

# EL MÉTODO DEL HIDRÓMETRO: INFLUENCIA DE LOS TIEMPOS DE LECTURAS EN EL CÁLCULO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN SUELOS DE LA HABANA

J. García<sup>✉</sup>, H. Medina y D. Núñez

**ABSTRACT.** The hydrometer method is one of the most widely used for soil texture analysis in the world. This study is aimed at evaluating the influence of hydrometer reading times for determining soil particle size distribution in Havana province. It is supported by 101 property measurements, starting from 51 sampling points at two depths, 10-15 and 35-40 cm. Point distribution responds to a more ambitious project focused on evaluating several physical, chemical and hydraulic properties from this province, by means of a nonaligned stratified sampling. Three methodologies, markedly differing in terms of reading times, were compared to that reported by the Soil Science Society of America (SSSA). It was proved that by limiting measuring times to one or two hours, as it is usually done in several Cuban agronomic laboratories, soil texture classification may change completely, with a large clay content overestimation. Calculated sand values were sensitive to the methodology just for the high contents of this fraction.

*Key words:* methods, measuring instruments, particle size, soil, Havana

**RESUMEN.** El método del hidrómetro es uno de los más extendidos mundialmente para el análisis textural de los suelos. El objetivo de este estudio es evaluar la influencia de los tiempos de lectura del hidrómetro en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelos pertenecientes a la provincia La Habana. Se sustenta en 101 mediciones de la propiedad, a partir del muestreo en 51 puntos a dos profundidades, 10-15 y 35-40 cm. La distribución de los puntos responde a un proyecto mucho más amplio dirigido a evaluar disímiles propiedades físicas, químicas e hidráulicas en esta provincia, mediante el diseño de un muestreo estratificado no alineado. Se compararon tres metodologías, que difieren marcadamente en cuanto a los tiempos de lectura, con la reportada por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA). Se pudo comprobar que la limitación del tiempo de medición a una o dos horas, como se hace usualmente en varios laboratorios de estudios agronómicos de Cuba, puede cambiar completamente la clasificación textural de los suelos, con una gran sobrestimación del contenido de arcilla. Los valores de arena calculados fueron sensibles a la metodología solo para los contenidos altos de esta fracción.

*Palabras clave:* métodos, instrumentos de medición, tamaño de la partícula, suelo, Habana

## INTRODUCCIÓN

El análisis del tamaño de partículas (ATP) es uno de los más comunes e importantes en el campo de la física de suelos. Es usado en análisis texturales para la clasificación de suelos con propósitos agronómicos e ingenieriles (1). Tiene también una relación directa e indirecta con la distribución poral de suelos y, consecuentemente, con las propiedades de retención de humedad.

Existe una amplia gama de métodos que permiten llevar a cabo este tipo de análisis (2). En Cuba, los más conocidos son el de la pipeta y el del hidrómetro, pero de ellos, este último es el que se emplea con mayor regularidad. Si bien es cierto que el método de la pipeta garantiza una mejor precisión, las complejidades en el montaje de la técnica y el tiempo de medición han limitado su uso.

El método del hidrómetro, en cambio, es muy fácil de implementar y permite obtener mediciones rápidas y suficientemente seguras para muchos de los propósitos de los usuarios.

Muchos de los centros relacionados con estudios agronómicos en Cuba, al menos los situados al occidente del país, emplean predominantemente el método del hidrómetro. En ese grupo se incluyen el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, la Universidad Agraria de La Habana, el Instituto de Suelos y el Instituto de Ciencia Animal, entre otros.

Dentro del método propiamente se reconocen múltiples versiones (metodologías) de implementación, las cuales presuponen diferentes tiempos de lectura del dispositivo. De acuerdo con varios estudios, ello reviste particular importancia, pues la precisión de los estimados del método depende fuertemente de la elección de tiempos apropiados de observación de la densidad de la solución (3). Se plantea que las mayores fuentes de error del método están asociadas a las lecturas del hidrómetro (4).

Ms.C. J. García y Dr.C. H. Medina, Profesores Asistentes; D. Núñez, Profesor Instructor de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Apdo. 18, San José de las Lajas, La Habana, CP 32 700, Cuba.

✉ jgarcia@isch.edu.cu

Sin embargo, la mayor parte de ellos se concentran en el análisis de suelos de países templados, con una composición muy diversa a la de los suelos del trópico.

El objetivo de este estudio es determinar la influencia de los tiempos de lectura del dispositivo en la composición textural de suelos de La Habana, a partir de la evaluación de varias metodologías de cálculo con diferentes tiempos de observación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el estudio se llevaron a cabo 101 mediciones de la distribución del tamaño de partículas a partir del muestreo de 51 puntos a dos profundidades, 10-15 y 35-40 cm. La distribución de los puntos responde a un proyecto mucho más amplio, dirigido a evaluar disímiles propiedades físicas, químicas e hidráulicas en la provincia La Habana, mediante el diseño de un muestreo estratificado no alineado (5).

En las mediciones se empleó un hidrómetro del tipo ASTM 152H. El pretratamiento aplicado a todas las muestras fue el mismo. Estas son inicialmente secadas al aire y pasadas por un tamiz de 2 mm. Se seleccionan 50 g de suelo, a los cuales se les añade 100 mL de una solución dispersante, preparada a razón de 40 g de pirofosfato de sodio decahidratado ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) y 10 g de hidróxido de sodio (NaOH), disueltos en 1L de agua destilada.

La solución, compuesta por suelo y dispersante, se deja reposar por una noche y es posteriormente agitada con auxilio de un agitador eléctrico durante 30 minutos. Se vierte después en un cilindro de sedimentación, al cual se le adiciona agua destilada hasta completar un litro.

Como parte de las mediciones se determinó la densidad real de suelos empleando el método del picnómetro (6). *Principio del método del hidrómetro.* Ese método se sustenta básicamente en la ley de Stokes, que para el hidrómetro puede ser escrita como una dependencia lineal entre el diámetro de la partícula,  $X$ , y el inverso de la raíz cuadrada del tiempo,  $t$ , del tipo:

$$X = \theta t^{-1/2} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $\theta$  es un parámetro de sedimentación

La expresión para el cálculo de  $\theta$  es:

$$\theta = [18\eta h' / g (\rho_s - \rho_l)]^{1/2} \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del líquido,  $\rho_s$  y  $\rho_l$  son las densidades de suelo y del líquido respectivamente ( $\eta_{\text{agua}}$  y  $\rho_{\text{agua}}$  tomados de 7), y  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h'$  es la profundidad efectiva de asentamiento del hidrómetro particular que se emplea (cm).

A cada tiempo de medición, por tanto, se le asocia un diámetro medio de partículas y una concentración de estas, relacionada con la lectura del dispositivo. A partir de esta concentración se calcula el porcentaje de partículas en cada rango de interés. Con el ánimo de simplificar el proceso se emplean diversas metodologías, que

difieren principalmente en los tiempos de lectura del dispositivo. En el trabajo se evalúan las implicaciones del uso de ellas en cuanto a esa variable.

### Metodologías evaluadas

1. Según la metodología seguida por la SSSA (2), se realizan lecturas paralelas, en la solución de suelo y en la de agua y dispersante sin suelo, a los 0.5, 1, 10, 30, 60, 90, 120 y 1440 minutos, además de registrar de forma periódica la temperatura. El porcentaje medio de partículas de suelo asociado a cada tiempo de observación se calcula como:

$$P = \frac{R - R_L}{m_s} 100\%$$

donde  $R$  y  $R_L$  son la lectura del hidrómetro en la solución de suelo y la solución blanco, respectivamente.

El porcentaje de arcilla,  $P_{2\mu\text{m}}$ , se obtiene a partir de la interpolación lineal de la relación entre el porcentaje de partículas y el logaritmo del diámetro medio de partículas para 1.5 y 24 horas. Matemáticamente ello se expresa como:

$$P_{2\mu\text{m}} = m \ln(2 / X_{24}) + P_{24} \quad \text{Ec. 3}$$

donde el prefijo 24 indica el valor de la magnitud pasado ese tiempo en horas y  $m$  es la pendiente de la curva que une los puntos correspondientes a los tiempos de lectura de 1.5 y 24 horas. El porcentaje de arena,  $P_{50\mu\text{m}}$ , se calcula usando el mismo procedimiento de la arcilla, pero empleando las lecturas del hidrómetro entre los 30 y 60 segundos. El porcentaje de limo se obtuvo en todos los casos como:  $\% \text{ limo} = 100 - (\% \text{ arena} + \% \text{ arcilla})$ .

2. La propia metodología de la SSSA, pero limitando el tiempo de lectura del hidrómetro hasta la hora de experimentación (en lo adelante se identifica como SSSAL). Por ello sus estimados de arena coinciden con los de la SSSA, no así en cuanto a arcilla y limo.

3. La metodología estándar de Bouyoucos (8), identificada en el trabajo como BE. En este caso, el porcentaje de partículas se calcula como:

$$P = \frac{R_c}{m_s} \cdot 100 \quad \text{Ec. 4}$$

donde  $R_c$  es un valor corregido de la lectura del hidrómetro que se obtiene a partir de la ecuación:

$$R_c = R + 0.36 (T_c - T_e) \quad \text{Ec. 5}$$

donde  $T_c$  y  $T_e$  son la temperatura de calibración y experimentación, respectivamente.

El contenido de arcilla se obtiene a partir de la lectura a las dos horas, mientras que para el contenido de arena se emplea la de los 40 segundos.

4. La metodología de Bouyoucos simplificada, identificada en lo adelante como BS, igual a la anterior, salvo en el hecho de que los tiempos de medición están limitados a 40s y 1h; a partir de este último se calcula la arcilla.

Por tanto, sus estimados de arena coinciden con los de BE, no así en cuanto a arcilla y limo. Esta metodología es la que se sigue usualmente en varios laboratorios relacionados con estudios agronómicos de La Habana (8).

Las metodologías 3 y 4 realmente tienen implícita otra fuente de error no tenida en cuenta en la 1, como por ejemplo, la densidad real de los suelos; por ello incluimos la metodología 2. Las diferencias entre los errores obtenidos en las metodologías 3 y 4 en relación con la 2, ofrece una medida de que parte de los errores de aquellas no dependen directamente del tiempo de lectura.

En el trabajo se emplearon los límites de tamaño de partículas definidos en el esquema de la *USDA* (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (9), atendiendo a que con posterioridad los datos serán utilizados para desarrollar funciones de pedotransferencia, las cuales a nivel internacional están referidas a dicho esquema.

**Análisis realizados.** Para una mejor comprensión del artículo se enumera el orden que, a grandes rasgos, se sigue para el análisis de los resultados:

- Comparar los valores de arcilla, arena y limo calculados usando SSSAL, BS y BE en relación con los obtenidos a partir de SSSA, metodología que se asume como patrón.
- Comparar las clasificaciones texturales derivadas de los resultados de las evaluaciones de las cuatro metodologías anteriormente mencionadas.

Las diferentes comparaciones se realizaron en base a la diferencia media (*DM*) y la raíz de la diferencia cuadrática media (*RDMC*).

$$DM_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{ik} - Y_{i1}) \quad \text{Ec. 6}$$

$$RDMC_k = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{ik} - Y_{i1})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 7}$$

donde  $Y_{ik}$  representa los valores de la fracción de suelo correspondiente al  $i$ -ésimo punto y la  $k$ -ésima metodología ( $k = 2, 3$  y  $4$ ).  $N$  es el número de puntos muestreados.

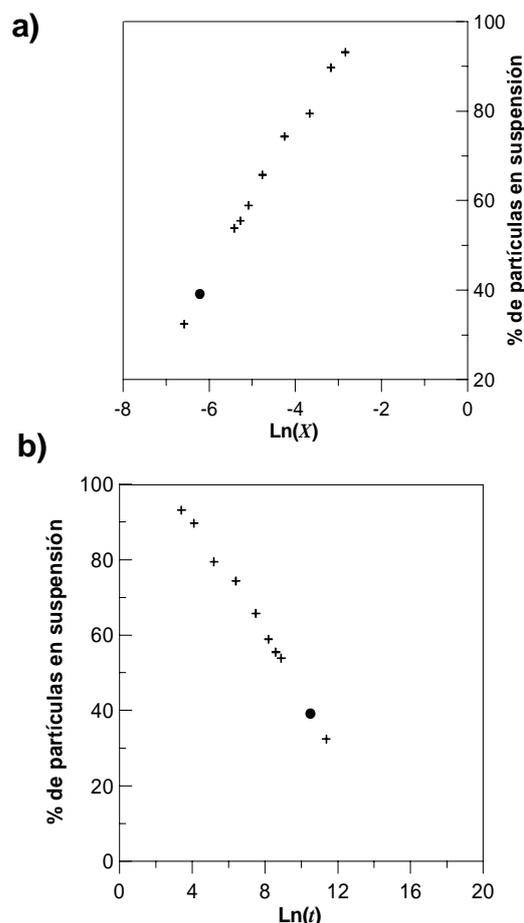
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla I muestra el comportamiento estadístico de los valores de densidad real de suelos en los 101 puntos muestreados. El valor medio obtenido, 2.63, es bastante próximo al valor de densidad real de 2.65, que se usa como valor estándar; no obstante, la desviación estándar 0.07 de los valores evidencia que puede haber fluctuaciones apreciables de la media.

**Tabla I. Comportamiento de la densidad específica de suelos en los 101 puntos medidos**

Media	Desviación estándar ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Máxima	Mínima
2.63	0.07	2.80	2.46

En la Figura 1a se muestra la relación entre el porcentaje de suelo y el logaritmo del diámetro medio de partícula para uno de los puntos ensayados, siguiendo la metodología de la SSSA. La Figura 1b, por su parte, muestra la relación entre el porcentaje de partículas para el mismo punto, pero en función del tiempo de medición. En ambas gráficas se simboliza mediante un punto el valor correspondiente al porcentaje de partículas  $P$  para un diámetro  $X=0.002$  mm, valor que separa la fracción limo de la fracción arcilla. De la Figura 1b se infiere que el tiempo aproximado para que precipiten las partículas de un diámetro superior es del orden de las 10 h de ensayo. A partir de ese período de tiempo todas las partículas que aun permanecen en suspensión ( $<0.002$  mm) se corresponden con la fracción arcilla. Ello está en concordancia con los planteamientos que afirman que el tiempo de la separación entre el limo y la arcilla usualmente ocurre entre 8 y 12 horas de sedimentación no alterada (3), aunque el tiempo exacto no puede ser identificado de antemano. Lo anterior evidencia discrepancias con aquellas variantes del método del hidrómetro, que acotan los tiempos de lectura a una y dos horas de ensayo.



**Figura 1. Curva de la suma total de porcentaje de suelo en suspensión en función de: a) logaritmo del diámetro de partículas,  $X$ , en mm y b) logaritmo del tiempo de medición,  $t$  en segundos**

En la Figura 2 se muestra la comparación entre los porcentajes de arena, arcilla y limo calculados de acuerdo a cada una de las metodologías. En el caso de la arena (Figura 2a), se aprecia una correspondencia aceptable entre los valores calculados según la SSSA y las metodologías 3 y 4. No obstante, se aprecia que a partir del 20 % de arena, aproximadamente, hay una tendencia a la sobreestimación de los contenidos de esta fracción. Esa tendencia puede ser importante en suelos arenosos.

Para las fracciones medias y pequeñas de suelo sí se observan diferencias muy marcadas entre metodologías. En el caso de la arcilla hay una evidente sobrestimación de BS, BE y SSSAL en relación con la SSSA (Figura 2b, 2c y 2d respectivamente). A diferencia de la arena, es para los valores bajos de arcilla que se obtienen los mayores errores. Para los contenidos de arcilla próximos al 20 %, los valores estimados mediante BS pueden ser superiores incluso al 200 % del valor según la SSSA. Otros afirman que las dos horas de lecturas sobreestiman la fracción arcilla con errores que generalmente exceden el 10 % para suelos arcillosos (10). Además, plantean que las correlaciones entre el limo y la arcilla a los 40 s y 2 h de lectura son totalmente empíricas.

Para el limo, la desviación de los puntos estimados en relación con los puntos patrón es aún más acentuada. Ello responde lógicamente a las tendencias observadas para la arena y la arcilla. En la práctica, poco tienen que ver los valores de limo según SSSA1, BE y BS, en compara-

ción con los de SSSA, en el rango alto de esa fracción como consecuencia de la marcada subestimación de los valores.

En las Tablas II y III se muestra la estadística de los errores que resultan de realizar las diferentes comparaciones planteadas anteriormente. En la Tabla II hay un error por sobreestimación de alrededor del 14 %, cuando se calcularon los porcentajes de arcilla empleando la metodología de la SSSAL. En el caso de BE y BS, el error medio obtenido es ligeramente superior, 15 y 19 % respectivamente. El resultado para la arcilla es independiente al hecho de haber utilizado los límites de tamaño de partículas definidos en el esquema de la *USDA*, ya que la mayoría de estos, entre los que se incluye el de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (*ISSS*), emplean el mismo límite para esta fracción.

Según la Tabla III, el contenido medio de arcilla hallado con el método de BS excede en un 6 % al calculado por la SSSAL. Este error puede estar asociado, entre otros, al hecho de que tanto esta metodología como la de BE, no tienen en cuenta el valor real de densidad específica de suelo.

Se observa a partir de las Tablas II y III, que los errores por subestimación en el caso del limo son en buena medida muy similares a los porcentajes en los cuales se sobreestiman los contenidos de arcilla de las muestras analizadas. Ello es consecuencia del procedimiento que se emplea para el cálculo de esta fracción (como una variable dependiente de las otras dos), así como del comportamiento de los errores para la arena y la arcilla.

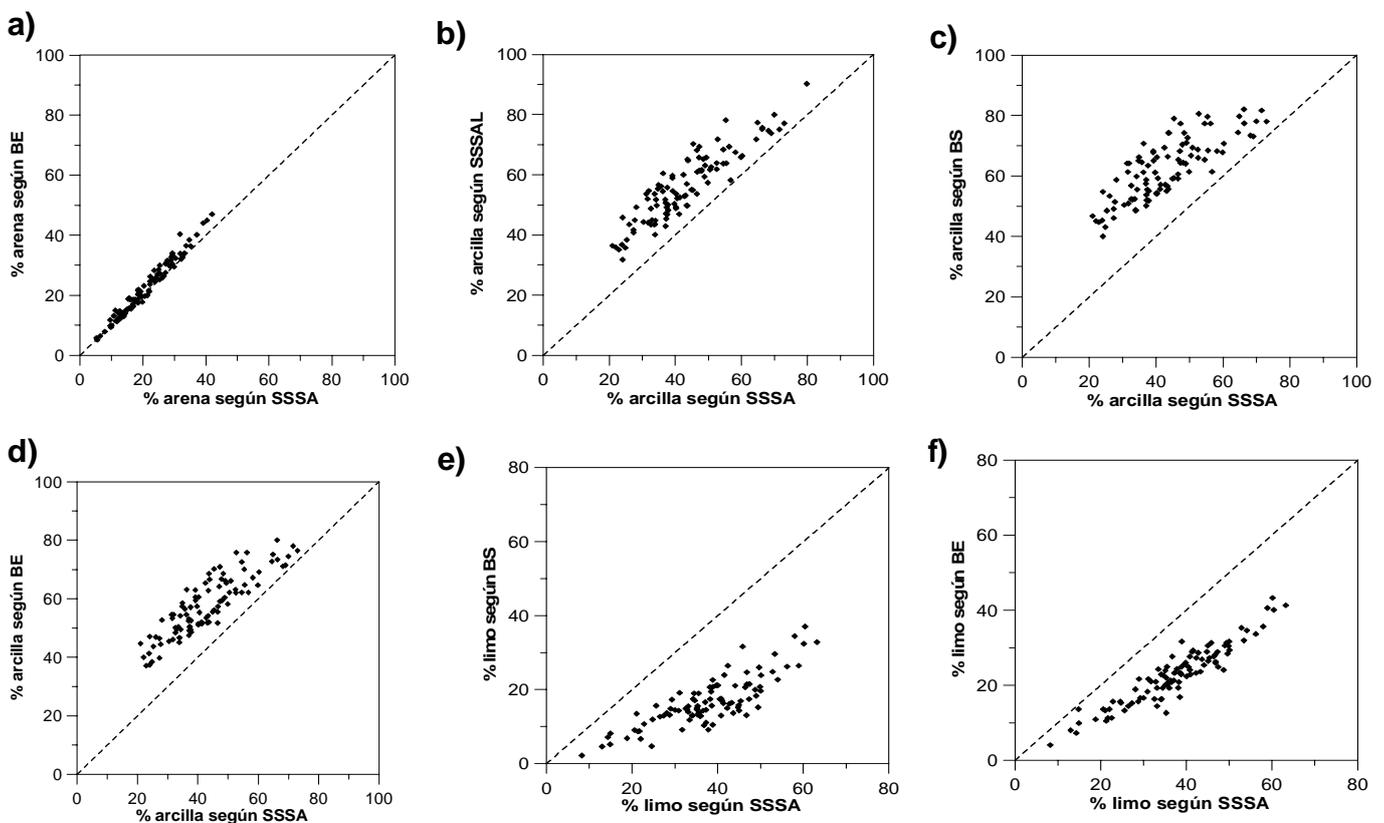


Figura 2. Comparación de los porcentajes calculados según SSSA con: a) arena BE; b) arcilla SSL; c) arcilla BS; d) arcilla BE; e) limo BS y f) limo BE

**Tabla II. Estadística de las diferencias entre los valores estimados según SSSAL, BE y BS en relación con los estimados usando SSSA**

Fracción	Metodología	MD (%)	RMSE	Máxima	Mínima
Arena	BE	1.4	2.3	8.6	-2.0
Arcilla	SSSAL	13.6	14.7	29.5	1.4
	BE	15.0	16.3	28.4	2.5
	BS	19.3	21.0	34.4	4.1
Limo	BE	-14.4	15.3	-1.2	-24.7
	BS	-18.5	19.9	-3.4	-32.0

**Tabla III. Estadística de las diferencias entre los valores estimados según BS en relación con los estimados usando SSSAL**

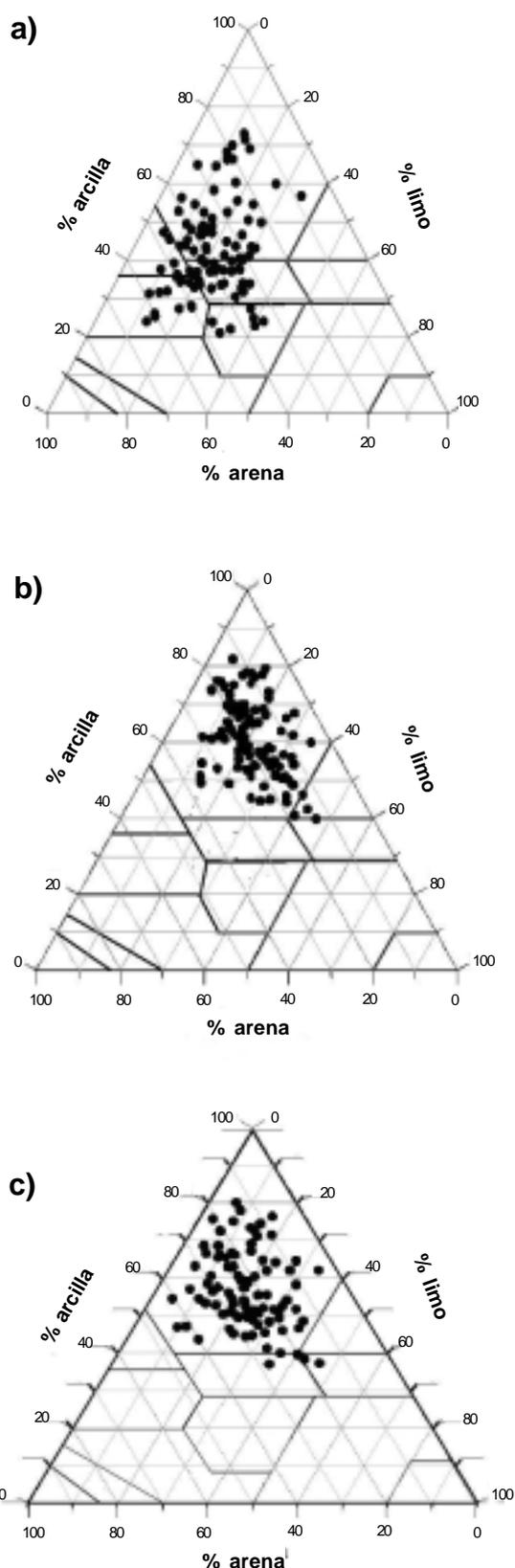
Fracción	MD (%)	RMSE	Máxima	Mínima
Arcilla	6.0	7.2	15.3	0.7
Limo	-5.9	6.7	-0.7	-12.6

Otra de las implicaciones importantes asociadas a las variaciones del tiempo en el registro de las lecturas del hidrómetro, es en cuanto a la clasificación textural de los suelos. Las principales fracciones de suelo determinadas con el empleo de las metodologías SSSA, BE y BS, son representadas en los triángulos texturales de la Figura 3. Se puede apreciar que las clasificaciones en base a BE y BS tienen asociadas una pobre variedad de clases texturales (Figura 3b y 3c). Según estas dos metodologías, casi la totalidad de los suelos analizados están comprendidos dentro del rango de arcillosos (Tabla IV).

**Tabla IV. Clasificación por clases texturales de las muestras de suelo según SSSA, BS y BE**

Metodología	Clasificación textural	Número de puntos
SSSA	Arcilloso	48
	Franco Arcilloso	23
	Franco Arcilloso Arenoso	17
	Franco	8
	Arcillo Arenoso	5
BS	Arcillo limoso	4
	Arcilloso	97
BE	Franco arcillo limoso	2
	Franco Arcilloso	2
	Arcilloso	97

De acuerdo con la SSSA, en cambio, las 101 muestras analizadas se agrupan en cinco clases texturales distintas. Menos del 50 % de los horizontes considerados clasifican como arcillosos y de ellos casi el 25 % clasifica como franco arcillosos.


**Figura 3. Triángulo textural de las muestras de suelos analizadas de acuerdo con las metodologías: a) SSSA; b) BS y c) BE**

Partiendo de la experiencia acumulada en estos suelos, para los que se manejan invariablemente niveles de arcilla superiores al 60 %, es muy probable que la no eliminación de los óxidos de hierro, constituyente fundamental de enlace en suelos de la región, afecta de manera sensible la distribución encontrada.

Para los autores de este trabajo, lo que está ocurriendo con muchas de las determinaciones de textura en Cuba, es que se satisface ese criterio empírico de un modo totalmente erróneo, limitando el tiempo de lectura y, consecuentemente, asociando a la fracción arcilla parte de la fracción limo. La superposición de los dos errores, el de considerar menos arcilla de la que realmente existe, por concepto de no separar adecuadamente las partículas de suelo, y el de considerar mayor cantidad de esa fracción, clasificando como arcilla lo que debe ser limo, da un estimado que parece cierto, pero que físicamente no lo es. Urge por ello en el futuro llevar a cabo un análisis más profundo del tema.

## AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS), por financiar el proyecto del cual es fruto el presente trabajo, así como a los miembros del Laboratorio de Suelo de la Facultad de Agronomía de la UNAH, por la colaboración prestada.

## REFERENCIAS

1. Gee, G. W. y Keller, J. M. Comparison of American Society of Testing Materials and Soil Science Society of America Hydrometer methods for particle-size analysis. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 2006, vol. 70, p. 1094-1100.
2. Gee, G. W. y Or, D. Particle-size analysis. p. 255-293. En: J. H. Dane and G. C. Topp (ed). *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI, 2002.*
3. Bohn, C. C. y Gebhardt, K. Comparison of hydrometer settling times in soil particle size analysis (Technical notes). *Journal of Range Management*, 1989, vol. 42, no. 1.
4. Gee, G. W. y Bauder, J. W. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and sensitivity test of measurement parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, vol. 43, p. 1004-1007.
5. Webster, R. y Oliver, M. A. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey.* Oxford : Oxford University Press, 1990.
6. Flint L. y Flint, A. L. Particle density. p. 2229-240. En: J. H. Dane and G. C. Topp (ed) *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5 SSSA. Madison, WI. 2002.*
7. CRC Press. *Handbook of chemistry and Physics of chemistry.* 85 th ed. Boca Raton FL. CRC Press, 2004.
8. Bouyoucos, G. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.*, 1962, vol. 54, p. 464-465.
9. Soil Survey Staff. *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys.* USDA-SCS Agric. Handb.436. US. Government printing Office, Washington, 1975.
10. Gee, G. W. y Bauder, J. W. Particle-size analysis. En: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, W. I., 1986.* p. 383-423.

Recibido: 21 de mayo de 2007

Aprobado: 11 de julio de 2008