

Análisis Granulométrico de Suelos

Por el Ingeniero

LUIS ECHEAGARAY BABLOT

Del Depto. de Investigaciones y Laboratorios de la S. C. O. P.

Agradezco a los Sres. Ings. César Jiménez L. y Pablo González L., las facilidades que me dieron para hacer este estudio, y a los Sres. Ings. Fernando Hiriart, Leonardo Zeevaert y Leopoldo Ortega Casas, sus valiosas sugerencias.

Reseña histórica.—El método de decantación para separar partículas de diversos tamaños se emplea desde épocas remotas; los antiguos griegos ya lo utilizaban. En 1692 lo aplicó por primera vez a los suelos, Gughton (B. A. Keen, *The Physical Properties of the Soil*, London, 1931).

En 1704 se emplearon los tamices para separar arenas.

En 1750 se ideó la primera clasificación de suelos por tamaños, para satisfacer la necesidad cada día mayor de dar una denominación a cada tipo de suelo, según sus características dominantes, las cuales se encontraron íntimamente ligadas con la composición granulométrica.

En 1805 se propuso un método para combinar el análisis con tamices y el de decantación, en una sola técnica.

En 1850 Stokes sometió a la consideración de la Cambridge Philosophical Society, sus investigaciones sobre el movimiento uniforme de una esfera en un líquido, que permitieron calcular la resistencia de los flúidos (Ley de Stokes), y tener un concepto claro sobre la viscosidad.

En 1867 Schöne aplicó la Ley de Stokes por primera vez, al análisis granulométrico de suelos, fundando los principios de éstos sobre bases científicas.

En 1915 apareció la balanza de sedimentación continua y se desarrolló una teoría matemática de los sistemas de sedimentación.

En 1918 Wiegner ideó la probeta con tubo manométrico para encontrar la proporción de partículas en suspensión después de determinado tiempo, dando nacimiento a la idea de determinar la proporción de partículas en suspensión en un líquido, en función de la densidad de la suspensión.

que después fué perfeccionada con el método del hidrómetro.

En 1922 y 1923, casi simultáneamente, Robinson, Jennings, Thomas y Gardner sugirieron el método de la pipeta, que es actualmente uno de los más recomendables para análisis precisos y resulta mucho más rápido que el de sedimentaciones sucesivas.

En 1927, Bouyoucos propuso el método del hidrómetro a que se refiere este trabajo, que es por ahora el de uso más general por rápido, sencillo y económico.

Actualmente están investigándose métodos para calcular la concentración de partículas de una suspensión en función del tiempo. Wagner y otros investigadores han resuelto ya el problema para materiales uniformes como el cemento, pero tratándose de suelos, Morrison ha probado que aún se desconocen ciertas leyes para establecer un método sencillo y económico.

Recientemente se ha comprobado que la relación que existe entre las propiedades de un suelo y su granulometría, es mucho más clara si se tiene en cuenta el porcentaje de partículas de tamaño coloidal (menor de 2 micras). No se ha encontrado un método expedito y seguro para hacer esta determinación, por lo que éste es uno de los puntos que se investigan en la actualidad con más interés, con la esperanza de abrir un nuevo horizonte en el campo de la Mecánica de Suelos.

Importancia del análisis granulométrico.—El estudio de las características de los suelos tiene más importancia cada día, tanto bajo el punto de vista de la ingeniería civil, como con fines agrícolas. Los adelantos de la Mecánica de Suelos en los últimos años son notables; pero algunos de sus procedimientos tienen el inconveniente de requerir pruebas de laboratorio tan costosas, difíciles y lentas, que los ponen fuera de la práctica. Por esta razón, se ha dado importancia a la idea de desarrollar métodos rápidos y fáciles de aplicar, que den una

orientación para resolver los problemas sencillos. Entre éstos están las pruebas de "Límites de Atterberg" y los "Análisis Granulométricos", que son de los más antiguos, pero que aún subsisten con ciertas modificaciones, por la gran utilidad que prestan, a pesar de que dan sólo datos generales.

Para conocer completamente las características de un suelo, es necesario estudiar su textura y su estructura; la primera se refiere a la forma, dimensiones, rugosidad, resistencia, densidad, etc., de los granos considerados individualmente; y la segunda, a la forma en que están acomodados los granos individuales para constituir el suelo, la resistencia de éste, su permeabilidad, etc.

Las pruebas de límites y las granulométricas no se refieren directamente a la estructura, sino solamente a ciertas propiedades de la textura; pero estas propiedades son tan características e influyen en tal forma en el comportamiento de un suelo, que dan a conocer indirectamente algunas de sus propiedades de estructura. Por ejemplo, un suelo con más de 30% de arcilla, o que tiene un índice plástico mayor de 15, en general es impermeable (Coeficiente de permeabilidad menor de un metro por año); tiene fuerte cohesión (frecuentemente más de 1 kg/cm²) y poca fricción interna (menor de 7°), su densidad aparente es escasa (menor de 1.6), se consolida difícilmente mientras está saturado de humedad, tiene una considerable capilaridad, está sujeto a fuertes contracciones al secarse o a expansiones si estando seco se humedece, etcétera.

Las características generales de un terreno, deducidas de su composición granulométrica, se encuentran en cualquier tratado completo de Mecánica de Suelos. Estas características se dan refiriéndolas al por ciento que contiene de arcilla, limo y arena. Esos datos generales bastan en la mayor parte de los casos para resolver los problemas sencillos que presentan los suelos; pero a veces no son suficientes, pues no debe perderse de vista que la granulometría es solamente uno de los muchos factores que determinan las propiedades de un material.

Supongamos que dos muestras tienen exactamente la misma granulometría, pero que una está constituida por granos de forma regular, redondeada y muy lisos, y otra muestra está formada por granos planos, irregulares y rugosos. La primera muestra presentará mayor facilidad para consolidarse que la segunda y su densidad aparente será mayor; pero si la segunda se consolida artificialmente hasta obtener la misma densidad apa-

rente que la primera, ésta será entonces más permeable, su resistencia a la penetración será menor y su resistencia al esfuerzo cortante será también menor que la segunda.

En resumen, cuando se tengan problemas delicados, habrá que recurrir a la técnica especial, difícil, costosa y lenta de la Mecánica de Suelos; pero cuando solamente se requiera un conocimiento general, puede encontrarse una solución aproximada, pero sencilla y económica, mediante el análisis granulométrico.

Necesidad de implantar un método detallado para los análisis granulométricos.—La American Society of Testing Materials, propuso en la parte II de los Standards de 1939, un método para el análisis granulométrico de suelos; pero deja algunos puntos sin precisar completamente. Esto puede dar lugar a que se encuentren resultados algo discrepantes para una misma muestra, según la forma en que se hagan ciertas operaciones de detalle, que aparentemente no tienen importancia, pero que sí influyen. Por otra parte, el procedimiento de cálculo sugerido, es lento. En la actualidad es posible perfeccionar un poco este procedimiento, evitando en parte los males señalados. Con ese objeto he escrito estos apuntes.

Si se analiza una muestra de la tierra de un suelo por diversos procedimientos para determinar su granulometría, pueden encontrarse resultados bastante discrepantes, a veces hasta contradictorios. No hay un método que dé a conocer con cierta precisión la distribución de tamaños. Los datos de un análisis deben considerarse solamente como el resultado de haber sometido una muestra a determinado proceso. Este resultado se acercará tanto más a expresar la verdadera composición del suelo, cuanto más perfecto sea el procedimiento seguido y se opere con mayores cuidados, pero en los casos más favorables, es común obtener datos con errores considerables. Estos errores no tienen importancia si son sistemáticos, es decir, si se mantienen más o menos constantes y en el mismo sentido, en todos los análisis. Por ejemplo: para una muestra que contenga realmente 20% de arcilla, no importa que en todos los laboratorios se determinen 24, 25 ó 26%; pero sí sería grave que se obtuviera 15% en un laboratorio y 20 y 25% en otros.

En el primer caso, serían comparables los resultados obtenidos por todos los laboratorios y se podrían deducir, en general, las características comunes a las tierras que tuvieran determinado porcentaje de arcilla, que es el elemento que más influye en ellas. En el segundo caso, estas caracterís-

ticas sólo podría establecerlas localmente cada laboratorio; es decir, lo que en el laboratorio "A" se dedujera respecto a la tierra que tiene 20% de arcilla, no podría aplicarse en los laboratorios "B" y "C", porque en ellos la misma tierra aparecería con un 15 o un 25% de arcilla.

En consecuencia, es indispensable que en todos los laboratorios se sigan rigurosamente los mismos métodos de análisis, para obtener resultados comparables.

Pondremos un ejemplo de algunas de las muchas causas de discrepancia entre los resultados que se tienen, siguiendo diferentes procesos.

Según las especificaciones de la A. S. T. M. parte II de los Standards de 1939, el análisis de los granos de mayor tamaño de 2 mm. se hace en tamices, y el de los de menor tamaño, por sedimentación. (1)

El análisis por tamices puede hacerse en seco o en húmedo; la cohesión en las tierras que tienen arcilla es tan fuerte, que resulta imposible disgregarlas en seco, por lo cual, las partículas retenidas en cada malla no constituyen granos individuales, sino que son conjuntos de granos unidos por cohesión. Si la muestra se criba en húmedo, con los dedos se disgregan fácilmente los terroncitos, y se hacen pasar por las diversas mallas mediante un chorrito de agua; la proposición que pase, dependerá en gran parte, del gasto y presión del chorro. Según esto, el análisis por cribado en seco indicará granulometrías mucho más gruesas que el cribado en húmedo, y en éste, influirán en los resultados las condiciones en que se aplique el chorro para lavar y dispersar los granos.

Algo semejante puede decirse respecto a la parte de la muestra analizada por sedimentación mediante el hidrómetro; los resultados dependen en gran parte de la forma en que se evite la floculación y no hay método completamente satisfactorio para conseguirlo.

Siendo evidente la necesidad de que el método de análisis sea idéntico en todos los laboratorios, a continuación describo el que propongo, como resultado de experiencias hechas para investigar la manera de disminuir los errores a que está sujeta

esta prueba, y procurar que se obtengan resultados uniformes.

METODO PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO DE TIERRAS

Se considera como tierra el material que pasa la malla número 4 (4.76 mm. de abertura). En la teoría se supone que los granos son de forma esférica, pero se aplican los mismos principios a cualquier suelo, aunque la forma de sus granos sea muy variada. Se llama tamaño de un grano al diámetro de la esfera que tiene un volumen igual al del grano. El análisis de los granos de 4.76 a 0.074 mm. de tamaño, se hará por medio de tamices, y el de los granos de 0.15 a 0.001 mm. por medio del hidrómetro; en los tamaños de 0.074 a 0.15 mm. deben concordar los resultados de los tamices y el hidrómetro.

1. Obtención y preparación de la muestra

Es de suma importancia que la muestra que se tome sea verdaderamente representativa del material. En el "Instructivo para el Estudio de Préstamos y Muestreo", de la Comisión Nacional de Irrigación, se describe la forma de tomar las muestras en el campo, según su objeto. A fin de que la pequeña muestra para el análisis granulométrico sea representativa de la muestra total recibida en el laboratorio, se seguirá el método de cuarteos ilustrado en la figura 1, procediendo en la siguiente forma:

Se rompen los terrenos mayores de 2 cm. con los dedos o con un mazo de madera.

Con una pala se amontona la muestra formando un cono, y procurando que cada palada caiga en el centro y derrame por igual en todas direcciones.

Se extiende el cono en un círculo, caminando alrededor y ensanchándolo gradualmente con la pa-

(1) Solamente los granos de un tamaño inferior a 0.2 mm., siguen la Ley de Stokes, que se aplica para determinar la granulometría por el método de sedimentación.

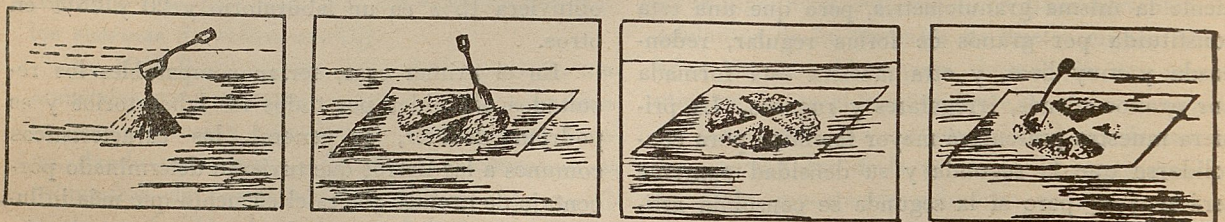


FIG. 1

la hasta que el material se extienda con un grueso uniforme.

Se divide el círculo en cuartos, se desechan dos cuartos opuestos, con los dos cuartos sobrantes se forma otra pila cónica, tomando alternativamente una palada de cada cuarto.

Con esta nueva pila se repite la operación, el número de veces necesarias hasta que sobren unos 3 kgs. de tierra, que se pasan por la malla número 4, rompiendo nuevamente todos los terrones para que queden retenidos únicamente los granos o piedrecillas individuales o conjuntos de granos unidos por materiales cementantes. (Terrón es el conjunto de granos que se mantienen unidos por cohesión con cementantes arcillosos únicamente; si se satura de humedad se reblandece y puede desmoronarse con los dedos.)

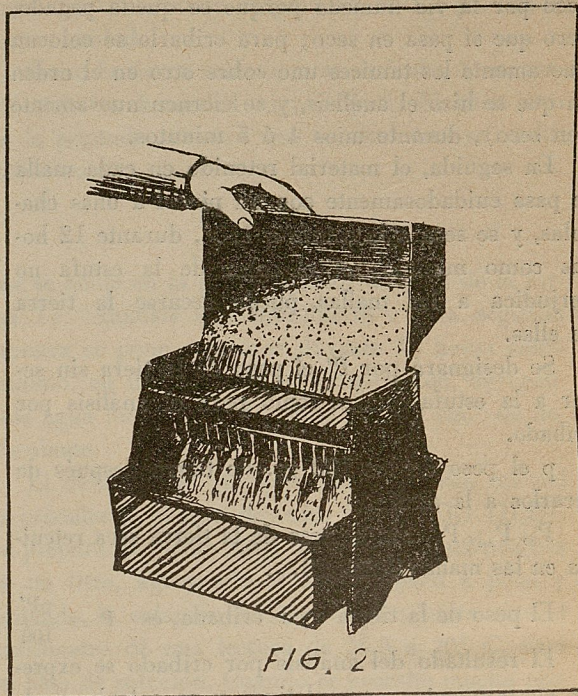
El peso del material retenido en la malla 4 y el que pasó por la misma, se anota en la parte superior de la forma 14 "Análisis por Cribado".

Cuando la muestra total pese menos de 10 kgs. o no contenga piedrecillas o terrones de mayor tamaño de 5 mm., no es necesario tomar por cuarteo la muestra para el análisis; basta extender la muestra total en el piso, y apartar la muestra para el análisis tomándola con un cucharón uniformemente, de toda la parte extendida.

Lo que pasó la malla 4 se mezcla perfectamente y se aparta un kg., ya sea por cuarteos o utilizando el aparato mostrado en la figura 2, que consiste de una tolva que en su parte inferior tiene láminas transversales que forman divisiones iguales para descargar a uno y otro lado de la tolva, sobre dos depósitos, en los que la muestra se divide mecánicamente en dos partes iguales: lo que cayó en un depósito se aparta, y lo que se recogió en el otro se vacía nuevamente en la tolva, repitiéndose la operación el número de veces necesario hasta obtener en uno de los depósitos el peso de la muestra requerido.

El kilogramo de tierra así obtenido se seca al sol, y se pasa (en seco) por la malla 100, desbaratando los terroncitos con los dedos, hasta reunir unos 250 grs., que se utilizarán para el análisis con hidrómetro en la forma que se describe después; la parte retenida en la malla 100 se tira.

Para el análisis por cribado se toman como 600 gr. de la tierra que pasó por la malla 4, se mezclan perfectamente, se pesan 100 gr. aproximando al décimo de gramo, se secan a la estufa a 110° durante 12 horas como mínimo, y se determina el peso de la tierra seca, que se anota en la parte superior derecha de la forma 14.



2. Análisis por cribado

Se determina al décimo de gramo el peso P' de la muestra sobrante después de tomar los 100 gramos y se pasa por la vía húmeda, por las mallas números 8, 14, 28, 48, 100 y 200, poniendo la 8 arriba y las demás una bajo otra en el orden indicado; lo que pasa la maya 200 se tira.

Para el lavado se utilizará una piceta de un litro; la abertura del tubo de salida será de 1 mm. de diámetro y el chorro se dejará caer siempre de una altura de 5 cm. sobre la tela, es decir, la piceta se moverá para facilitar el lavado de los granos, siempre con la abertura a 5 cm. de altura sobre la malla, para que se opere a una presión constante en todos los laboratorios.

Colocados los tamices unos sobre otros como se ha dicho, se principia por lavar la tierra en el tamiz número 8, frotando los terroncitos con los dedos para deshacerlos, al mismo tiempo que se echa agua con la piceta; no se tallen los granos contra la tela.

Cuando se note que en la malla 8 ya no hay terroncitos (grupos formados por conjuntos de granos), sino que todos los granos individuales retenidos son mayores que la abertura de la malla, se quita ésta y se repite la operación en la 14 y después en las otras hasta llegar a la 200.

Se ponen a secar al sol en las mismas mallas, los materiales retenidos en cada una; después de este secado queda en cada malla un polvito que no

pasó por la vía húmeda porque se queda pegado, pero que sí pasa en seco; para cribarlo se colocan nuevamente los tamices uno sobre otro en el orden en que se hizo el análisis, y se ciernen nuevamente (en seco), durante unos 4 ó 5 minutos.

En seguida, el material retenido en cada malla se pasa cuidadosamente con un pincel a unas charolas, y se seca a la estufa a 110°, durante 12 horas como mínimo; si el calor de la estufa no perjudica a las mallas, puede secarse la tierra en ellas.

Se designará por P' el peso de la tierra sin secar a la estufa que se tomó para el análisis por cribado.

p el peso de los 100 gr. de tierra después de secarlos a la estufa.

P₈, P₁₄, P₂₈ ... el peso de la tierra seca retenida en las mallas 8, 14, 28...

El peso de la tierra seca cribada, es $P = \frac{pP'}{100}$

El resultado del análisis por cribado se expresa en porcentos acumulativos y se calcula en la siguiente forma:

Peso de la tierra retenida en las mallas	% retenido	% acumulativo
P ₈	$\frac{100 P_8}{P}$	$\frac{100 P_8}{P}$
P ₁₄	$\frac{100 P_{14}}{P}$	$\frac{100 (P_8 + P_{14})}{P}$
.....		
P ₂₀₀	$\frac{100 P_{200}}{P}$	$\frac{100 (P_8 + P_{14} + \dots + P_{200})}{P}$

Peso de la tierra seca que pasa por la malla 100:

$$P_{100} = P - (P_8 + P_{14} + \dots + P_{100})$$

3. Idea general sobre el análisis con hidrómetro.—Los granos que pasan la malla 100 se analizarán por sedimentación: Para esto hay varios procedimientos, como el de la pipeta, el de sedimentaciones sucesivas de Wiegner, el del hidrómetro, etc.

Todos ellos están basados en la Ley de Stokes, que en principio consiste en que, dentro de ciertos límites, una esfera que está en suspensión en un fluido, cae con una velocidad que es directamente proporcional al cuadrado de su diámetro y a la diferencia de densidad entre el sólido y el fluido, e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. El problema consiste en determinar la velocidad de caída de los granos, para deducir su diámetro.

Si se determinan los tiempos t₁, t₂, t₃, que tardan diversos granos en descender dentro de una

probeta con agua la distancia vertical L, la Ley de Stokes permite deducir los diámetros d₁, d₂, d₃ correspondientes.

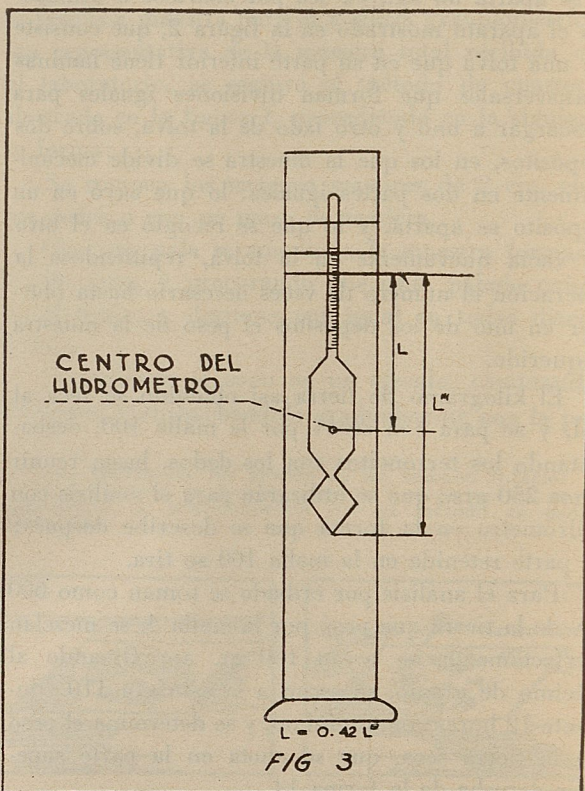
Para completar el análisis es necesario, además, saber qué cantidad o qué peso de granos de cada uno de esos diámetros hay en la probeta.

Con este fin se utiliza el hidrómetro (Fig. 3) que tiene una escala en el vástago para indicar el número de gramos g de material que hay en suspensión en la probeta desde la superficie del agua hasta el centro de flotación del hidrómetro (L). Así, al cabo del tiempo t₁, todos los granos mayores del diámetro d₁ ya habrán caído abajo de L, y la escala del hidrómetro indicará el número de gramos g₁ que hay en suspensión de menor diámetro que d₁.

Al cabo del tiempo t₂, el hidrómetro indicará cuántos gramos g₂ hay en suspensión de diámetro menor que d₂, y al cabo de t₃ los g₃ gramos de diámetro menor que d₃, etc.

En consecuencia, podemos decir que hay g₁ gramos que pasarían por una malla que tuviera una abertura de d₁ mm.; hay g₂ gramos de tierra que pasarían por una abertura de d₂ mm., etc., como si se hiciera un análisis por medio de tamices.

Naturalmente el fenómeno no se verifica en la forma tan simple como se ha descrito, pues al cabo del tiempo t₁, no solamente habrán caído abajo de



L todos los granos de diámetro *mayor* que d_1 , sino que, además, cayeron otros granos de diámetro *menor* que d_1 que al iniciarse la prueba se encontraban a una distancia menor que L respecto del centro del hidrómetro; pero los hidrómetros se calibran en una forma tal, que equivale a que el fenómeno se verifique como se ha dicho.

La Ley de Stokes es aplicable a tierras de tamaño comprendido entre 0.2 y 0.0002 mm.

La experiencia ha demostrado que los procedimientos actualmente en uso para hacer los análisis con hidrómetro a la temperatura ambiente, corrigiendo las lecturas por temperatura para reducir las a 20° C., son imprecisos, por lo que se procurará hacer las pruebas a 20° ó una temperatura tan cercana a ésta como sea posible.

Para esto se acondicionará un local de unos $5 \times 3 \times 3$ m.³, con paredes rellenas de algún material aislante, y se instalarán aparatos para controlar la temperatura, ya sea rudimentarios como cámaras humidificadoras y un ventilador para hacer bajar la temperatura, y focos o radiadores para subirla; o bien, mediante equipos completos para clima artificial adquiridos en el comercio. En este local podrán hacerse, además de los análisis granulométricos, las pruebas de densidad, permeabilidad y aquellas en las que la temperatura afecte los resultados. Cuando se dificulte la construcción de este local, se adquirirá un baño de temperatura constante, como el descrito en los standards de la A. S. T. M., Designation D 422-39, "Method of Mechanical Analysis of Soils". Estos aparatos hechos en México sacan un costo de unos \$ 800.00; son incómodos y solamente sirven para los análisis granulométricos, por lo que siempre que sea posible se preferirá el cuarto de temperatura controlable.

Las probetas que se utilicen serán de 45.7 cm. (18") de altura y 6.4 cm. (2.5") de diámetro interior, y tendrán una marca que señale 1 000 cm.³ de capacidad.

4. *Ejecución del análisis con hidrómetro.*—Como se indicó en el punto número 1, se pasan en seco unos 250 gr. de tierra por la malla 100; después se toma una primera muestra de 100 gr., se pone a secar a 110° C. durante 12 horas como mínimo, y se determina el peso w de la tierra seca, que se anota en la parte superior derecha de la forma 14 "Análisis con hidrómetro".

Del resto de la tierra que pasó la malla 100, se toma una segunda muestra como de 65 gr. en caso de que el material sea arcilloso, ó 115 gr. si es are-

noso, determinándose su paso W' al 0.1 gr. con el mayor cuidado.

Como la tierra solamente se secó al sol, no perdió toda su humedad higroscópica. El peso seco de la segunda muestra que se analizará en el hidrómetro es:

$$W = \frac{W' w}{100}$$

que se anota en la parte superior derecha de la forma 14 "Análisis con hidrómetro". Esta segunda muestra se pone a saturar durante 18 horas como mínimo, en una cápsula de evaporación, agregándole agua hasta cubrirla, y de 5 a 20 cm.³ de defloculante.

El defloculante puede ser una solución normal de cristales de silicato de sodio ($\text{Na}_2 \text{SiO}_3$) (H_2O). Se prepara poniendo agua destilada en una probeta de un litro, agregando el silicato poco a poco y agitando la solución constantemente hasta que el hidrómetro dé una lectura de 36.5 a 20° C. para un litro de solución. Cuando se necesite mucha precisión y se tema que la solución de silicato de sodio afecte a los resultados, deberán corregirse las lecturas del hidrómetro para tener en cuenta su influencia. Para esto se prepara un litro de solución, poniendo la misma cantidad que se agregó a la tierra, y se toma la lectura del hidrómetro, que será la corrección subtractiva que deberá hacerse.

Si la tierra contiene materia orgánica, antes de saturarla se le agregan 100 cm.³ de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) al 6%, y se mezcla perfectamente; se pone a la estufa a 110° C. durante una hora para destruir la materia orgánica y facilitar la dispersión, y después se satura como ya se indicó, durante 18 horas.

En seguida se pasa el material de la cápsula al vaso de un agitador (Fig. 4), se agrega agua destilada hasta unos 5 cms. abajo del borde del vaso, y se dispersa 15 minutos si se trata de arcillas o 5 si son migajones o limos. Se vacía el contenido del vaso en la probeta de sedimentación, lavándolo perfectamente para que no queden partículas adheridas a los deflectores del vaso; se agrega agua destilada hasta completar un litro de suspensión procurando que el agua esté lo más cerca posible a 20° C. de temperatura. Se pone la probeta en el cuarto o en el baño de temperatura constante, agitando la muestra frecuentemente, hasta que tome la temperatura del cuarto o el baño, que se procurará sea de 20° C.

Se cubre la boca de la probeta con la palma de la mano y se agita durante un minuto o el tiempo

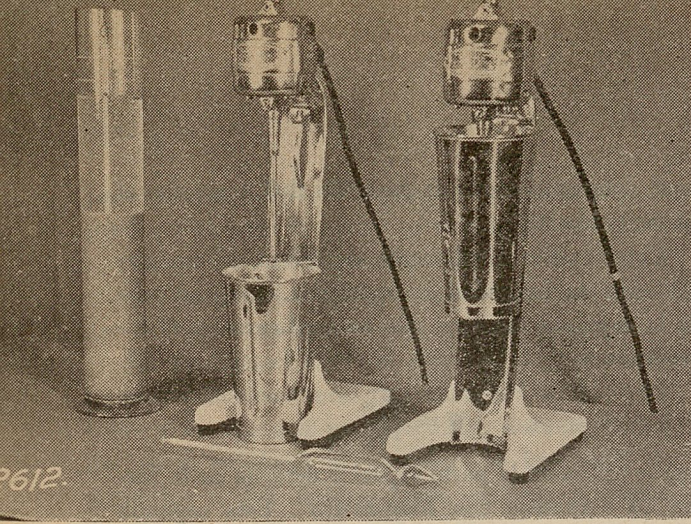


Fig. 4

necesario para obtener una suspensión uniforme. Se coloca la probeta rápidamente sobre la mesa del cuarto de temperatura constante, o en el tanque del baño, se hace funcionar el cronógrafo, se coloca el hidrómetro y se hace una lectura en la parte superior del menisco, a los 20 segundos, 40 segundos, 1 minuto y 2 minutos; se coloca el termómetro en la probeta; a los 5 minutos de iniciada la prueba se leen el hidrómetro y el termómetro, se sacan cuidadosamente para no alterar la columna de dispersión, se enjuagan y se dejan en agua que esté a la misma temperatura que la suspensión; con suficiente anticipación se vuelven a introducir en la suspensión con el mayor cuidado, para hacer otra lectura a los 10 minutos, se vuelven a sacar y así se prosigue haciendo lecturas a los 20 y 40 minutos, hora y media, 4 horas y 22 horas.

Las lecturas se anotan en las columnas a, b, c, d, de la forma 14.

Antes de utilizar un hidrómetro, deberá desengrasarse perfectamente el vástago, lavándolo con agua y jabón, y con alcohol, a fin de que la elevación del menisco en la escala sea siempre la misma en cada hidrómetro.

En las pruebas delicadas, después de concluir las lecturas del hidrómetro, se vacía el contenido de la probeta en un recipiente como un vaso de precipitado o una charola grande, enjuagando varias veces la probeta para que no queden en ella partículas de tierra; se pone el recipiente en una estufa a 110° C. de temperatura, durante 24 horas como mínimo, para que se evapore el agua y se seque la tierra; la diferencia de pesos del recipiente con la tierra seca y del recipiente vacío, será el peso de la tierra seca, que debe coincidir con el que se determinó con la fórmula:

$$W = \frac{W' - w}{100}$$

Si la diferencia es mayor que 0.2 gr., es conveniente repetir el análisis.

5. Correcciones a las lecturas del hidrómetro.—

Se corrigen las lecturas del hidrómetro por calibración y temperatura utilizando las escalas 6 y 7 adjuntas Lám. N° 10; la lectura corregida se anota en la columna e del anexo 14, la escala 6 debe determinarse experimentalmente para cada hidrómetro, en todos los casos; la escala 7 puede utilizarse para cualquier hidrómetro sólo en trabajos de rutina; cuando se requiera alguna precisión, debe determinarse también experimentalmente para cada hidrómetro, pues en la corrección interviene la dilatación del bulbo. Es laborioso e impreciso calcularla analíticamente, por lo que se determinará de preferencia experimentalmente. Las anotaciones de la columna e deben corregirse siempre que la densidad de la tierra sea diferente de 2.65; el factor de corrección por densidad F se toma de la escala 8 y se anota en la parte superior de la forma 14. Se multiplica este factor por las cantidades de la columna e, y los resultados se anotan en la f, que indicará las lecturas del hidrómetro con todas las correcciones.

6. Cálculo de los porcientos.—Para obtener el % de material en suspensión en cada lectura, con referencia al peso de la muestra tomada para el análisis con hidrómetro, se multiplican por 100 las lecturas de la columna f y se divide entre W. Estos resultados indican el % de material que pasaría por las mallas que tuvieran una abertura igual a los tamaños indicados en la columna K.

Los datos del análisis deben referirse al material que pasa la malla número 4, o sea a los P gramos que se tomaron para cribarlos en las mallas.

Si con el hidrómetro se analizaran los P₁₀₀ gramos de tierra que pasan en húmedo por la malla 100 al hacer el cribado de la segunda muestra, las lecturas del hidrómetro "l" indicarían directamente los resultados que se obtendrían si se continuara el análisis de esta segunda muestra para los tamaños más chicos que las mallas. Pero como para el hidrómetro se emplean W gramos, es necesario deducir las lecturas l'₁, l'₂ . . . que se hubieran obtenido con los P₁₀₀ gramos. Dichas lecturas serían:

$$l'_1 = \frac{l_1 \cdot P_{100}}{W} \quad l'_2 = \frac{l_2 \cdot P_{100}}{W}$$

Los porcientos de material referidos a la muestra que pasa la malla 4, de tamaños menores que d₁, d₂, d₃ . . . se calculan con las fórmulas:

$$\frac{100 \cdot P_{100} \cdot l'_1}{PW}, \quad \frac{100 \cdot P_{100} \cdot l'_2}{PW}, \quad \frac{100 \cdot P_{100} \cdot l'_3 \dots}{PW}$$

Estos porcientos se anotan en la columna g.

7. *Cálculo de los tamaños.*—La Ley de Stokes se expresa generalmente en la forma:

$$V = \frac{1 \cdot (D - D') \cdot d^2}{18n}$$

- V = Velocidad de caída en cm./seg.
- D = Densidad de la tierra (gr./cm.³).
- D' = Densidad del agua.
- d = Tamaño del grano en cm.
- n = Viscosidad del líquido en gr. \times seg. / cm.²

Si para comodidad de los cálculos se pone V en cm./min., n en poises y d en mm. resulta:

$$V = \frac{32.7 (D - D') d^2}{n}$$

de donde haciendo:

$$C = 0.1749 \sqrt{\frac{n}{D - D'}}$$

resulta:

$$d = C \sqrt{V}$$

que permite calcular el diámetro de los granos de tierra que caen en una suspensión con velocidad V.

Los valores de C se toman del diagrama número 11, calculado para temperaturas del agua de 15 a 30° C. para densidades de tierra de 2.35 a 2.90; se anotan en la columna j.

Para calcular \sqrt{V} se tiene en cuenta que los granos caen en la suspensión con velocidad uniforme: si un grano desciende L cm., en T minutos, resulta:

$$V = \frac{L}{T}$$

Los hidrómetros empleados están calibrados de modo que las lecturas de la escala indican el número de gramos de tierra que está en suspensión en la probeta, desde un punto llamado "centro de flotación del hidrómetro" hacia arriba; por ejemplo, si la lectura del hidrómetro es 43 y se ha calculado en la forma que después describimos $d = 0.005$ mm., quiere decir que en la probeta hay 43 gramos de tierra de diámetro menor de 0.005 mm., desde el centro del hidrómetro para arriba.

Otros hidrómetros dan la densidad de la suspensión correspondiente al centro de flotación del hidrómetro, lo cual modifica ligeramente el procedimiento del cálculo, que no describimos porque en México excepcionalmente se usan esos hidrómetros.

A medida que la suspensión se asienta, sube el centro del hidrómetro en la probeta y baja en ésta el nivel del agua, por lo que el valor de L depende

del porcentaje de materiales que esté en suspensión, o en otras palabras, de la lectura del hidrómetro.

Aproximadamente, se ha deducido que si L'' es la profundidad del extremo inferior del hidrómetro, la altura de caída efectiva L desde el punto de la lectura del vástago (Fig. 3) al centro del hidrómetro es:

$$L = 0.42 L''$$

Con esta relación se forma una tabla que da las alturas de caída L correspondientes a las lecturas del hidrómetro.

Las casas fabricantes procuran que todos sus hidrómetros tengan la misma relación entre la altura de caída y la lectura del vástago, pero de todos modos es necesario que al hacer la calibración de los hidrómetros en los laboratorios, se determinen los valores de L.

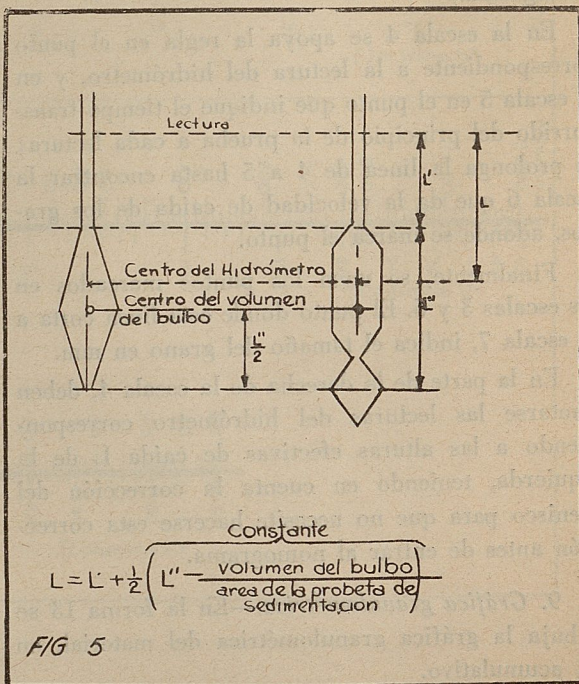
La escala 9 da los valores de \sqrt{L} en función de las lecturas originales del hidrómetro N° 28153.

Cuando se tenga manera de medir el volumen del bulbo del hidrómetro, no se aplicará la fórmula anterior que es sólo aproximada, sino la siguiente, que fué establecida por A. Casagrande (Ver Fig. 5).

$$L = L' + \frac{1}{2} \left(L'' - \frac{\text{Volumen del bulbo}}{\text{Area de la sección transversal de la probeta de sedimentación.}} \right)$$

L = Altura efectiva de caída.

L' = Distancia del extremo superior del bulbo a las diversas partes de la escala del vástago.



L'' = Longitud del bulbo en cm.

Con la escala 10 se determinan los valores de \sqrt{T} correspondientes a los tiempos transcurridos desde que se inició la prueba hasta que se hace cada lectura de hidrómetro.

Los valores de \sqrt{L} se anotan en la columna h de la forma 14 y los de \sqrt{T} en la columna i, con estos valores y de los respectivos de C pueden deducirse los diámetros de los granos correspondientes a cada lectura del hidrómetro (producto de la columna j x h dividido por la i), que se anotan en la columna k.

Las columnas g y k dan a conocer la composición granulométrica de la muestra total; es decir, indican los % acumulativos de tierra que pasarían por mallas que tuvieran las aberturas indicadas en la columna k.

8. *Nomograma.*—El procedimiento anterior permite obtener el diámetro de los granos con 3 cifras de aproximación. En todas las pruebas de rutina bastan dos cifras, y entonces se facilita notablemente el cálculo utilizando el nomograma de Casagrande, marcado con el número 12.

Se apoya una regla en la escala 1, en el punto correspondiente a la densidad de la tierra, y en la escala 2 en el punto que indique la temperatura media desde que se principió la prueba hasta el momento en que se hace cada lectura; se prolonga la línea de 1 a 2 hasta encontrar la escala 3, en la que se anota la intersección. (Véase la clave del nomograma.)

En la escala 4 se apoya la regla en el punto correspondiente a la lectura del hidrómetro, y en la escala 5 en el punto que indique el tiempo transcurrido del principio de la prueba a cada lectura; se prolonga la línea de 4 a 5 hasta encontrar la escala 6 que da la velocidad de caída de los granos, adonde se marca el punto.

Finalmente, se unen los puntos marcados en las escalas 3 y 6. El punto donde esta línea corta a la escala 7, indica el tamaño del grano en mm.

En la parte de la derecha de la escala 4, deben anotarse las lecturas del hidrómetro correspondiendo a las alturas efectivas de caída L de la izquierda, teniendo en cuenta la corrección del menisco para que no necesite hacerse esta corrección antes de entrar al nomograma.

9. *Gráfica granulométrica.*—En la forma 13 se dibuja la gráfica granulométrica del material, en % acumulativo.

Para la parte analizada por cribado se pasan a escala los datos de las dos últimas columnas de la derecha de la forma 14 "Análisis por cribado", tomando los tamaños en la escala de la derecha, y los % retenidos acumulativamente en la escala de abajo.

La gráfica partirá de un % retenido igual a cero para el tamaño 4.76 mm., que es la abertura de la malla número 4 por la cual se cribó todo el material previamente. Después del punto correspondiente a la malla 4, se dibujan los de las mallas 8, 14, 28, 48, 100 y 200, con aberturas de 2.362, 1.168, 0.589, 0.295, 0.147 y 0.074 mm. respectivamente, suspendiéndose la gráfica en el último, que corresponde al tamaño 0.074 mm.

En el cuadro 15 se anotan las aberturas correspondientes a los tamices "Tyler" y sus equivalentes de la serie U. S.

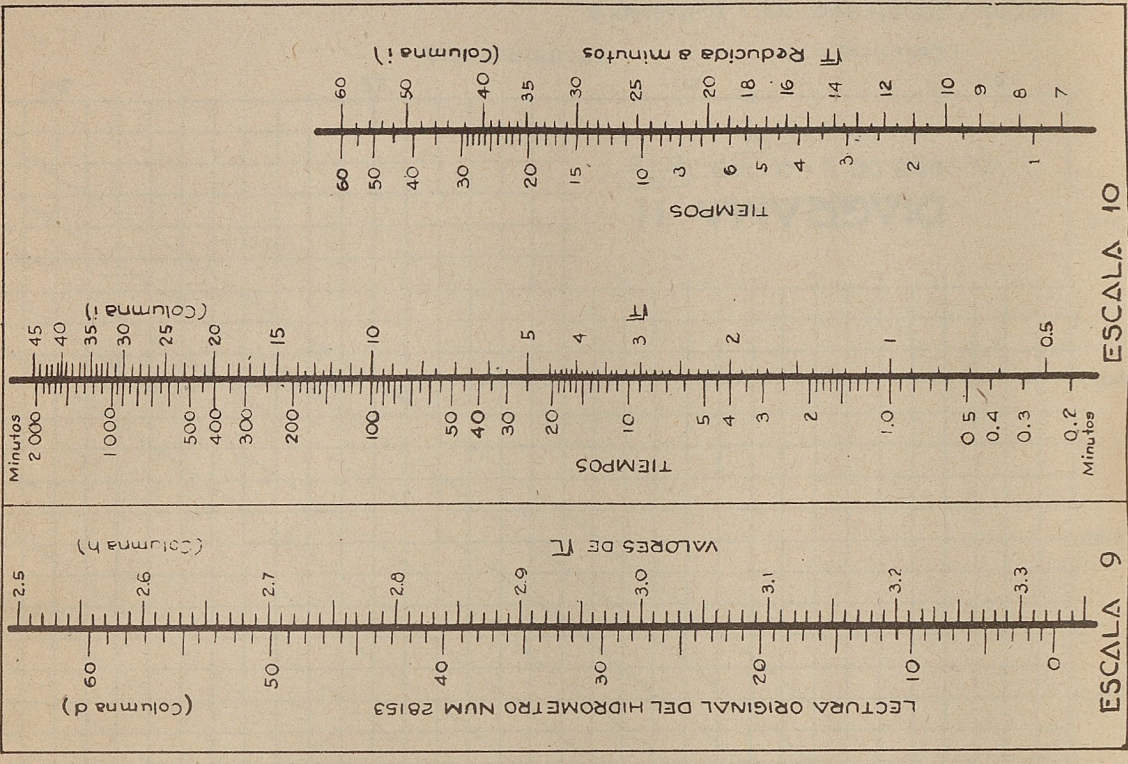
Para continuar el dibujo de la gráfica en la parte analizada con hidrómetro, los porcentajes anotados en la columna g se toman en la escala superior de la forma 13 "tanto por ciento que pasa", y los "Tamaños" correspondientes indicados en la columna k en la escala de la derecha. Para los tamaños de 0.074 a 0.15 mm., la gráfica tiene una parte común para el análisis por cribado y el del hidrómetro, en la que deben obtenerse resultados concordantes.

10. *Clasificación.*—Los granos de tierra reciben diversas denominaciones según sus tamaños. El Anexo número 16 indica las clasificaciones propuestas por el Bureau of Soils, de los Estados Unidos; por el Instituto Técnico de Massachussets; la llamada Internacional de Gilboy y Plummer; la de Atterberg y la del Comité de Cimentaciones de la ciudad de México, sugerida por el señor ingeniero José A. Cuevas.

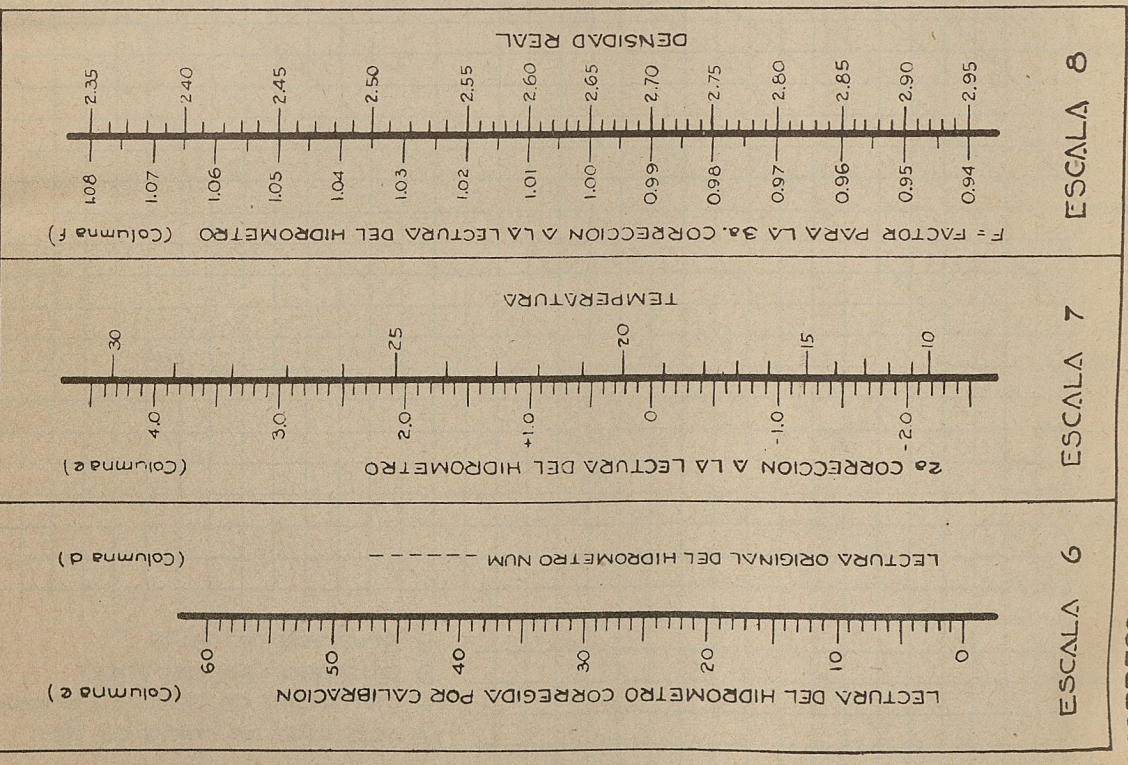
Según la proporción en que están mezcladas las partículas de diversos tamaños para constituir los suelos, se clasifican en 5 grupos principales como se indica en el Anexo número 17, que se subdividen en 17 clases. El Departamento de Investigaciones y Laboratorios de la S. C. O. P. está estudiando actualmente la forma de simplificar esta clasificación.

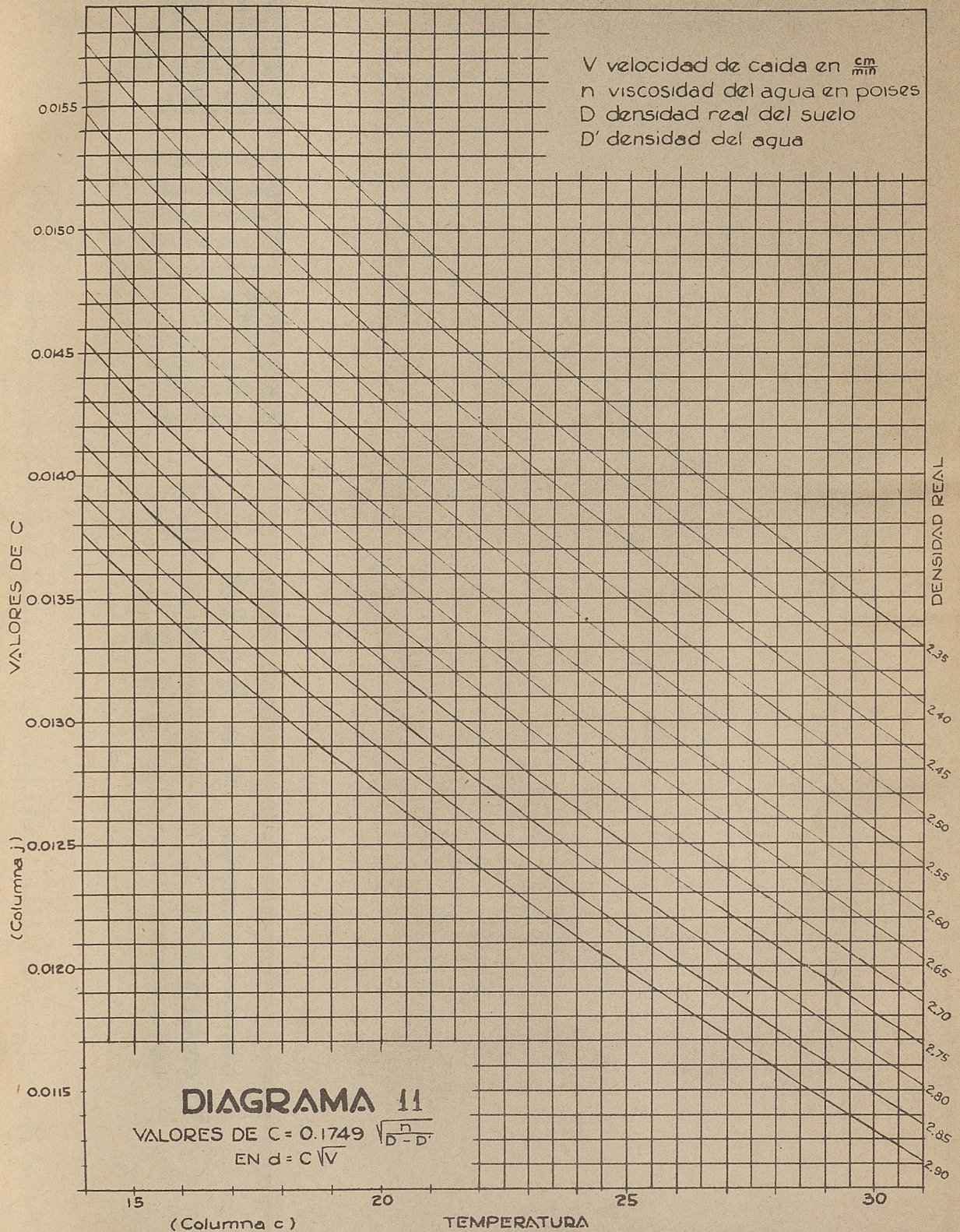
La clasificación por tamaños se deduce de la gráfica de cada tierra en la escala de la derecha de la forma 13; la clasificación de la composición granulométrica de la tierra se anota en la parte superior de la forma 13, y se toma del Anexo 17 según la proporción que haya de granos de cada tamaño.

**CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CAIDA PARA
 APLICAR LA FORMULA $d=C\sqrt{v}$; $v=\frac{d}{C}$**



CORRECCIONES A LA LECTURA DEL HIDROMETRO
 Calculó y construyó: ING. L. ECHEAGARAY B. Calcoí: L. PARRA





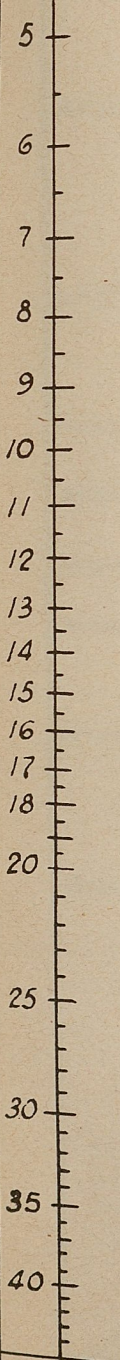
Calculó y construyó ING. L. ECHEAGARAY B.
Calco: L. PARRA

NOMOGRAMA DE CASAGRANDE PARA LA LEY DE STOKES.

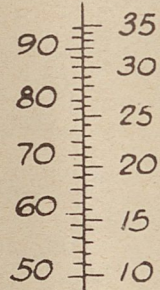
- η - Viscosidad del líquido en $g\ s\ cm^{-2}$
- S - Peso específico del suelo en gramos
- S_L - Peso específico del líquido.
- v - Velocidad en $cm/seg.$
- D - Diámetro del grano en $mm.$
- T - Promedio pesado de la temperatura con relación al tiempo, desde que principió la prueba hasta que se hace cada lectura de Hidrómetro.
- H - Altura de caída en $cm.$
- t - Tiempo en segundos.

3

$B \times 10^3$

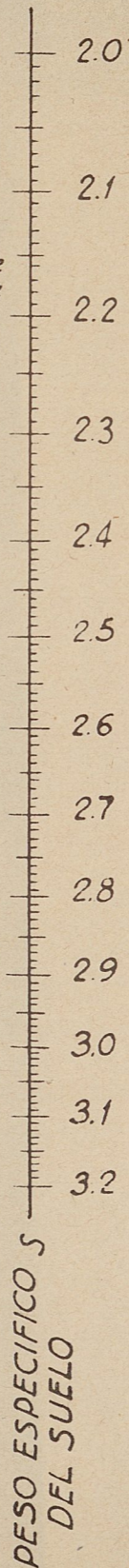


2

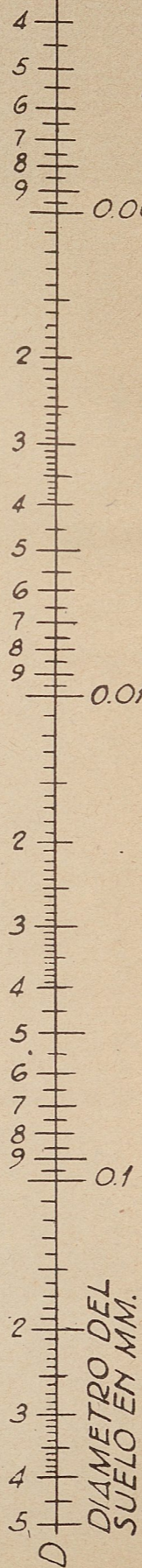


GRADOS FAHRENHEIT
TEMPERATURA T
GRADOS CENTIGRADOS

1

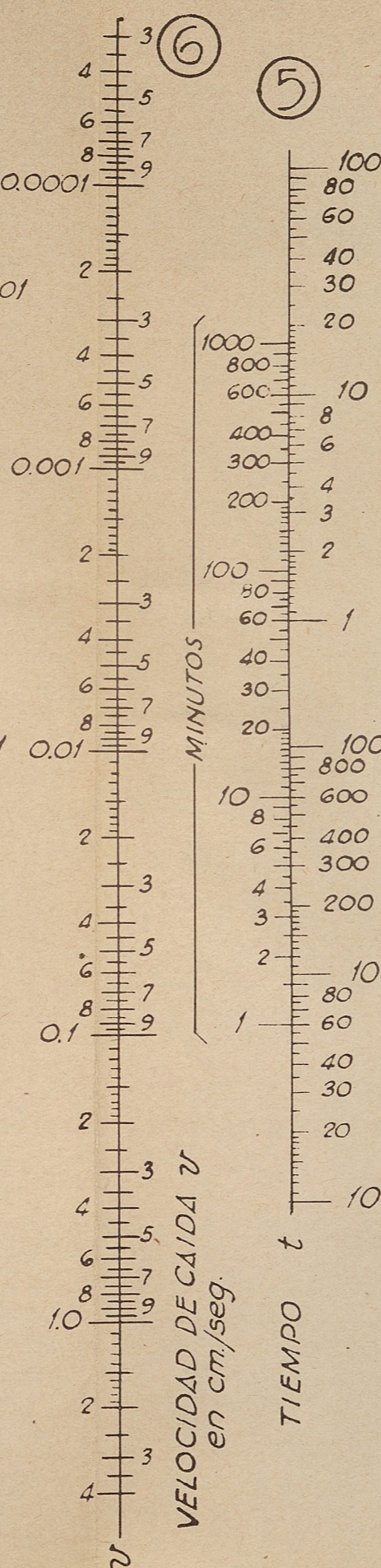


7



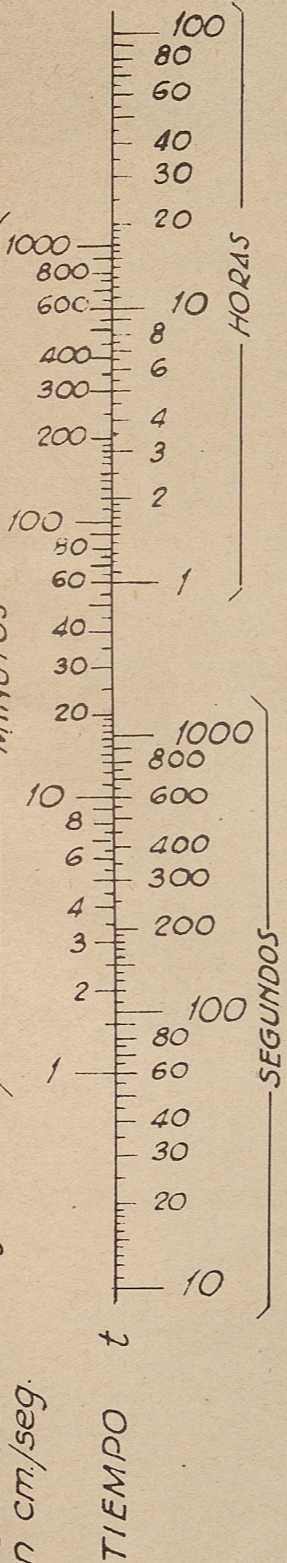
DIAMETRO DEL SUELO EN MM.

6



VELOCIDAD DE CAIDA v en $cm/seg.$

5



TIEMPO t

LEY DE STOKES

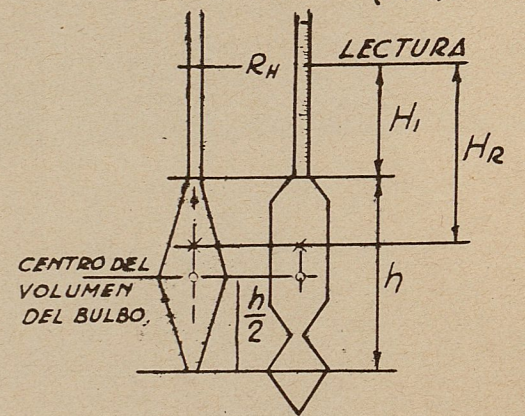
$$D = \sqrt{Bv}$$

$$B = \frac{1800\eta}{S - S_L}$$

$$v = \frac{H_R}{t}$$

4

GRADUACION DE LA ESCALA (R_H)



La altura de caída H_R que corresponde a la lectura R_H del hidrómetro se determina con la fórmula:

$$H_R = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{\text{Volumen del bulbo del Hidrómetro}}{\text{Area de la probeta de sedimentación}} \right)$$

CONSTANTE

H_1 Debe determinarse para diferentes valores de R_H . A la derecha de la escala 4 deben anotarse los valores de R_H que correspondan a las respectivas alturas de caída H_R .

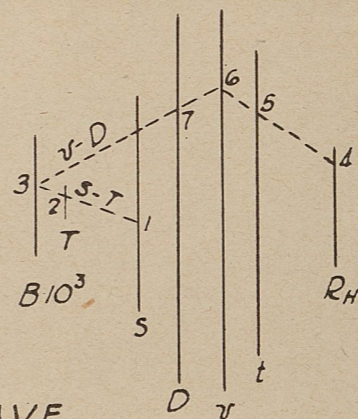
Los hidrómetros se calibran a 20° ; H_1 varía de 14 a 16 cm. y h de 15 a 17 cm. en los diversos tipos.

Para líquidos diferentes del agua, deben calcularse los valores de B y modificar la escala 3; las escalas 1 y 2 se aplican solamente a suspensiones en agua.

A. Casagrande, Jul. 1929
Revisado May. 1931
Revisado Oct. 1938.

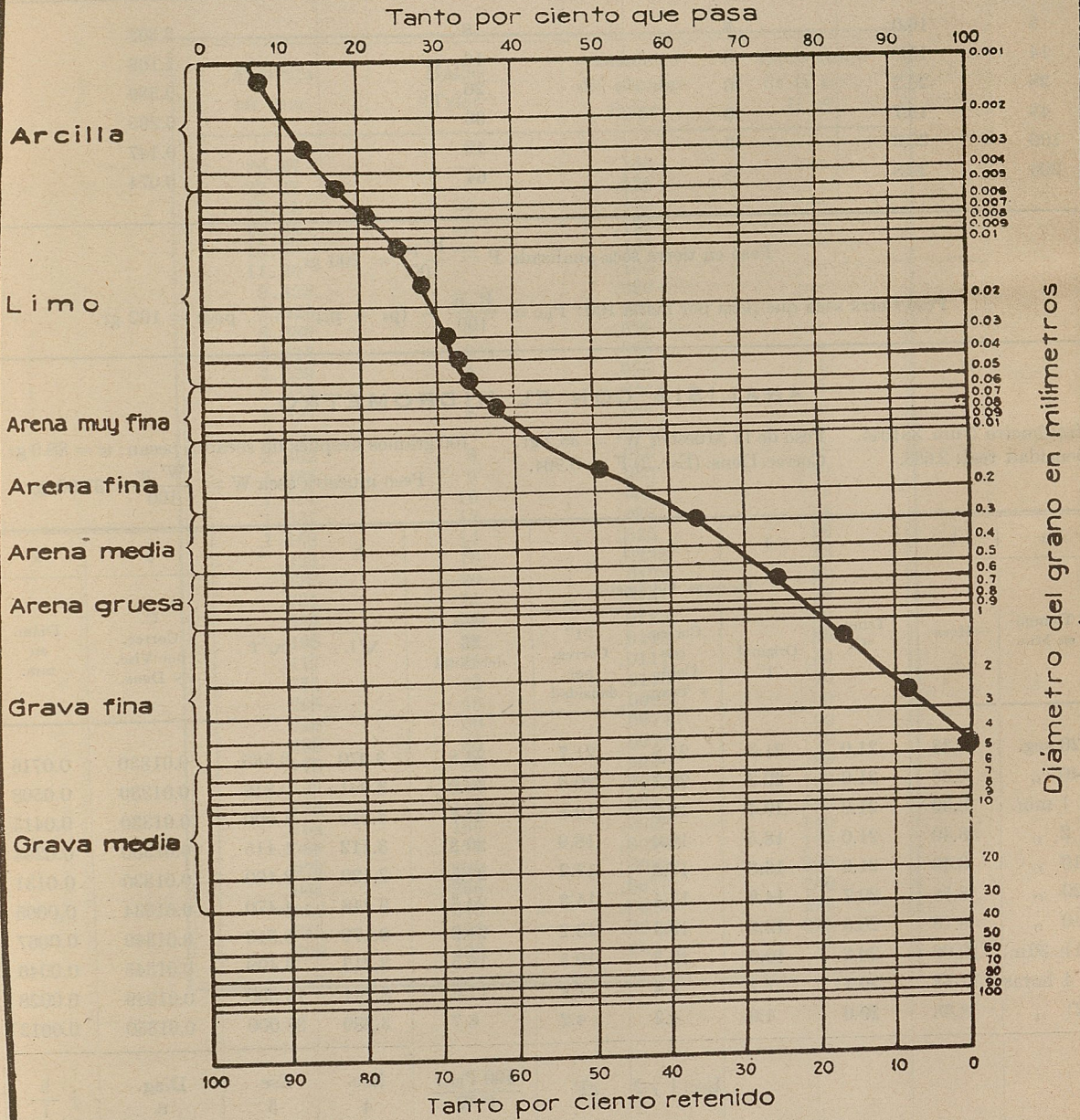
Adaptó: Ing. L. Echeagaray B.
Dibujo: S. Alcalde.

CLAVE



ANALISIS GRANULOMETRICO

Proyecto Camino Tampico Muestra # 946 Pozo _____
 Operador S. Gutierrez Zamora Ubicación _____
 Fecha _____ Elevación _____ Profundidad _____
 Clasificación _____



Dibújese con línea puntuada la gráfica de la muestra total, y con línea continua la gráfica de la parte de la muestra que pase la malla 4.

Forma No 13

LABORATORIO DE MATERIALES

ANALISIS GRANULOMETRICOS

Proyecto u obra: Junta Caminos. Muestra: Núm. 946. Pozo
 Ubicación: Camino Tampico-Valles. Elev. Prof.
 Km. 21 + 970

ANALISIS POR CRIBADO

Fecha: 8 de junio de 1942. Retenido Malla 4 47.0% Kg. Pasa malla 4 53.0%
 Operador: S. Gutiérrez Zamora. Muestra tomada P' = 228.0 gr. Muest. que se secó p = 87.5 gr.

Malla Núm.	Peso retenido	% retenido	% acumulativo	Tamaño en mm.
8	16.0	8	8	2.362
14	15.8	8	16	1.168
28	20.2	10	26	0.589
48	19.7	10	36	0.295
100	26.3	13	49	0.147
200	29.8	15	64	0.074

$$\text{Peso en tierra seca analizada } P = \frac{P' p}{100} = 200 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso tierra seca que pasa por malla 100: } P_{100} = \frac{P' p}{100} - (p_8 + p_{14} + \dots + p_{100}) = 102 \text{ gr.}$$

ANALISIS CON EL HIDROMETRO

Hidrómetro Núm. 381045. Peso de la Muestra W' = 36.2 gr. 100 gramos después de secados pesan: w = 88.9 gr.
 Densidad real: 2.683. Correc. Dens. (Esc. 3) F = 0.994. Peso muestra seca W = $\frac{W' w}{100} = 31.90 \text{ gr.}$

a	b	c	d			e	f	g	h	i	j	k
Tiempo en Min.	Hora	Temp. °C.	Lecturas hidrómetro			Pasa % del total	\sqrt{L}	\sqrt{T}	C. Correc. por Visc. y Dens.	Diám. en mm.		
			Original "1"	Correg. por Calib. y Temp.	"1" Correg. por densidad							
20 seg.	8.38	21.0	21.3	21.8	21.7	34.8	3.070	0.580	0.01330	0.0716		
40 "	8.38	21.0	20.2	20.7	20.6	33.0	3.091	0.816	0.01330	0.0508		
1 min.	8.39	21.0	19.4	19.9	19.8	31.7	3.010	1.000	0.01330	0.0415		
2 "	8.40	21.0	18.5	19.0	18.9	30.3	3.112	1.415	0.01330	0.0293		
10 "	8.48	21.0	16.8	17.3	17.2	27.5	3.129	3.160	0.01330	0.0131		
20 "	8.58	20.7	14.9	15.4	15.3	24.5	3.148	4.470	0.01334	0.0095		
40 "	9.18	20.5	12.9	13.3	13.2	21.2	3.170	6.310	0.01340	0.0067		
1h.30m.	10.08	20.2	10.0	10.3	10.3	16.5	3.213	9.490	0.01345	0.0046		
4 horas	12.38	20.1	7.2	7.4	7.4	11.8	3.241	15.500	0.01349	0.0028		
21 "	8.38	20.0	4.0	4.2	4.2	6.7	3.280	38.000	0.01350	0.0012		
				Esc. 1 y 2	eF	$\frac{100 P_{100} l}{P W}$	Esc. 4	Esc. 5	Diag. 6	$j \frac{h}{i}$		

Arcilla: 16.5 % Arena media: 12.0 %
 Limo: 16.5 " " gruesa: 8.0 "
 Arena muy fina: 7.0 " Grava fina: 20.0 "
 Arena fina: 2.00 "

CUADRO 15
TAMICES EMPLEADOS PARA HACER ANALISIS GRANULOMETRICOS

Abertura en mm.	Mallas "Tyler"	Diámetro del alambre Pulg.	Equivalente de la serie U. S.
26.67	—	.148	—
22.43	—	.135	—
18.85	—	.135	—
15.85	—	.120	—
13.33	—	.105	—
11.20	—	.105	—
9.423	—	.092	—
7.925	2½	.088	—
6.680	3	.070	—
5.613	3½	.065	—
4.699	4	.065	4
3.962	5	.044	5
3.327	6	.036	6
2.794	7	.0328	7
2.362	8	.032	8
1.981	9	.033	10
1.651	10	.035	12
1.397	12	.023	14
1.168	14	.025	16
.991	16	.0235	18
.833	20	.0172	20
.701	24	.0141	25
.589	28	.0125	30
.495	32	.0118	35
.417	35	.0112	40
.351	42	.0100	45
.295	48	.0092	50
.246	60	.0074	60
.208	65	.0072	70
.175	80	.0056	80
.147	100	.0042	100
.124	115	.0038	120
.104	150	.0026	140
.089	170	.0024	170
.074	200	.0021	200
.061	250	.0016	230
.053	270	.0016	270
.043	325	.0014	325
.038	400	.001	—

CLASIFICACIONES DE SUELOS SEGUN EL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS

TAMAÑO DEL GRANO EN MICRAS	INTERNACIONAL SEGUN GILBOY y PLUMMER	BUREAU OF SOILS IN U.S.A.	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY	ATTERBERG	ING. CUEVAS	ESTRUCTURA	ANALISIS
20 000				STEIN UNED GEROLD			
2 000				KIESS			
1 000	VERY COARSE	FINE GRAVEL	COARSE	GROBSAND	ARENAS	GRANULAR	MECANICO
600	COARSE	COARSE SAND					
500							
250	MEDIUM	MEDIUM SAND					
200		FINE SAND					
100	FINE		FINE				
74	COARSE	VERY FINE SAND	COARSE	FEIN SAND	LAMAS	CAVERNOSA SIMPLE	SEDIMENTACION
60							
50							
20	FINE		MEDIUM				
6	COARSE	SILT	FINE	SCHLUFF			
5	FINE						
2	COARSE		COARSE				
0.6	FINE		MEDIUM		ARCILLAS		
0.2		CLAY	FINE	KELLOIDE	COLOIDES	SUPERCAVERNOSA	
0.1			(COLLOIDS)	TEILCHEN	SOLUCIONES		
0.001	ULTRA CLAY			ODER ROHTON	CRISTALES MOLECULARES		

ANEXO 16

CUADRO SINOPTICO DE CLASIFICACION DE TIERRAS

ANEXO NUM. 17

Menos de 20% de arcilla.	Menos de 20% de arcilla y limo.	A R E N A S	35% o más de grava fina y arena gruesa y menos de 50% de arena fina y muy fina..	ARENA GRUESA.
			20% o más de grava fina y arena gruesa, 15% o más de arena media y menos de 50% de arena fina y muy fina	ARENA MEDIA.
			50% o más de arena fina y muy fina	ARENA FINA.
	De 20 a 50% de arcilla y limo.	M I G A J O N E S A R E N O S O S.	50% o más de arena muy fina	ARENA MUY FINA.
			Más de 45% de grava fina y arena gruesa. 25% o más de grava fina, arena gruesa y media, menos de 35% de arena muy fina y menos de 45% de grava fina y arena gruesa	MIGAJON ARENOSO GRUESO.
			35% o más de arena fina y muy fina, menos de 25% de grava fina y arenas gruesa y media	MIGAJON ARENOSO MEDIO.
			Más de 35% de arena muy fina	MIGAJON ARENOSO FINO. MIGAJON ARENOSO MUY FINO.
	50% o más de arcilla y limo.	F R A N C O S, M I G A J O N E S L I M O S O S Y L I M O S.	Menos de 20% de arcilla, de 30 a 50% de limo y de 30 a 50% de arena	FRANCO.
			Menos de 20% de arcilla, de 50 a 80% de limo y menos de 50% de arena	MIGAJON LIMOSO.
			Menos de 20% de arcilla, 80% o más de limo y menos de 20% de arena	LIMO.
De 20 a 30% de arcilla.	M I G A J O N E S. A R C I L L O S O S.	Menos de 30% de limo y de 50 a 80% de arena	MIGAJON ARCILLOSO ARENOSO.	
		De 20 a 50% de limo y de 20 a 50% de arena	MIGAJON ARCILLOSO.	
		De 50 a 80% de limo y menos de 30% de arena	MIGAJON ARCILLOSO LIMOSO.	
30% o más de arcilla.	A R C I L L A S.	De 30 a 50% de arcilla, menos de 20% de limo y de 50 a 70% de arena	A R C I L L A A R E N O S A.	
		30% o más de arcilla, menos de 50% de limo y menos de 50% de arena	A R C I L L A.	
			De 30 a 50% de arcilla, de 50 a 70% de limo y menos de 20% de arena	A R C I L L A L I M O S A.