con la profundidad del suelo en el perfil, debido al bajo contenido de materia orgánica y, consecuentemente, menor agregación y mayor compactación.

Cuadro 5.1.1. Otros valores orientativos de densidad aparente

Tipo de horizonte	Densidad aparente (Mg m^{-3})
Horizontes arenosos	1.45 – 1.60
Horizontes arcillosos con estructura	1.05 – 1.10
Horizontes compactos	1.90 – 1.95
Horizontes de suelos volcánicos	0.85
Horizontes turbosos	0.25
Valor medio	1.35

5.2 Humedad volumétrica con el sistema Time Domain Reflectometry

Para este tipo de determinaciones el usuario deberá apoyarse en el manual de operación del equipo.

5.2.1 Introducción

La reflectometría de dominio de tiempo (TDR) es una de las formas indirectas y no destructivas de medir el contenido de agua (θ) en el suelo. Este método se basa en la relación que existe entre la permitividad o constante dieléctrica (ϵ) del suelo y el contenido volumétrico de agua (Topp y col., 1980), que se expresa de la siguiente manera:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3$$

Esta técnica determina el tiempo que se necesita para que un pulso electromagnético viaje a lo largo de una línea de transmisión, en paralelo, introducida en el suelo y de longitud conocida. Esta velocidad de viaje o velocidad de propagación de la onda electromagnética depende de la constante dieléctrica (ϵ) del material que está en contacto con la línea de transmisión. La constante dieléctrica del agua tiene un valor muy elevado (78.5 a 25°C)

frente a la de la mayoría de los materiales, como por ejemplo las partículas minerales del suelo (2 – 4) y el aire (1).

El análisis teórico y experimental de esta técnica ha demostrado que el tiempo de tránsito o velocidad de propagación del pulso electromagnético es proporcional al valor de la constante dieléctrica aparente del suelo, y que la señal de disipación o atenuación es proporcional a la conductividad eléctrica de la masa del suelo. Por lo tanto, estos dos parámetros (velocidad y atenuación) están muy correlacionados con el contenido de humedad y conductividad eléctrica del medio y, consecuentemente, con la salinidad del agua del suelo.

El Laboratorio de Física de Suelos cuenta con un equipo Trase fabricado por Soilmoisture Equipment Corp. para hacer mediciones de humedad volumétrica en campo (Fig. 5.2.1).



Figura 5.2.1. Equipo Trase con sistema TDR

Este equipo utiliza una serie de tablas de conversión para convertir la constante dieléctrica a un porcentaje de humedad en el suelo. No es necesario tener una tabla para cada tipo de suelo, ya que la constante dieléctrica depende principalmente de la cantidad de agua que de los otros componentes del suelo. El sistema Trase calcula automáticamente la humedad del suelo utilizando la constante dieléctrica aparente, K_a , y la tabla de conversión, calculando un valor promedio de humedad sobre la longitud total de las guías de onda

La constante dieléctrica se puede determinar a partir del tiempo de tránsito de una onda electromagnética en el material:

$$K_a = \left(\frac{tC}{L} \right)^2$$

donde t es el tiempo de tránsito (ns), C es la velocidad de la luz (cm/ns) y L es la longitud de las guías de transmisión (cm).

5.2.2 Mediciones

En primera instancia, se recomienda leer cuidadosamente las instrucciones de operación del equipo proporcionadas por el fabricante, para que el usuario tenga una información más completa y detallada del equipo y haga un buen manejo del mismo.

- 1) Verifique la carga de las baterías: abra el compartimiento inferior del equipo, presione la tecla de prueba de carga de baterías, y se encenderá una de las luces: la verde indica carga completa, la amarilla señala que el equipo está en rango normal para operar, y la roja anuncia carga insuficiente. En este último caso, deberá conectar el equipo a una fuente de corriente alterna por un mínimo de tres horas.
- 2) Especificar las características del conector y las guías de onda metálicas, y seleccionar la Tabla de Conversión según el tipo de conector y guía. Para esto, encienda el equipo oprimiendo el botón rojo grande que se encuentra en el compartimiento inferior de la unidad. Cierre este compartimiento con las cerraduras. Active la pantalla de la parte superior, presionando la tecla ON-ENTER en el teclado. Seleccione la pantalla “Measure Screen” y seleccione el tipo de conector: a) conector estándar (connector), b) conector enterrable (buriable), c) conector “slammer” (field). Seleccione las guías de onda e introduzca sus características: a) longitud de las guías (waveguide length), con las unidades especificadas en la pantalla; b) capa de guías: con capa (coated), o sin capa (uncoated). Seleccione la Tabla de Conversión de Humedad (Moisture Table) que corresponda al tipo de guías y la capa:

CUN – conector estándar sin capa

CCT – conector estándar con capa

BUN – enterrable sin capa

BCT – enterrable con capa

FUN – slammer sin capa

FCT – slammer con capa

SUN – conector especial sin capa

SCT – conector especial con capa

Seleccione el lapso de tiempo necesario para capturar la forma completa de la onda (Capture Window) en nanosegundos. El lapso a seleccionar depende en gran parte del tipo de conector y la longitud de las guías a utilizar:

Tipo de conector	Longitud de guías	Tiempo
Estándar	15 – 60 cm	10 ns
Enterrable	20 cm	10 ns
Slammer	30 – 60 cm	20 ns

- 3) Conecte el cable del conector al equipo. Asegúrese que el conector BNC del cable esté bien fijo. Si va a utilizar el conector estándar o el slammer se debe establecer el punto cero o inicial de las guías de onda (Zero Set). Si utiliza el conector enterrable, no es necesario establecer el punto cero, el Trase lo hace automáticamente. Para establecer el punto cero con el conector estándar es necesario que éste no tenga las dos guías de onda metálicas. Presione la tecla para establecer el punto ceso (ZERO

SET) y espere unos segundos para que el equipo determine la longitud del cable. Cuando la medición está hecha, aparece un mensaje en la pantalla indicando que la unidad determinó el punto cero y está lista para hacer mediciones de humedad.

- 4) Si va a utilizar el conector estándar: coloque y asegure las guías de onda metálicas en el conector. Introduzca las guías de onda en el suelo, asegurando el contacto de toda la guía con el suelo.
- 5) En la pantalla de medición (Measure Screen), oprima la tecla MEASURE y espere unos segundos para que la unidad haga la medición. La lectura de humedad y constante dieléctrica aparecerán en la pantalla. Para ver la forma de la onda se debe ir a la pantalla Graph Screen oprimiendo la tecla PAST SCREEN.
- 6) Puede grabar la lectura y/o el gráfico para analizar posteriormente. Para esto, debe regresar a la pantalla de medición, etiquete la lectura (si desea) en el área de etiqueta (Tag). Seleccione una de las cuatro áreas de almacenaje (Storage), y oprima la tecla SAVE READING si desea grabar sólo la lectura. Para grabar la lectura y el gráfico, oprima la tecla SAVE GRAPH. Para observar la lectura actual u otras ya grabadas, debe ir a la pantalla de datos (Data Screen) oprimiendo la tecla NEXT SCREEN.

Entre las principales ventajas que representa el uso de este sistema TDR, está la obtención de mediciones precisas, rápidas y repetibles; el funcionamiento del equipo es simple y seguro para el usuario; además, hay una mínima alteración del suelo al hacer la medición.

5.3 Resistencia a la penetración

5.3.1 Introducción

La resistencia a la penetración de un suelo se refiere a la resistencia que éste ofrece a que un instrumento (penetrómetro; Fig. 5.3.1) sea introducido en él. Esta resistencia mecánica puede ser evaluada mediante la fuerza (carga o presión) requerida para que una varilla con punta generalmente cónica, penetre hasta cierta profundidad en el suelo.

La resistencia mecánica es una propiedad del suelo que se utiliza en estudios de densidad, traficabilidad y compactación, pues se relaciona con el crecimiento de las raíces, el rendimiento de los cultivos, y las propiedades físicas del suelo que se ven afectadas por los implementos agrícolas.

Existen dos tipos de penetrómetros: 1) los que miden la penetrabilidad en forma dinámica, conduciendo la herramienta al interior del suelo con un martillo o haciéndole caer un peso; y 2) los que miden la penetrabilidad en forma estática, empujando una varilla metálica o sonda al interior del suelo bajo una presión constante. El primer tipo ha presentado ciertas limitaciones para su aplicación en los monitoreos agrícolas.

El Laboratorio de Física Ambiental dispone de un penetrómetro de cono (de tipo estático) de la marca Rimik CP20 (Fig. 5.3.1). Es un sofisticado instrumento que mide y registra los valores del índice de cono en el campo. El equipo es capaz de almacenar 30000 valores para después ser transferidos a una computadora. Las mediciones del índice de cono se pueden hacer hasta una profundidad del suelo de 600 mm y hasta un valor máximo de 5000

kpa. La característica más importante de este penetrómetro es el uso de un método ultrasónico para medir la profundidad del suelo.



Figura 5.3.1. Penetrómetro de ultrasonido

5.3.2 Mediciones

Para realizar mediciones se recomienda leer cuidadosamente las instrucciones de operación del equipo proporcionadas por el fabricante, para que el usuario tenga una información más completa y detallada del equipo y haga un buen manejo del mismo.

Antes de usar el penetrómetro es aconsejable verificar su calibración. La sección 4.5 del manual de operación del instrumento, proporciona el procedimiento para realizar la calibración del mismo.

Para iniciar las mediciones:

1. Atornille la varilla con el cono en la base del instrumento (sección 7.0 del manual del instrumento). El sistema de almacenamiento está diseñado para guardar los datos en archivos numerados del 0 al 250, cada uno de los cuales tendrá los datos de 1 o 3 inserciones individuales. El instrumento no debe ser apagado durante el proceso de registro, porque los datos solamente serán guardados cuando la inserción haya finalizado. Antes de encender el aparato coloque el botón MODE en la posición RECORD. Ahora encienda la unidad y un “beep” será emitido. En la pantalla del equipo debe aparecer lo siguiente:

Push START when
Ready. FN xxx Px

Donde xxx es el número de archive actual y x es el número de inserción actual.

2. Colocar la punta del cono a menos de un cm de la superficie del suelo. Presione el botón START y se escuchará la unidad ultrasónica que empieza a emitir un suave sonido. Si la sonda está demasiado cerca de la superficie o sobre la superficie, aparecerá en la pantalla el siguiente mensaje:

Too close
try again

regresando automáticamente a la pantalla anterior, de manera que se pueda volver a empezar la inserción de la sonda, después de presionar el botón START.

3. La sonda debe ahora ser empujada lentamente en el suelo, a una velocidad uniforme, tratando de alcanzar la máxima profundidad (60 cm). Conforme se vaya introduciendo la sonda al suelo, en la pantalla se va observando lo siguiente:

CI xxxx kpa

x.x m/min xxx mm

estos valores corresponden al índice de cono, la velocidad de inserción en metros por minuto y la profundidad en mm. Los valores irán cambiando conforme la sonda vaya adentrándose en el suelo.

4. Cuando se haya alcanzado la profundidad máxima, sonará el buzzer y la ventana mostrará lo siguiente:

Finished FN xxx

o

Finished Probe x
of FN xxx

dependiendo de si se le indicó al instrumento 1 o 3 pruebas por archivo.

Después de 3 segundos, la pantalla se regresa a:

Push START when
ready. FN xxx Px

5. Puede ahora realizarse la inserción 2 o 3 del mismo archivo, o empezar un nuevo archivo. Si este es el caso, usted notará que el número de archivo habrá sido incrementado en uno. Durante cada inserción, se monitorea la velocidad para asegurarnos de no exceder el parámetro de velocidad máximo. Si la velocidad es excedida, la consecuencia dependerá del parámetro de Auto Abort colocado en el equipo. Si este parámetro se coloca en OFF, entonces cada vez que sea excedida la velocidad, el instrumento dará un corto beep. Pero si el Auto Abort es colocado en ON, el buzzer dará un largo beep y la pantalla mostrará el siguiente mensaje:

** Too fast **

e inmediatamente después muestra:

START to repeat or
INC to cont.

Presionando el botón INC/REPEAT se podrá repetir la inserción o presionando el botón START se abortará la inserción y se podrá continuar a la siguiente. Si una inserción toma más de 10 segundos para moverse 15, 20 o 25 mm de profundidad, el registro de los datos se abortará automáticamente, el buzzer dará un beep largo y la ventana mostrará el siguiente mensaje:

** Too slow **

y después se mostrará lo siguiente:

INC to repeat or
START to cont.

6. Presionando el botón INC/REPEAT se podrá repetir la inserción. Para continuar con la siguiente inserción o archivo, se debe presionar el botón START. Durante cada inserción es posible abortar el proceso de registro presionando el botón START. Si se aborta una inserción por este método, la pantalla del equipo lo señalará:

**** Aborted ****

y después mostrará lo siguiente:

INC to repeat or
START to cont.

7. Si por alguna razón, desea abandonar un archivo, simplemente apague el instrumento. Cuando lo vuelva a encender, el número de archivo mostrado será el mismo que el mostrado antes de apagarlo, es decir, que el número de archivo no ha sido incrementado.

Las principales ventajas de esta técnica son que, en general, el equipo es de fácil transporte y las mediciones son sencillas. Esto facilita el cubrir rápidamente áreas muy extensas de terreno para tener una visión preliminar de la variabilidad de sus propiedades físicas, tanto en sentido vertical como horizontal. Consecuentemente, permite seleccionar sitios representativos para muestreos más detallados y determinaciones más complejas.

La resistencia a la penetración depende de muchas propiedades del suelo como densidad aparente, contenido de humedad, y resistencia mecánica al corte las cuales, a su vez, dependen de la estructura, textura, mineralogía, materia orgánica, y régimen de humedad del suelo, entre otras.

5.4 Conductividad hidráulica

5.4.1 Introducción

La conductividad hidráulica saturada (K_s) o permeabilidad es una medida de la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación. Matemáticamente, se define como el factor de proporcionalidad de la ley de Darcy aplicada al flujo del agua cuando el gradiente hidráulico es la unidad.

La determinación de K_s es esencial para conocer la clase de drenaje interno, para planificar tipo y cantidad de riego, así como cálculo de drenajes. Esta determinación en campo puede llevarse a cabo utilizando un permeámetro bajo la superficie del suelo, en la zona no saturada. Este permeámetro consiste de un aparato mariotte que mantiene el agua a un nivel

constante en un agujero, previamente hecho con una barrena. Uno de los permeámetros comerciales más comunes es el de Guelph (Fig. 5.4.1), cuyo uso se describe a continuación.



Figura 5.4.1. Permeámetro Guelph

5.4.2 Procedimiento

5.4.2.1 Evaluación del sitio

Antes de hacer alguna medición con el permeámetro en el campo, es necesario realizar una evaluación del sitio respecto a su topografía y apariencia general del suelo para seleccionar las localidades representativas del suelo bajo estudio.

5.4.2.2 Preparación del pozo

Se prepara un agujero de aproximadamente 6 cm de diámetro utilizando la barrena que viene incluida en el conjunto de implementos del permeámetro, y hasta la profundidad que se quiera caracterizar (Fig. 5.4.2.2.1). Mida la profundidad alcanzada y el diámetro del agujero. Evalúe y anote la estratificación estructural y textural del suelo, como parte importante de la medición y reporte de las propiedades hidráulicas del sitio.



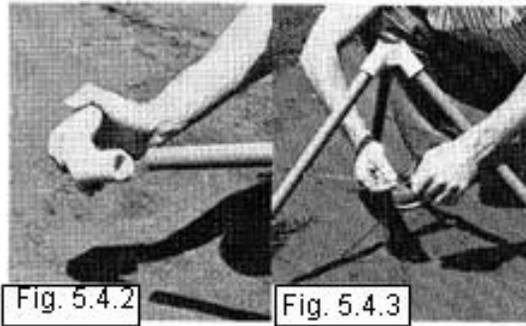
Figura 5.4.2.2.1. Pozo para medir conductividad hidráulica

5.4.2.3 Eliminación de la capa de sellado

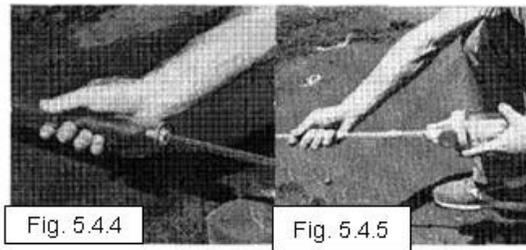
Si el suelo está húmedo, es recomendable utilizar el cepillo para remover alguna capa de suelo que impida el flujo natural del agua, lo cual se logra introduciendo y sacando este cepillo una o dos veces como máximo. La dificultad para remover esta capa aumenta con el incremento de la humedad del suelo, por lo tanto, es recomendable no hacer esta determinación cuando haya un exceso de humedad en suelos de textura fina.

5.4.2.4 Ensamblado del permeámetro

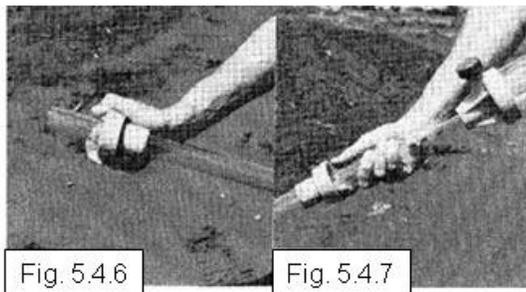
1) Ensamble el tripié, conectando los brazos trípodés a la base (Fig. 5.4.2). Asegure el tripié introduciendo la cadena en los agujeros de los brazos del tripié y cerrando dicha cadena (Fig. 5.4.3).



2) Saque el reservorio y el tubo de aire inferior del estuche. El tubo de aire inferior se introduce dentro del tubo soporte (Fig. 5.4.4). Conecte el tubo de aire inferior al tubo de aire medio en la base del reservorio, usando el tubo de aire de acoplamiento (Fig. 5.4.5). Empuje fuertemente el tubo de aire inferior dentro del de acoplamiento hasta que entren al interior de los broches de acoplamiento dentro de la ranura al final del tubo de aire inferior.



3) Deslice la base del trípode con la parte más amplia orientada hacia arriba en el exterior del tubo soporte (Fig. 5.4.6). Con la base del trípode en su lugar, deslice el tubo soporte sobre el tubo de aire, y conéctelo firmemente en el anillo que está en la parte inferior de la base del reservorio (Fig. 5.4.7). Este es un punto de fricción y rozamiento, y es importante que el tubo soporte esté asentado completamente en la base del reservorio.



4) Se coloca el tubo soporte dentro del tripié como se muestra en la figura 5.4.8. Apoye y estabilice el permeámetro acomodando nuevamente el tripié (Fig.5.4.9).

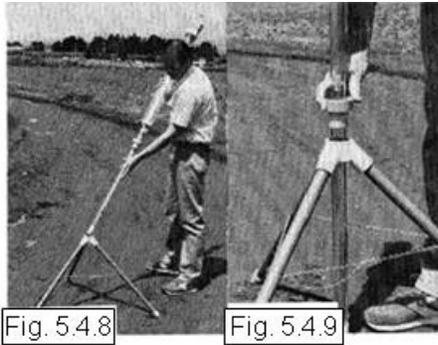


Fig. 5.4.8

Fig. 5.4.9

5) Quite el tubo de aire superior que está dentro del tubo con escala de la carga de agua como se muestra en la Figura 5.4.10. Antes de conectar el tubo de aire superior al tubo de aire medio, asegúrese de que el indicador de la altura está en su lugar. El tubo de aire superior se conecta en la parte superior del tubo de aire medio, utilizando el tubo de aire de acoplamiento. Cuando estén conectadas todas las secciones del tubo de aire, asegúrese de que el lomo dentro del acoplamiento, entre en las ranuras de los extremos de las secciones del tubo de aire (Fig. 5.4.11).

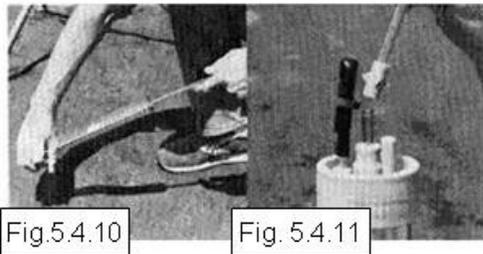


Fig.5.4.10

Fig. 5.4.11

6) Asiente la punta de entrada de aire dentro del lavador de asientos de puntas de aire presionando hacia abajo el tubo de aire superior (Fig. 5.4.12). Una vez que la punta de entrada de aire esté asentada, baje y asiente el indicador de altura al mismo nivel, y en contra de la tapa del reservorio (Fig. 5.4.13).

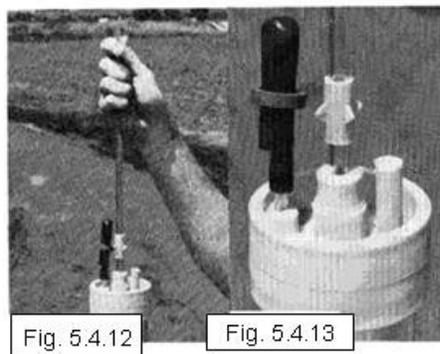
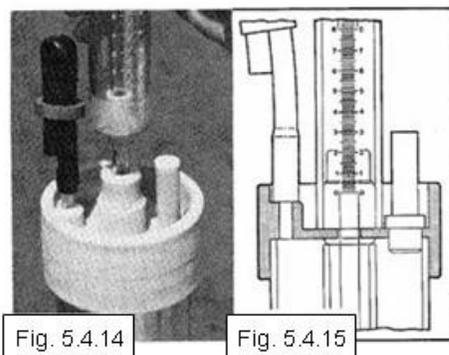


Fig. 5.4.12

Fig. 5.4.13

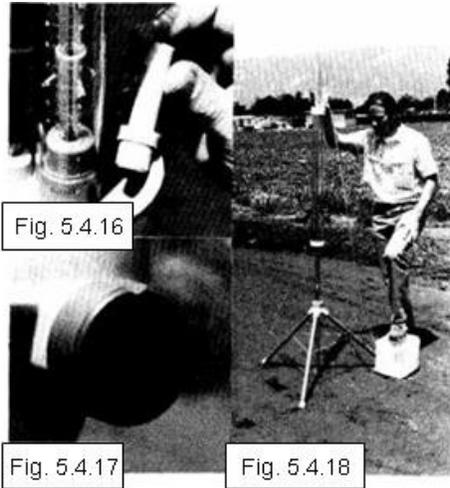
7) Baje la escala de carga sobre el tubo de entrada de aire superior y asíntelo completamente en contra de la parte inferior de la tapa del reservorio (Fig. 5.4.14). El barreno contador de la escala de carga se ajusta bien en la parte central de la tapa del

reservorio. La marca “MM” de la parte superior de la escala, debe ser orientada hacia arriba. Cuando la escala de carga se monta apropiadamente, la lectura “0” de la escala de carga estará 5 mm debajo de la parte superior de la tapa del reservorio, y la parte inferior del indicador de altura se alineará con la marca de 5 mm en la escala de carga (Fig. 5.4.15).



5.4.2.5 Llenado con agua

Después de haber ensamblado el permeámetro y de haberlo montado en el tripié, se procede a llenarlo con agua. Quite la llave de llenado de la tapa del reservorio (Fig. 5.4.16) y ajuste la válvula del reservorio, de manera que la muesca esté hacia arriba o a las 12 en la posición del reloj (Fig. 5.4.17). Los reservorios interno y externo se conectan, y quedan listos para ser llenados. Vierta el agua mediante el sifón en la parte superior de la tapa del reservorio. Por conveniencia, el tubo de ensamble puede ser conectado al contenedor de agua de plástico, y hacer presión con el pie para bombear el agua al permeámetro, como se muestra en la Figura 5.4.18. El sifón impide que el agua salpique o se desborde. Es importante llenar el reservorio hasta que ninguna burbuja de aire emerja desde el agujero lleno. Si por alguna razón no hubo agua suficiente para llenar completamente el reservorio, haga una lectura con el procedimiento descrito en la página 17 del Manual de Instrucciones del Equipo “Making a Reading With Limited Water Supply”. Después del llenado, quite y asiente completamente la tapa de relleno en su agujero, y asegúrese de que el tubo de neopreno esté plegado, cerrándolo con el anillo de abrazadera.



5.4.2.6 Colocación del permeámetro

Simplemente centre el tripié sobre el agujero en el suelo y, lentamente, baje el permeámetro hasta que el tubo soporte entre dentro del agujero, teniendo cuidado de no acarrear residuos de suelo de los lados del agujero, hacia el interior del mismo (Fig. 5.4.19). La flexibilidad en la base del tripié permite que éste sea ajustado de acuerdo con la variación de la pendiente del terreno. El tripié se usa para apoyar el permeámetro en pozos de hasta 38 cm de profundidad. La cadena del tripié puede ser aflojada para que las patas del tripié se puedan ajustar.

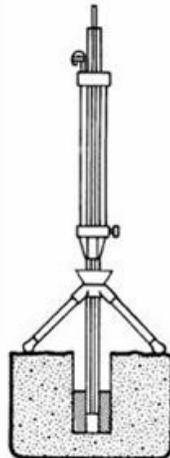


Figura 5.4.19

5.4.2.7 Mediciones

Asegúrese de tener suficiente agua disponible para efectuar el número de mediciones que requiere su investigación. Después de que el permeámetro ha sido ensamblado, llenado y

colocado en el pozo, se debe seguir el siguiente procedimiento estandarizado para hacer las mediciones.

Etapa 1. Ajustes del permeámetro. Verifique que ambos reservorios estén conectados. Los reservorios están conectados cuando la muesca sobre la válvula del reservorio está señalando hacia arriba. También, es importante verificar que el indicador de la altura y el de la escala de la carga estén asentados hacia abajo al mismo nivel, y en contra de la parte superior de la tapa del reservorio. Además, la llave de llenado de agua debe estar completamente asentada en contra de la tapa del reservorio, y el tubo de vacío cerrado con el anillo de abrazadera (Fig. 5.4.20).

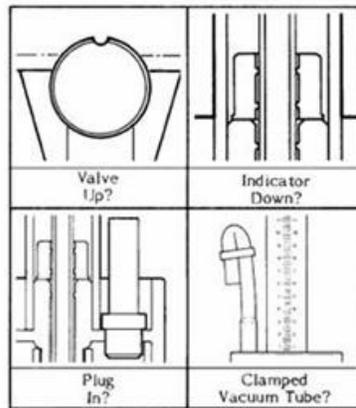


Figura 5.4.20

Etapa 2. Establecer la altura de carga (H_1) de 5 cm. Levante lentamente la punta de entrada de aire (Fig. 5.4.21), agarrando el tubo de aire superior, para establecer la primera altura de carga. Levantando el tubo de aire muy rápido puede causar turbulencia y erosión en el pozo, y un efecto potencial de disparo que podría causar un sobrellenado temporal del pozo. Levante el tubo de aire hasta que se alcance una altura de 5 cm, como indica la lectura del extremo inferior del indicador de altura en contra de la escala de carga (Fig. 5.4.22).

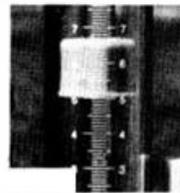
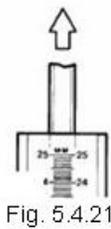


Fig. 5.4.21

Fig. 5.4.22

Etapa 3. Seleccionar el reservorio apropiado. Observe el rango de caída del nivel de agua en el reservorio. Si es demasiado lento como para distinguir fácilmente el goteo en el nivel entre lecturas consecutivas, generalmente un intervalo de 2 minutos, entonces regrese la válvula del reservorio de manera que la muesca señale hacia abajo en la posición 6 del reloj. Entonces, el agua será abastecida solamente del reservorio interno de diámetro pequeño, lo cual resultará en un goteo mucho mayor en el nivel de agua entre lecturas (Fig.

5.4.23). Una vez que se ha seleccionado el reservorio apropiado no cambie la válvula del reservorio.

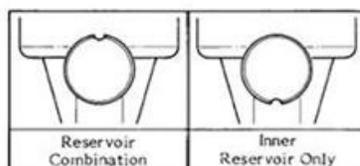


Figura 5.4.23

Etapa 4. Medir el flujo de salida del permeámetro, primera altura de carga. El flujo de salida de agua del permeámetro hacia el suelo está indicado por la velocidad de caída de agua en el reservorio. Observe y registre el nivel de agua en el reservorio seleccionado como una lectura sobre la escala grabada en el tubo del reservorio interno. Las lecturas deben ser hechas a intervalos de tiempo regulares. Como procedimiento estandarizado, se sugieren intervalos de 2 minutos. La diferencia de lecturas a intervalos consecutivos divididos entre el intervalo de tiempo, es igual a la velocidad de caída de agua, R , en el reservorio.

Cuando se esté investigando suelos arcillosos, se pueden dar situaciones donde la velocidad de caída de agua es tan lenta, que un intervalo de 2 minutos puede no ser suficiente para detectar un cambio medible en el nivel de agua del reservorio. En estos casos, es necesario utilizar un intervalo de tiempo más largo. Tal vez, intervalos de 15 minutos o más, sea lo adecuado. Por otra parte, en situaciones donde la velocidad de caída de agua es muy rápida, como ocurriría con suelos arenosos, puede ser más apropiado utilizar intervalos de tiempo de 15 segundos. Haga el cálculo de R con base en el intervalo de tiempo seleccionado.

Por ejemplo, en el tiempo = 0 minutos, se supone que el nivel de agua en el reservorio es de 5.9 cm como lectura en la escala del reservorio. Después del primer intervalo de tiempo (tiempo = 2 minutos), el nivel de agua es de 6.5 cm. La velocidad de caída de agua en el reservorio, R , es calculada como el cambio en el nivel de agua, en centímetros, dividida entre el intervalo de tiempo seleccionado para ese cambio, expresado en segundos:

$$R = (6.5 \text{ cm} - 5.9 \text{ cm}) / (2 \text{ min}) (60 \text{ seg/min})$$

$$R = (0.6 \text{ cm}) / 120 \text{ seg}$$

$$R = 0.005 \text{ cm/seg}$$

Continúe registrando la velocidad de caída del agua en el reservorio hasta que las lecturas no cambien significativamente en 3 intervalos de tiempo consecutivos. Esta velocidad es llamada R_1 y es definida como “la velocidad de caída de agua en estado estacionario” en el reservorio a H_1 . H_1 es la primera altura de carga establecida y es siempre de 5 cm en el procedimiento estandarizado (ver diagrama en la pág. 6 del Manual de Operación del Equipo). En suelos arcillosos muy pesados, donde la conductividad hidráulica es extremadamente lenta, puede abandonarse el permeámetro durante un período largo de tiempo para poder atender otras tareas en el sitio experimental. Bajo estas circunstancias, se

pueden hacer las lecturas a intervalos adecuados hasta que la velocidad de caída alcance un valor estable. Este valor estable se alcanza cuando se tiene, esencialmente, la misma lectura en intervalos de tiempo consecutivos. Determine la velocidad de caída para cada intervalo, dividiendo el cambio en la altura del agua del reservorio (cm), entre el intervalo de tiempo (seg). El “estado estacionario de la velocidad de caída” en esta situación es, simplemente, el valor estable obtenido. Después de completar las mediciones de flujo de agua, no mueva el permeámetro del pozo, y proceda inmediatamente con la etapa 5.

Etapa 5. Altura de carga H_2 de 10 cm. Levante lentamente la punta de entrada de aire, agarrando el tubo de aire superior para establecer la segunda altura de carga de 10 cm. Levante el tubo de aire hasta que se establezca una altura de 10 cm, indicado por la lectura del extremo inferior del indicador de la altura sobre la escala grabada (Fig. 5.4.24).

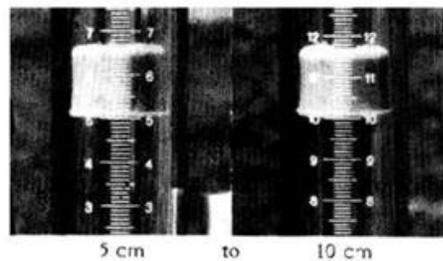


Figura 5.4.24

Etapa 6. Mida el flujo de salida del permeámetro con la segunda altura. En la forma descrita en la etapa 4, observe la velocidad de caída de agua, R , en el reservorio hasta que se mida un valor estable de R . Esta velocidad es llamada R_2 , y es definida como “la velocidad de caída en estado estacionario” del agua en el reservorio a H_2 . H_2 es la segunda altura de carga establecida y siempre es de 10 cm con el procedimiento estandarizado.

5.4.2.8 Cálculos

Calcule la conductividad hidráulica saturada en campo K_{fs} , el potencial de flujo mátrico Φ_m , y la sortividad S , utilizando las siguientes ecuaciones:

Si se utilizó la combinación de reservorios

$$K_{fs} = (0.0041) (X) (R_2) - (0.0054) (X) (R_1)$$

$$\Phi_m = (0.0572) (X) (R_1) - (0.0237) (X) (R_2)$$

donde X = constante del reservorio utilizada con la combinación de reservorios.

$$S = \sqrt{2(\Delta\theta)\Phi_m}$$

donde $\Delta\theta = \theta_{fs} - \theta_i$

θ_i = contenido volumétrico de agua inicial

θ_{fs} = contenido volumétrico de agua a saturación en campo

La constante X se encuentra impresa en la válvula del reservorio del permeámetro.

Los resultados de las mediciones con el permeámetro Guelph pueden señalar la heterogeneidad del suelo con discontinuidades hidrológicas, al obtener valores negativos de los parámetros K_{fs} o Φ_m . Estas discontinuidades hidrológicas son causadas por la estratificación del suelo o la presencia de hoyos de raíces y/o ruedas. En estos casos, resulta necesario realizar un mayor número de mediciones para cuantificar el grado y clase de heterogeneidad del suelo.

Cuadro 5.4.1. Evaluación de la K_{fs} según FAO (1963)

cm/hora	m/día	Evaluación
0.8	0.2	Muy lenta
0.8 – 2.0	0.2 – 0.5	Lenta
2.0 – 6.0	0.5 – 1.4	Moderada
6.0 – 8.0	1.4 – 1.9	Moderadamente rápida
8.0 – 12.5	1.9 – 3.0	Rápida
12.5	3.0	Muy rápida

5.5 Reflectancia e irradiancia

5.5.1 Introducción

La reflectancia espectral es la relación entre la cantidad de energía radiante incidente y la reflejada en una determinada longitud de onda. Es una propiedad inherente a cualquier objeto la cual, a diferencia de la radianza e irradiancia, es independiente de la intensidad y naturaleza de la iluminación, localidad, hora del día, época del año, y condiciones atmosféricas y climatológicas. Además de la humedad del suelo y las características ya mencionadas, la vegetación es otro parámetro clave en los modelos hidro-ecológicos que también ejerce un fuerte control en la energía superficial, radiación y balance hidrológico del suelo.

5.5.2 Procedimiento

1.- Colocar sobre el terreno la base de madera que sostendrá al piranómetro. Introducir los 4 brazos largos de madera en la parte inferior de la base cuadrada de madera, colocando cada brazo en cada uno de los orificios de la tabla.

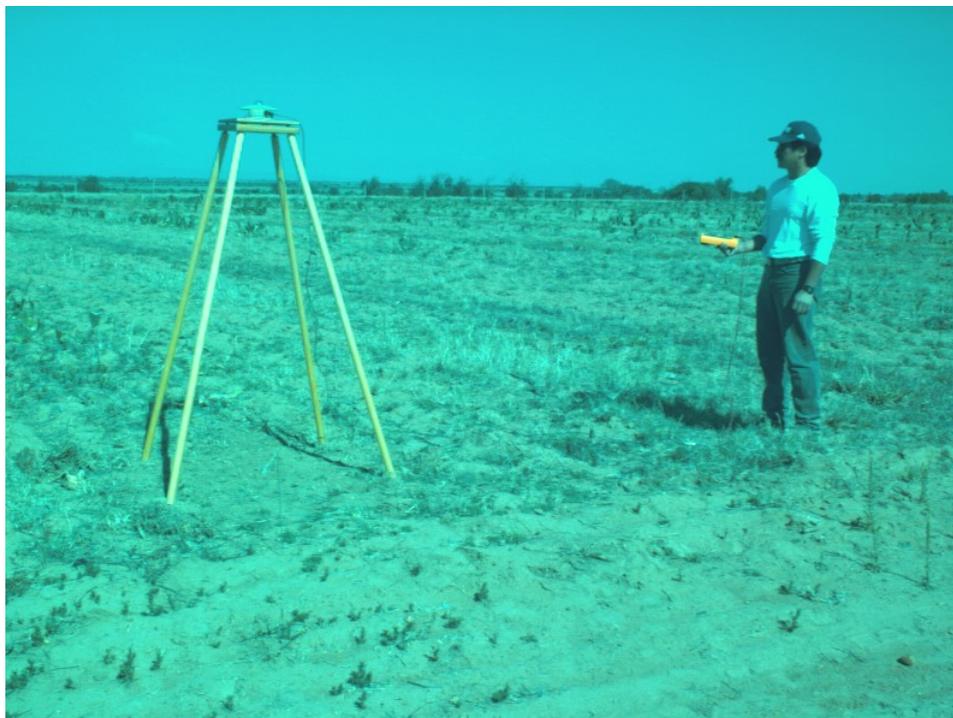


Fig. 5.5.2.1. Tripié de madera para colocar piranómetro

- 2.- Sacar el piranómetro de su estuche negro y conectarle su cable gris (caja amarilla). Hacer coincidir las 4 puntas del extremo del cable con la entrada del equipo, girando un poco este extremo hasta que entre con facilidad. Girar con fuerza y en sentido de las manecillas del reloj, el anillo exterior del cable hasta que se oiga un click.
- 3.- Colocar el piranómetro (Fig. 5.5.1) sobre la parte superior de la base cuadrada de madera, haciéndolo coincidir con la circunferencia que está trazada en dicha base. Asegure el piranómetro a la base con 3 tornillos y sus correspondientes tuercas mariposa (caja amarilla). Deben coincidir los orificios de la base del piranómetro (porcelana) con los orificios de la tabla cuadrada (dentro de la circunferencia).
- 4.- Sacar el voltímetro de la caja amarilla. Conectar los cables rojo y negro al voltímetro, en los orificios del lado derecho.
- 5.- Conectar las pinzas del voltímetro a las pinzas del cable gris del piranómetro, utilizando la pinza negra del piranómetro que tiene el gorro completo.
- 6.- Colocar el piranómetro y su base sobre el cuadripié.
- 7.- Poner el nivel sobre la tabla cuadrada que sostiene al piranómetro y nivelarlo. El equipo se podrá nivelar colocando pequeños guijarros entre las 2 tablas cuadradas.
- 8.- Hacer las mediciones de radianza colocando la perilla del voltímetro en la 4ª posición (mV ac+dc), esperando a que se estabilice la lectura.
- 9.- Apagar el voltímetro y voltear el piranómetro desde su base.
- 10.- Volver a nivelar y hacer la lectura de radiación reflejada.



Figura 5.5.1. Piranómetro Eppley

Referencias bibliográficas

Burt R. (Ed.). 2004. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. 700 ps.

Dane J.H., and G.C. Topp (Eds.). 2002. *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wis. 1692 ps.

Klute A. (Ed.). 1986. *Methods of Soil Analysis*. Part I. Physical Methods. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wis.

Richards L. A. 1985. *Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos*. 6^a. ed. Editorial Limusa. México, D. F. 172 p. (USDA, Manual 60).