

# Propiedades macroestructurales de un Vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos (MEF)

*Macrostructural properties of a Vertisol required to simulation of soil-tillage tool interaction by mean of Finite Element Method. (FEM)*

Alain Ariel de la Rosa Andino<sup>1</sup>; Miguel Herrera Suárez<sup>2</sup> y Omar González Cueto<sup>3</sup>

**RESUMEN.** En el presente trabajo se investigan las propiedades macroestructurales de un Vertisuelo de la costa norte villaclareña, requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el método de elementos finitos. Se recurre al ensayo de compresión triaxial, rápido, sin consolidar, no drenado, para determinar las propiedades objeto de estudio. Los resultados finales permiten conocer los valores y tendencias de la cohesión, ángulo de fricción interna, y módulo de Young para un rango de humedad y densidad del suelo que oscila entre 18 a 50% y 0,9 a 1,2 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Tanto las tendencias como los valores encontrados están altamente condicionados por el contenido de humedad y densidad del suelo, concordando con los resultados obtenidos por otros autores en suelos de naturaleza semejante.

**Palabras clave:** propiedades mecánicas; propiedades dinámicas; suelo; mecánica de suelos; dinámica de suelos; triaxial.

**ABSTRACT.** This paper investigates the macrostructural properties, required for computer simulation of the soil-tillage tool interaction through the finite element method of vertisols from the northern coast of Villa Clara. The triaxial compression test has been used to determine the properties and macro parameters of the soils under study. The final results allow to know the values and trends of cohesion, internal friction angle, and Young's modulus for a range of soil moisture and density between 18-50% and 0.9 to 1,2 g/cm<sup>3</sup>. The results show the values of these three properties decrease when humidity increased, while the opposite occurred occurring when density increasing. The values and trends found match with those obtained by other authors in soils of similar nature.

**Keywords:** mechanical properties; dynamics properties; soil; soil mechanics; soil dynamics; triaxial.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de los métodos numéricos en la solución de problemas relacionados con la mecánica y la dinámica de los suelos agrícolas ha alcanzado un vertiginoso auge en los últimos años. Estos métodos han encontrado gran aplicación en estudios relacionados con los problemas de labranza y compactación de los suelos agrícolas, partiendo de la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza, así como la compactación de los suelos (Dechao y Qi, 1985; Chi y Kushawaha,

1990; Chi y Kushawaha, 1991; Chi y Kushawaha, 1998; Rosa y Wulfsoh, 1999; Mouazen, 2002; González *et al.*, 2008).

El método que más utilización ha tenido para la solución de las problemáticas antes mencionadas es el de Elementos Finitos (MEF), el cual tiene como núcleo central los modelos constitutivos, pues de la correcta selección de estos depende la exactitud en la simulación computacional del comportamiento material del objeto a simular.

En el caso específico de la simulación computacional de la respuesta mecánica de los suelos mediante el MEF, los mo-

**Recibido** 25/09/10, aprobado 12/11/10, trabajo 27/11, investigación.

<sup>1</sup> Ing., Prof. Asistente, Universidad de Granma, Dpto. de Ciencias Técnicas. Granma, E-✉: [arosaa@udg.co.cu](mailto:arosaa@udg.co.cu) y [omar@uclv.edu.cu](mailto:omar@uclv.edu.cu)

<sup>2</sup> Dr. C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas, Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, CP 54830.

<sup>3</sup> MSc., Prof. Auxiliar, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, CP 54830.

delos constitutivos emplean como datos de entrada las propiedades macroestructurales del suelo, siendo la cohesión, el ángulo de fricción interna y el módulo de elasticidad o módulo de Young (Chi y Kushawaha, 1990; Chi, 1993; Chi y Tessier, 1994; Mouazen, 2002).

A nivel internacional se han desarrollado gran cantidad de investigaciones sobre las propiedades macroestructurales de los suelos agrícolas, las cuales iniciaron a principios del siglo pasado, (Nichols, 1925). Cuba no está ajena a este importante tema por lo que se han desarrollado varias investigaciones sobre las propiedades macroestructurales de los suelos agrícolas cubanos, (García de la Figal, 1978; 1991; Rodríguez, 1999; Herrera, 2001; Herrera *et al.*, 2001a; Herrera *et al.*, 2001b; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Herrera, 2006; González *et al.*, 2008). Estos estudios se han desarrollado fundamentalmente en los suelos arcillosos, dentro de los que se destacan los suelos ferralíticos rojos compactados, vertisuelos y negros plásticos.

Los vertisuelos constituyen uno de los cuatro principales suelos agrícolas en Cuba, constando con una extensión territorial de 694 900 ha a través de toda la Isla, (Instituto de Suelos de Cuba, 1999), además de ser uno de los que posee mayor importancia desde el punto de vista agrícola, por consiguiente los mismos están sometidos a una constante acción de los órganos de trabajo de los aperos de labranza y sistemas de rodaje de máquinas agrícolas.

Como antecedentes de investigación de las propiedades macroestructurales de los vertisuelos en Cuba, se cuenta con las investigaciones realizadas por Rodríguez (1999); Rodríguez Orozco *et al.* (1999); Herrera (2001); Herrera *et al.* (2001a, b); Herrera *et al.* (2001), las cuales estuvieron dirigidas a la deter-

minación de las propiedades que intervienen en el diseño de órganos escarificadores y sistemas de rodajes de las máquinas cosechadoras de caña de azúcar, por métodos analíticos. Las mismas fueron determinadas a través de ensayos de corte directo, los cuales son menos exactos que el ensayo de compresión triaxial a la hora de determinar los valores del ángulo de fricción y la cohesión, además de no poderse determinar el módulo de Young, propiedad fundamental a la hora de definir el comportamiento elástico del suelo. Teniendo en cuenta estos aspectos se decide realizar el presente trabajo que tiene como objetivo: determinar las propiedades macroestructurales de un vertisuelo de la costa norte villaclareña, requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza, mediante el método de elementos finitos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las investigaciones experimentales en su primera etapa comprendieron la toma de las muestras de suelo, en las áreas de producción del Complejo Agroindustrial Azucarero "Batalla de Santa Clara" perteneciente al municipio Camajuani, en la provincia Villa Clara. El suelo en estudio se clasifica como un Vertisuelo, y sus propiedades físicas se muestran en la Tabla 1, donde: (**Gs**) es el peso específico; (**LC**) límite de contracción; (**LP**) límite plástico, (**LAd**) límite de adherencia; (**LL**) límite líquido y el índice de plasticidad (**IP**). También se describe su composición granulométrica.

La segunda etapa comprendió la determinación de sus propiedades mecánicas en laboratorio de mecánica de los suelos de la Empresa de Investigaciones Aplicadas a la construcción de Villa Clara (ENIA-VC).

TABLA 1. Características físicas del suelo en estudio

Profundidad (m)		Gs (g/cm <sup>3</sup> )	Límites de consistencia (%)					Granulometría (%)		
Desde	Hasta		LC	LP	LAd	LL	IP	Arena	Limo	Arcilla
0,00	0,15	2,62	16,18	24,9	38,7	80,4	55,5	5	23	72
0,15	0,30	2,62	15,27	23,5	38,0	81,6	58,1	4	23	73
0,30	0,50	2,63	15,01	23,1	36,7	77,6	54,5	4	24	71

## Metodología de las investigaciones experimentales

**Recolección y traslado del suelo.** Para la recolección de las muestras de suelo se abrieron seis calicatas en el campo con dimensiones de 0,60 x 0,60 m, a una profundidad de 0 a 0,15; 0,15 a 0,30; 0,30 a 0,50 m, denominándolos horizonte A, B y C, respectivamente. El suelo cortado fue depositado en sacos de nylon y trasladado posteriormente al laboratorio de Mecánica de los Suelos.

**Preparación de las muestras de suelo.** Para la ejecución de los ensayos se procedió a la conformación de las probetas de suelo mediante el método de remoldeo, según indica en la NC 10:98. Las dimensiones de las probetas empleadas para el ensayo de compresión triaxial fueron 100 mm de altura por 50 mm de diámetro. Las humedades y densidades de remoldeo se enmarcaron en los intervalos de 18 a 50% de humedad y de 0,9 a 1,2 g/cm<sup>3</sup> de densidad aparente seca.

**Ejecución de los ensayos mecánicos.** Los ensayos mecánicos requeridos para la determinación de las propiedades macroestructurales del suelo se basaron en el ensayo de compresión triaxial rápido, sin consolidar no drenado.

**Ejecución de los ensayos de compresión triaxial.** Se realizaron en una prensa de compresión axial que es accionada por un motor eléctrico. En la misma se coloca una cámara de compresión triaxial que contiene la probeta de suelo protegida por una membrana de goma que imposibilita la filtración de líquido contenido en la cámara. La velocidad de compresión en cada corrida fue de 1,27 mm·s<sup>-1</sup>. El anillo dinamométrico a emplear en la determinación de la fuerza axial posee una capacidad 0,4...4,9 kN. Se ensayaron tres especímenes por cada condición, con presiones de cámara ( $\sigma_3$ ) de 0,35; 0,50 y 0,75 kPa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la determinación de las propiedades macroestructurales del Vertisuelo en estudio muestran (Figura 1), estrecha dependencia de la cohesión (C) con respecto al estado de humedad y la densidad del suelo, disminuyendo de forma no lineal con el aumento del contenido de humedad del suelo, sin embargo aumenta con el incremento de la densidad del suelo, alcanzando valores que oscilan entre 27 y 80 kPa, lo cual lo cual ratifica carácter cohesivo de estos suelos, encontrado por Herrera (2001).

Las tendencias encontradas en los resultados se asemejan a las encontradas en este mismo suelo por Herrera (2001), cuando es sometido a un ensayo de cortante plano. De igual forma las tendencias mostradas concuerdan con las obtenidas por varios investigadores en suelos diferentes a los investigados, (García de la Figal, 1991; Mouazen, 2002; Mouazen *et al.*, 2002; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Herrera, 2006).

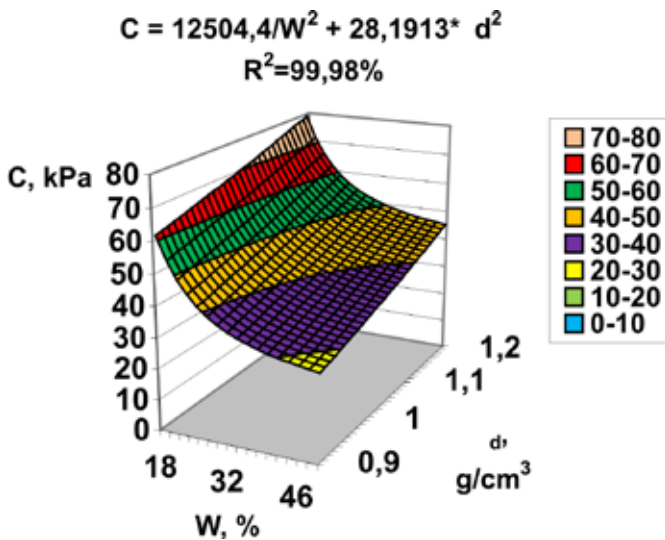


FIGURA 1. Comportamiento de la cohesión. Profundidad 0 a 0,50 m.

Sin embargo los valores máximos y mínimos (27 y 80 kPa) obtenidos del ensayo triaxial difieren de los obtenidos en el ensayo de cortante plano (8 y 44 kPa) por Herrera (2001), para este mismo suelo y condiciones de experimentación.

En el caso de la fricción interna ( $\phi$ ) los resultados muestran una disminución de sus valores cuando el contenido de humedad del suelo se incrementa y un aumento en la medida que se incrementa el estado de densificación del suelo (Figura 2), alcanzando valores que oscilan entre 8 y 23 grados, valores típicos de los suelos arcillosos. Tanto las tendencias mostradas, como los valores alcanzados concuerdan con los resultados obtenidos por otros investigadores en suelos arcillosos, (Ortiz y Hernanz, 1989; García de la Figal, 1991; Rodríguez, 1999; Herrera, 2001; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Herrera, 2006).

Los valores obtenidos del ensayo triaxial son ligeramente mayores a los encontrados por Herrera (2001) para este suelo durante un ensayo de cortante plano (4 a 17 grados).

El Módulo de elasticidad o módulo de Young (E), mostró una estrecha dependencia con el contenido de humedad y

densidad del suelo (Figura 3). Observándose que el módulo de elasticidad tiende a disminuir con el aumento del contenido de humedad, ocurriendo lo inverso en la medida que aumenta la densidad, alcanzando valores que oscilan entre 3 790 y 16 516 kPa. Tanto las tendencias como los valores encontrados concuerdan con los encontrados por Herrera (2006), en un suelo arcilloso del tipo Ferralítico Rojo Compactado.

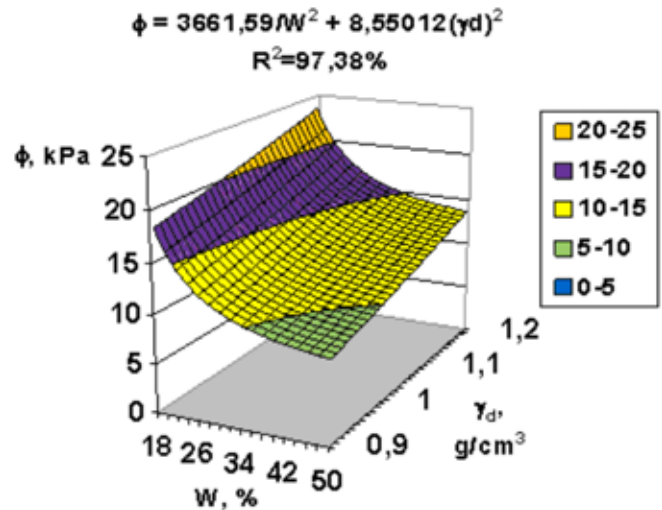


FIGURA 2. Comportamiento del ángulo de fricción interna. Profundidad 0 a 0,50 m.

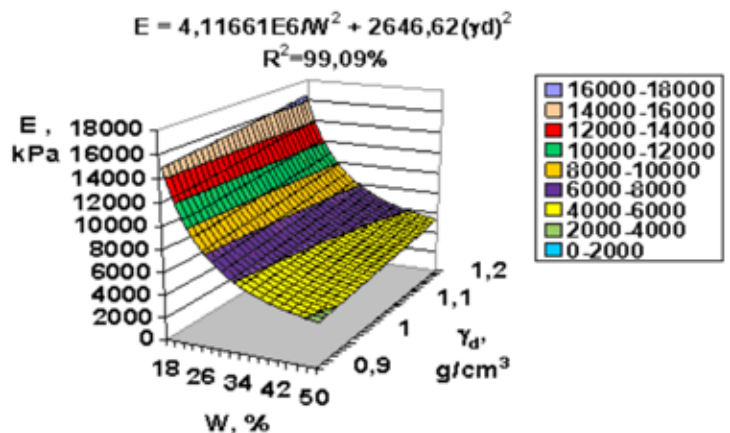


FIGURA 3. Comportamiento del módulo de elasticidad. Profundidad 0 a 0,50 m.

## CONCLUSIONES

- El comportamiento de las propiedades macroestructurales de los vertisuelos está estrechamente correlacionada con su estado de humedad y densidad;
- Tanto las tendencias como los valores exhibidos por las propiedades investigadas indican que la resistencias mecánica del suelo investigado disminuye en la medida que aumenta el contenido de humedad, sin embargo la misma aumenta en la medida que el suelo esté más denso o compacto;
- Las tendencias y valores obtenidos durante los ensayos mecánicos del suelo objeto de estudio se asemejan a las obtenidas por otros investigadores en suelos arcillosos.

- Los valores de la cohesión y fricción interna del suelo objeto de estudio son ligeramente mayores cuando se obtienen mediante un ensayo de compresión triaxial, en comparación con los valores obtenidos de un ensayo de cortante plano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHI, L.: "Modeling mechanical behavior of agricultural soils", *Transactions of the ASAE*, 36(6): 1563-1570, 1993.
- CHI, L. and R. L. KUSHAWAHA: "A non-linear 3D finite element analysis of soil failure with tillage tools", *J. Terramech.*, 27(4): 343-366, 1990.
- CHI, L. and R. L. KUSHAWAHA: "Three dimensional finite element interactions between soil and a simple tillage tool", *Transactions of the ASAE*, 34(2): 3623-3626, 1991.
- CHI, L. and R. L. KUSHAWAHA: "A non-linear three dimensional finite element analysis of soil failure with curved tillage tool", *Canadian Agric. Eng.*, 41(1): 15-22, 1998.
- CHI, L. and S. TESSIER: Comparison of nonlinear elastic and elastoplastic models,. En: ASAE Paper, 1994, pp. 19. 94-1076.
- DECHAO, Z. and F. QI: An approach to the analytical prediction in rotatory soil cutting process, **Proceedings of the International Conference on Soil Dynamics**, 1985, pp. 428-442, Auburn, Alabama: National Tillage Machinery Laboratory, Auburn, Alabama, USA, 1985.
- GARCÍA DE LA FIGAL, A. E.: "Estudio de la fricción suelo-metal y suelo-plástico para dos suelos cañeros cubanos", *Ciencias Técnicas, Ingeniería en la Construcción de Maquinaria*, 3: 107-122, 1978.
- GARCÍA DE LA FIGAL, A. E.: "Estudio de las propiedades tecnológicas más importantes de los suelos cubanos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 3(2): 61-77, 1991.
- GONZÁLEZ, O.; C. E. IGLESIAS; M. HERRERA; E. LÓPEZ y A. L. SÁNCHEZ: "Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(2): 50-54, 2008.
- HERRERA, M.: *Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores*, 65pp, **Tesis (en opción al título de Master en Mecanización Agropecuaria)**, Universidad Agraria de la Habana, La Habana, Cuba, 2001.
- HERRERA, M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, 109pp, **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2006.
- HERRERA, M.; C. IGLESIAS; M. RODRIGUEZ; A. GARCÍA DE LA FIGAL; R. DELGADO y M. FERNÁNDEZ: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte I", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 29-37, 2001a.
- HERRERA, M.; C. IGLESIAS; M. RODRIGUEZ; A. E. GARCÍA DE LA FIGAL; R. DELGADO y M. FERNÁNDEZ: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte II", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 29-36, 2001b.
- HERRERA SUÁREZ, M.; C. E. IGLESIAS CORONEL; M. RODRÍGUEZ OROZCO y O. GONZÁLEZ CUETO: *Propiedades tecnológicas de los vertisuelos de la costa norte villaclareña que intervienen en la descompactación de los vertisuelos*, 35pp., Santa Clara, Universidad Central de Las Villas, (Informe de Investigación terminada Proyecto CITMA Territorial 0805), 2001.
- INSTITUTO DE SUELOS DE CUBA: *Clasificación genética de los suelos de Cuba*, (Mapa 1: 25 000). La Habana: Instituto de Suelos, 1999.
- MOUAZEN, A. M.: "Mechanical behaviour of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading", *Journal of Terramechanics*, 39: 115-126, 2002.
- MOUAZEN, A. M.; H. RAMON y J. DE BAERDEMAEKER: "Effects of Bulk Density and Moisture Content on Selected Mechanical Properties of Sandy Loam Soil", *Biosystems Engineering*, 83(2): 217-224, 2002.
- NC 10:98: *Geotecnia, Preparación de las muestras de suelos*, Vig. Diciembre 1998.
- NICHOLS, M. L.: "The sliding metal over soil", *Agric. Eng.*, 6(80-84), 1925.
- ORTIZ, J. y J. L. HERNANZ: *Las máquinas agrícolas y su aplicación*, Mundi-Prensa, Madrid, España, 1989.
- PÉREZ DE CORCHO, J. S.; M. HERRERA y C. E. IGLESIAS: Determinación de las propiedades físico-mecánicas de suelos ferralíticos rojos en áreas de producción de piña, En: **Sexta Conferencia Científica Internacional UNICA**, 2004, 18-21 de octubre 2004, Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila, Cuba.
- RODRÍGUEZ, M.: *Fundamentación de un sistema de rodajes por semiesteras en las cosechadoras cubanas de caña de azúcar para trabajar en suelos de mal drenaje con condiciones de elevada humedad*, 100pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)**, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 1999.
- RODRÍGUEZ OROZCO, M.; M. HERRERA SUÁREZ y O. GONZÁLEZ CUETO: *Estudio de las propiedades físico-mecánicas de los suelos de mal drenaje de la costa norte de villa clara, relacionadas con la compactación y la traficabilidad*, 37pp., Santa Clara, Universidad Central de Las Villas, (Informe de Investigación Terminada. Proyecto CITMA Territorial 080103), Santa Clara, Cuba, 1999.
- ROSA, U. y D. WULFSOH: "Constitutive model for high speed tillage using narrow tools", *Journal of Terramechanics*, 36: 221-234, 1999.