

# Compactación de suelos cultivados con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca. Parte I

Present in soil compaction of Valle del Cauca under sugarcane (south). Part I

Edgar Madero Morales<sup>1\*</sup>, Jorge Armando Ramírez Alzate<sup>2†</sup>, Álvaro Albán<sup>2‡</sup>, Betsy Yadira Escobar<sup>3\*\*</sup>, Luis Fernando García<sup>3††</sup>, y María Elvira Peña Artunduaga<sup>3‡‡</sup>

<sup>1</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

<sup>2</sup> Magister Ciencias Agrarias, énfasis Suelos. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. <sup>3</sup>Ingenieros Agrícolas Universidad del Valle, Cali, Colombia.

\*Autor para correspondencia: eemaderom@unal.edu.co; †jara85@gmail.com; ‡alvaroalban75@gmail.com; \*\*betsyyadira@gmail.com; ††luisfega2@hotmail.com; ‡‡maripena@univalle.edu.co

Rec.: 08.04.11 Acept.: 26.11.11

## Resumen

En el estudio se midió la compactación de suelos agrupados en las clases agrológicas I y II cultivados con caña de azúcar entre los municipios de Palmira, El Cerrito y Candelaria en el Valle del Cauca, Colombia. Inicialmente se hizo la cartografía de un índice de compactación (IC) con base en la densidad aparente entre 0 cm y 15 cm de profundidad en el suelo, en 144 puntos de muestreo. La cartografía de estas clases se obtuvo del estudio detallado de suelos de este sector con la ayuda del software ArcGIS®. Posteriormente, se evaluó la influencia de los índices de compactación predominantes sobre algunas propiedades hidrodinámicas y el régimen de humedad del suelo (R.H.S). Para ello se ubicaron dos puntos de medición en cada uno de los tres suelos durante 75 días. Finalmente, con el uso del modelo de simulación Somore se confirmó la efectividad de predicción del R.H.S por parte. El estudio mostró que los suelos no presentan altos grados de compactación, pero sí altos contenidos de materia orgánica (4% - 6%). Se encontró que las características hidrológicas, retención de humedad y de laborabilidad son adecuadas; el R.H.S fue afectado negativamente por el régimen de lluvias, pero no presentó diferencias entre tratamientos. El modelo Somore resultó aceptable y práctico para estimar el R.H.S.

**Palabras clave:** Consistencia, índice de compactación, régimen de humedad, SOMORE.

## Abstract

In 2008, we wanted to know the degree of compaction of the best land (Classes I and II agrologic) cultivated with sugarcane between the municipalities of Palmira, El Cerrito and Candelaria in Valle del Cauca, Colombia. First, performed an index mapping compaction (IC) based on the bulk density from 0 to 15 cm deep in 144 sampling points. The mapping of these classes was obtained from the detailed study of soils in this area with the help of ArcGIS® software. Second, we assessed the influence of compaction rates prevailing on some hydrodynamic properties and soil moisture regime (R.H.S), were located to two measurement points in each of the three soils for 75 days. Third, we found the effectiveness of R.H.S prediction by the simulation model SOMORE. The study showed that the soils have high levels of compaction, and also exhibited high organic matter content (4% to 6%). As the IC showed that there is compaction it was found that the hydrological characteristics, and moisture retention are adequate workability, the R.H.S is negatively affected by rainfall, but did not differ between treatments. The model was acceptable and practical SOMORE to estimate the R.H.S.

**Key words:** Soil compaction index, soil consistency, soil moisture regime, SOMORE.

## Introducción

El departamento del Valle del Cauca está ubicado al suroccidente de Colombia y forma parte de las regiones Andina y Pacífica. Debido a la alta fertilidad natural de los suelos y el relieve plano y el clima cálido, en la zona se desarrolla aproximadamente el 60% de la agroindustria azucarera (Carbonell *et al.*, 2001), considerada el principal renglón agrícola de la economía regional.

El uso intensivo de estos suelos y las constantes prácticas de laboreo en condiciones de altos contenidos de humedad ocasionan problemas de degradación física en la estabilidad estructural, la organización del espacio poroso y la densidad en la capa arable, características que pueden dificultar a las plantas la utilización de agua y nutrientes del suelo, y originar cambios en el régimen de humedad, la fertilidad y la eficiencia del riego (Greenland y Lal, 1977; Greenland y Szabolcs, 1994).

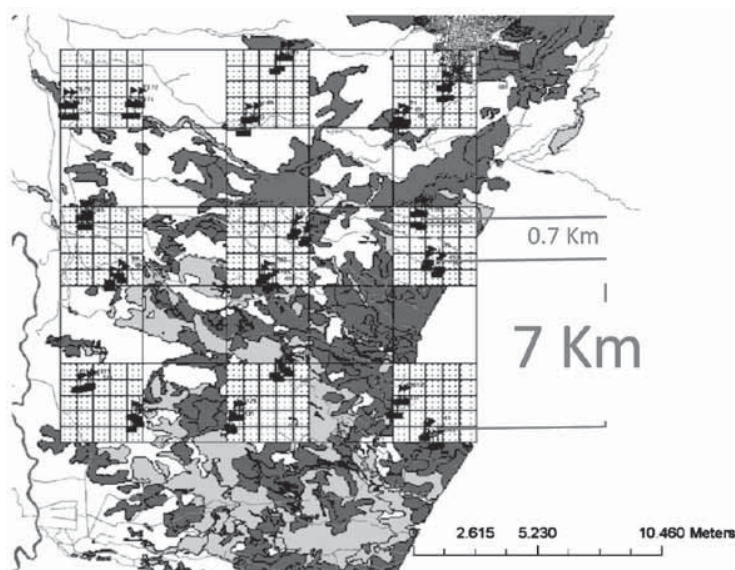
Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró importante evaluar el grado de compactación de algunos suelos cultivados con caña de azúcar en los municipios de Palmira, El Cerrito y Candelaria en el Valle del Cauca, Colombia, y estimar su influencia sobre algunas propiedades hidrodinámicas y el régimen de humedad del suelo (R.H.S.) (Lozano *et al.*, 2005). Igualmente se validó el modelo de simulación Somore (Pla, 1997), una aplicación de libre utilización que permite predecir el régimen de humedad del suelo

en función del balance hídrico histórico diario y las propiedades físicas del suelo, como tasa promedio de infiltración, conductividad hidráulica saturada por debajo de la zona de raíces, curva característica de humedad, límite líquido y límite plástico.

## Materiales y métodos

### Cartografía de compactación, infiltración rápida y conductividad hidráulica

La cartografía de un índice de compactación (IC) en áreas homogéneas en materia orgánica (M.O.) y distribución de partículas por tamaño (DPT) se hizo con base en la densidad aparente en campo (Lozano *et al.*, 2005). Los suelos del estudio –clases agrológicas I y II– han sido cultivados con caña de azúcar durante varios años y son considerados de alta capacidad de uso según el Soil Conservation Service de EE.UU. (Klingebiel y Montgomery, 1961). Las áreas correspondientes a estas clases se obtuvieron del estudio detallado de suelos de la parte plana de los municipios de Palmira, El Cerrito y Candelaria (IGAC, 1969) mediante la aplicación ArcGIS. En total se realizaron 144 muestreos en aproximadamente 50,000 ha, distribuidos en una malla de puntos siguiendo un patrón de distribución de logaritmo natural (Riezebos, 1989), con el fin de tener en cuenta las variabilidades largo (7000 m), medio (700 m), corto (70 m) y muy corto rango (7 m) (Figura 1). En



**Figura 1.** Distribución del muestreo en patrón de logaritmo natural. Malla ubicada entre Palmira y Candelaria.

**Fuente:** Tomado de Estudio Detallado de Suelos (IGAC, 1969 - 1971a, b).

cada punto se midieron la densidad aparente (D.A.) por el método de la cajuela (USDA, 1999), la humedad del suelo e infiltración rápida (T<sub>ir</sub>) (USDA, 1999), la conductividad hidráulica saturada (K<sub>h</sub>) a más de 15 cm de profundidad (USDA, 1999), la distribución de partículas por tamaño (Jaramillo, 2002) y carbono orgánico (Walkey Black modificado), separando, en lo posible, en laboratorio las fracciones orgánicas sin descomponer en cada muestra.

Para desarrollar el IC se descartó aproximadamente el 10% de las muestras debido a la presencia de fragmentos gruesos (> 2 mm) en más del 25% del volumen, lo que afecta significativamente la D.A.

### **Propiedades físicas y R.H.S. en función de los IC modales**

Por cada IC –I.C4 o consistencia friable, I.C3 o consistencia muy friable, I.C2 o consistencia blanda– se seleccionaron dos localidades. Los puntos de muestreo fueron localizados en tres haciendas cultivadas con caña situadas en los municipio de Palmira: La Josefina, ubicada en el km 3 vía Candelaria; La Gertrudiz, ubicada 10 km al norte del municipio; y El Porvenir, ubicada en la vereda La Reforma, corregimiento de Amaime. Todas ellas sobre terrazas medias del valle aluvial del río Cauca, a una altura de 1000 m.s.n.m., precipitación media anual entre 1.000 mm y 1.200 mm, temperatura promedio de 24 °C, humedad relativa de 75% y zona de vida de bosque seco tropical. Los suelos se clasifican como Haplustoll Páchico franco fino isohipertérmico mezclado (Hacienda La Josefina); Haplustoll Fluventico franco grueso isohipertérmico mezclado (Hacienda La Gertrudiz), y Haplustoll Cumúlico franco fino isohipertérmico mezclado (Hacienda El Porvenir) (IGAC, 1969).

Para medir el R.H.S se hicieron muestreos diarios entre 9 a.m. y 11 a.m. con el fin de evitar que la radiación solar favoreciera altas tasas de evaporación. Para el efecto durante 75 días continuos con un sacabocado se tomaron muestras de suelo entre 0 cm y 15 cm de profundidad, las cuales fueron pesadas en campo y colocadas en horno a 105 °C durante 24 h. La infiltración se determinó

por el método de anillos infiltrómetros y una vez terminada la prueba se cubrió con plástico negro por 48 h. Al finalizar este tiempo se tomaron muestras a 15 cm de profundidad (200 - 300 g) para determinar la humedad a capacidad de campo (Jaramillo, 2002).

La conductividad hidráulica saturada se midió por el método de ‘abatimiento de carga’ (Bagarello *et al.*, 2004). Las curvas de retención de humedad se determinaron por el método de ollas y platos de presión a 0.1 bar, 0.3 bar, 1 bar, 5 bares y 15 bares (Jaramillo, 2002). Los límites líquido y plástico fueron obtenidos mediante los métodos estandarizados de cazuela de Casagrande y de rollo de suelo, respectivamente (Jaramillo, 2002). La humedad en el suelo fue graficada en eje cartesiano vs tiempo, teniendo presentes los valores críticos de la curva de retención de humedad de cada suelo.

### **Validación de software Somore**

La curva de humedad diaria en el suelo estimada mediante el uso del software Somore fue comparada gráfica y estadísticamente con la curva real de humedad para los mismos días. Para la comparación se utilizó la definición de las variables número de días con lámina fácilmente aprovechable (LAFA) y número de días por debajo del límite plástico.

El diseño experimental fue completamente al azar con dos repeticiones, y se tomaron como tratamientos los tres tipos de compactación que presentaban los suelos. Las variables LAFA y número de días por debajo del límite plástico fueron comparadas mediante análisis de varianza y la prueba de separación de medias de Duncan ( $P < 0.05$ ) entre la lámina real y la simulada por Somore, lo cual permitió determinar las diferencias o aproximaciones entre los modelos.

Adicionalmente se realizó un Andeva con otras características físicas, como tasa media de infiltración (TI), infiltrabilidad (I<sub>b</sub>), lámina acumulada (L<sub>a</sub>), porcentaje de arena (A), coeficiente de dispersión (CD), relación lámina de agua fácilmente aprovechable (LAFA) sobre lámina de agua aprovechable (LAA), número de días en LAFA y lámina acumulada entre capacidad de campo y humedad a 1.5 bar (PMT).

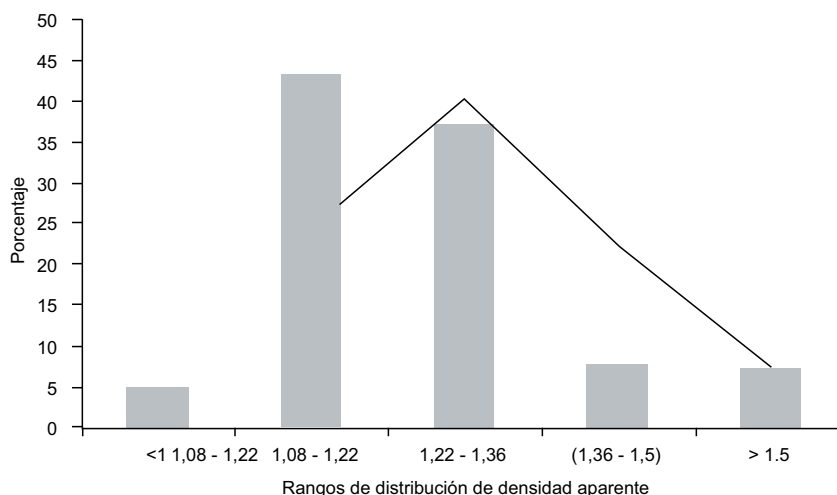
## Resultados y discusión

### Cartografía de la compactación, la infiltración rápida y la conductividad hidráulica

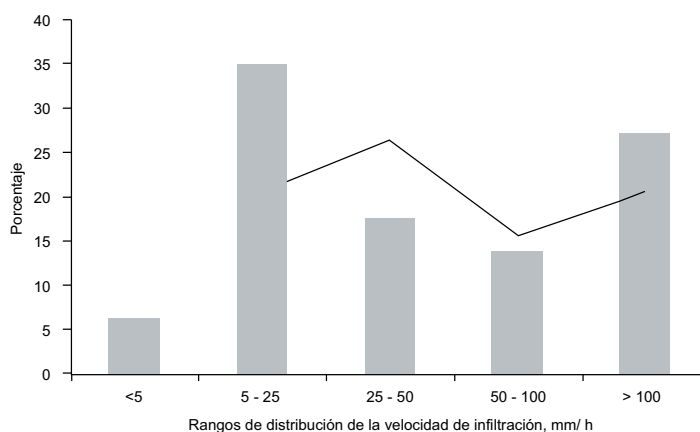
Los valores más frecuentes de D.A. (89%) fueron  $< 1.35 \text{ g/cm}^3$ , es decir, estos suelos con alta capacidad de uso tienen densidades relativamente bajas. Aproximadamente 11% de los suelos presentaron densidades  $> 1.45 \text{ g/cm}^3$  debido al incremento del contenido de arena y/o fragmentos gruesos; por tanto, no fueron afectados por compactación y fueron descartados para el análisis. Lo anterior se relaciona tanto con manejo agrícola conservacionista como con resiliencia innata de los suelos (IGAC, 1969; Greenland y Lal, 1977; Greenland y Szabolcs, 1994) (Figura 2).

De acuerdo con los valores de densidad y los niveles aceptables de conductividad hidráulica hasta 15 cm de profundidad, predominaron las buenas condiciones para la infiltración superficial de agua en el suelo y por tanto para la aplicación de riego (Pla, 1997) en un rango entre 2 y 5 mm/h. Estas propiedades no fueron mapeadas debido a la baja dependencia espacial que presentaron (Figuras 3 y 4).

La mayor parte de las muestras (97%) presentó un IC con valores considerados entre los cuatro primeros niveles en una escala hasta 9, que coincidieron con consistencias friables y blandas e indicaron poca compactación entre 0 cm y 15 cm de profundidad



**Figura 2.** Distribución porcentual de la densidad aparente en campo ( $\text{g/cm}^3$ ).



**Figura 3.** Frecuencias de la tasa de infiltración (mm/h).

y buenas condiciones estructurales y de labranza. Los IC más altos se detectaron en la franja oriental del mapa como respuesta a incrementos superficiales de la fracción arena debido a los aportes aluviales por su ubicación más alta en el paisaje (Figura 5).

El promedio de M.O. fue de  $4.85 \pm 25\%$ . El rango más frecuente fue de 2.5% - 5%, con 70% de los valores ubicados en este rango, lo que muestra un incremento significativo en relación con los años sesenta y setenta del siglo XX, cuando era aproximadamente de 1.5% para los suelos de la parte plana (IGAC, 1969). Según Greenland y Szabolcs (1994), el nivel crítico en sistemas sostenibles debe ser aproximadamente de 5% para garantizar en el tiempo la buena calidad de suelos dedicados a la agricultura. Estos resultados sugieren que en estos suelos se está realizando un manejo sostenible en términos físicos y que el reciclado de los residuos del cultivo de la caña de azúcar (hojas, compost y vinaza) generan un buen aporte de M.O. en el suelo, en especial en el área de influencia de los ingenios con tierras propias (Figura 6).

#### Propiedades físicas y R.H.S en función de los I.C modales

Los suelos estudiados presentaron en la capa arable altos contenidos de M.O. (aprox. 4%) y contenidos de arcilla entre 30 y 35%, lo que permite catalogarlos como de muy buena laborabilidad (Cuadro 1).

Los IC presentaron valores  $< 5$ , que corresponden a suelos no-compactados, como lo muestran las propiedades físicas y los parámetros hidrológicos y de retención de humedad adecuados y similares (Cuadro 1).

La lámina acumulada en el proceso de humedecimiento del suelo alcanzó valores entre 70 mm y 100 mm, considerados adecuados para una agricultura de secano o de riego. El promedio de la infiltración fue  $> 10$  mm/h, acompañada por infiltraciones básicas  $> 5$  mm/h, valores esperados para suelos con alta capacidad de uso (Jaramillo, 2002).

Los coeficientes de dispersión en los tres grados de compactación fueron  $< 10$ , es decir, muy bajos con respecto al nivel crítico, que corresponde a un valor de 25; por tanto, se puede considerar que los suelos analizados poseen alta estabilidad estructural (Castillo *et al.*, 2000).

La relación LAFA:LAA (lámina de agua fácilmente aprovechable:lámina total de agua aprovechable) fue aproximadamente de 60%, valor muy cercano a lo deseable para una agricultura de alto rendimiento y directamente proporcional a las altas capacidades de campo, que fueron, en promedio, de 50% de la porosidad total.

El límite plástico estuvo cerca a la humedad de 1.5 bar, el cual se asemeja al punto de marchitez temporal; define el suelo como de muy buena laborabilidad y permite las prácticas de cultivo sin peligro de degradación (Jaramillo, 2002).

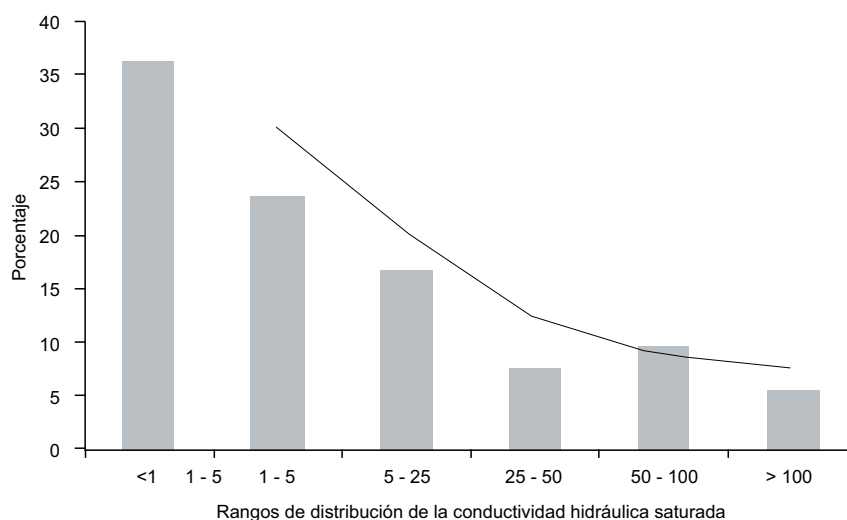
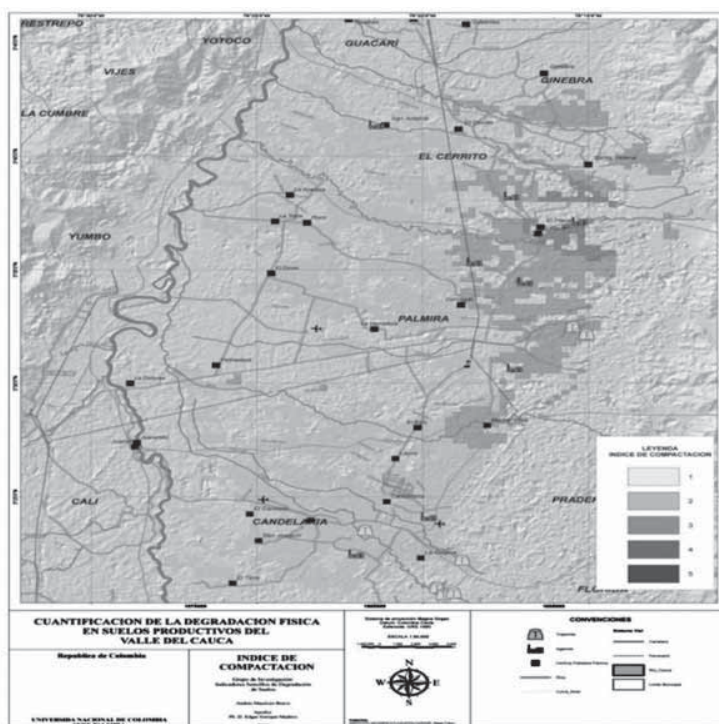
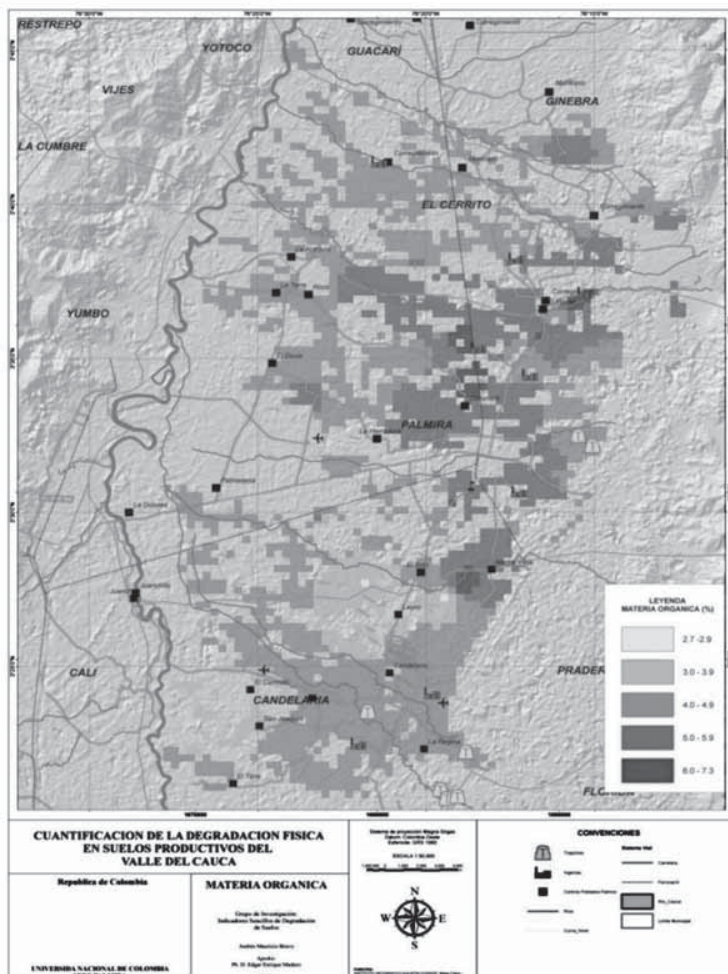


Figura 4. Frecuencias de conductividad hidráulica (mm/h), 0 - 15 cm.



**Figura 5.** Cartografía del índice de compactación - I.C (escala 1 - 5) entre 0 y 15 cm.

**Figura 6.** Cartografía de la materia orgánica-M.O.(%) en el suelo, entre 0 y 15 cm.



**Cuadro 1.** Valores Promedio - Propiedades físicas para los tres grados de compactación.

Punto <sup>a</sup>	Grado de compactación	I.C.	LA	VI	Ib	Ar (%)	A (%)	C.D.	M.O (%)	Lp	C.C.	1.5 bar	15 bar	LAFA/LAA
42	Friable	4/9	91.3	14.2	8.8a*	29.0	34.3	7.3	4.3	36.9	49.1	34.4	20.8	0.6
95														
136	Muy friable	3/9	70.1	11.8	6.8a	35.8	23.6	9.3	4.0	35.9	50.3	30.9	21.2	0.7
137														
92	Blanda	2/9	105.7	12.9	24.0b	29.8	31.0	6.9	3.8	30.0	45.3	31.2	20.5	0.6
94														

LA: Lámina almacenada, VI: Velocidad de infiltración, Ib: Infiltración básica, % Ar: Porcentaje de arcillas, % A: Porcentaje de arena, CD: Coeficiente de dispersión, M.O: Materia orgánica, Lp: Límite plástico, CC: Capacidad de campo, 1.5 bar: Punto de marchitez temporal, 15 bar: Punto de marchitez permanente, LAFA: Lámina de agua fácilmente aprovechable, LAA: Lámina de agua aprovechable.

a. Número del punto de muestreo original de la base de datos, 144 en total.

\* Valores en una misma columna seguidos de letras iguales no difieren estadísticamente ( $P < 0.05$ ), según la prueba de Duncan.

El número de días con agua fácilmente aprovechable varió entre 20 y 40 días para los 75 días incluidos en el análisis, lo que estuvo de acuerdo con el bajo régimen de lluvias presentado; no obstante, los tratamientos no influyeron en esta propiedad ( $P < 0.05$ ) (Cuadro 2).

La lámina de agua fácilmente aprovechable (LAFA = Lam CC - Lam a 1000 cm) fluctuó, aproximadamente, entre 850 mm y 2000 mm ( $P > 0.05$ ) y se correlacionó con el número de días con agua fácilmente aprovechable. En consecuencia, las diferencias no se pueden atribuir a la condición del suelo, sino al balance hídrico (Cuadro 2). Los resultados

corresponden a suelos con muy buena labo- rabilidad, ya que la mayor parte del tiempo, incluidas las épocas de lluvias, presentaron contenidos de humedad reales por debajo de este límite sin diferencias estadísticas entre ellos ( $P > 0.05$ ) (Cuadro 2).

### Validación de Somore

De acuerdo con las variables de respues- ta evaluadas, el modelo Somore fue válido para la predicción del régimen de humedad en el suelo (Cuadro 3). No obstante, presentó tendencia a subestimar estos parámetros, posiblemente por la metodología utilizada para evapotranspiración, ya que no se empleó un radiómetro.

**Cuadro 2.** Comparación de medias del régimen de humedad del suelo para los tres grados de compactación. ( $P > 0.05$ ).

Punto	Grado de Compactación	I.C.	Días (CC - PMT)	Lam. (CC - PMT)	Días $\leq$ Lp
42	Friable	4/9	26.5	1553.7	72.5
95					
136	Muy Friable	3/9	39.5	1954.4	71.5
137					
92	Blanda	2/9	19.5	848.8	51.5
94					

**Cuadro 3.** Comparación de medias para la validación del modelo Somore. ( $P > 0.5$ ).

Método	Días (CC - PMT)	Lam. (CC - PMT)	Días $\leq$ Lp
REAL	28.5	1452.3	65.1
SOMORE	22.8	1307.5	58.2

## Conclusiones

- Los suelos de los municipios de El Cerrito, Palmira y Candelaria incluidos en el estudio no mostraron compactación de acuerdo con los I.C, las propiedades físicas y el R.H.S.
- Los suelos presentaron incrementos en el contenido de MO frente a registros anteriores, con rangos entre 4% y 6%.
- El R.H.S no varió entre los índices de compactación (I.C) que predominaron en el estudio.
- Las propiedades hídricas del suelo no han sido alteradas y sus niveles son óptimos para una agricultura de alto rendimiento, lo cual sugiere un buen manejo a través del tiempo.
- El modelo de simulación Somore predijo razonablemente el R.H.S de la capa arable.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, por la financiación y el apoyo en el proyecto; al laboratorio de física de suelos, por su colaboración para la realización de los análisis; y a los ingenios azucareros Manuelita, Providencia e Incauca, por su generosa y oportuna colaboración para la realización de las pruebas en sus haciendas.

## Referencias

- Bagarello, V.; Iovino, M.; y Elrick, D. 2004. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:66 - 73.
- Castillo, J.; Amézquita, E.; y Müller-Sämann, K. 2000. La turbidimetría una metodología promisoriosa para caracterizar la estabilidad estructural de los suelos. *Suelos Ecuatoriales* 152 - 156p. (No, vol.?)
- Carbonell, J.; Amaya, A.; Ortiz, B.; Torres, J.; Quintero, R.; e Isaacs, C. 2001. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca, tercera aproximación. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). No. Bol.?
- Greenland, D.; Lal, R. 1977. Soil conservation and management in the humid tropics. International Institute of Tropical Agriculture, Agricultural Research Council of Nigeria. Wiley. 283 p.
- Greenland, D.; Szabolcs, I. (eds.). 1994. Soil resilience and sustainable land use. CAB International. Wallingford, Oxon. UK.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1969. Estudio detallado de suelos del sector plano de los municipios de Cali y Jamundí. Mapa de unidades agrológicas escala 1:40.000. Santa Fe de Bogotá.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1971a. Estudio detallado de suelos del sector plano de los municipios de Candelaria. Mapa de unidades agrológicas escala 1:40.000. Santa Fe de Bogotá.
- IGAC. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1971b. Estudio detallado de suelos del sector plano de los municipios de El Cerrito, Guacara y Ginebra. Mapa de unidades agrológicas escala 1:40.000. Santa Fe de Bogotá.
- Jaramillo, D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, Colombia. p. 216 - 248.
- Klingebiel, A. A.; Montgomery, P. H. 1961. Land-capability classification. *Agri. handb.* 210. USDA. Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Lozano, J.; Madero, E.; Herrera, O.; Tafur, H.; y Amézquita, E. 2005. Puesta a prueba de un indicador sencillo de degradación en suelos histeréticos del Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica* 54(2):1 - 13.
- Pla, I. 1997. A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. En: I. Pla (editor). *Soil Erosion Processes on Steep Lands. Special Issue of Soil Technology.* Elsevier. Amsterdam. p. 17 - 30.
- Riezebos, H. Th. 1989. Application of nested analysis of variance in mapping procedures for land evaluation. *Soil use manag.* 5(1):25 - 30.
- USDA (United State Department Agriculture). 1999. Soil quality test kit guide. Trad. Inst. Suelos Arg. Julio 2000. 88p.