

# Influencia del estado de humedad y densificación en las propiedades macroestructurales de un Vertisol en tres niveles de profundidad

## Influence of the moisture and density in the macrostrucural properties of Vertisol in three deep levels

A.A. de la Rosa Andino<sup>1</sup>, C.M. Herrera Suárez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Granma. Dpto. de Ciencias Técnicas. Granma. Cuba.

<sup>2</sup>Universidad Central de Las Villas. Dpto. Mecanización Agropecuaria. Las Villas. Cuba.

<sup>3</sup>Universidad de Granma. Dpto. de Ingeniería Agrícola. Granma. Cuba.

### Resumen

En el presente trabajo se investigó la influencia que ejerció el contenido de humedad y el estado de densificación de un Vertisol en el comportamiento de sus propiedades macroestructurales, para tres horizontes de profundidad. El suelo en estudio fue clasificado y se determinaron sus propiedades físicas (peso específico, límites de consistencia, granulometría y contenido de materia orgánica) así como, sus propiedades mecánicas (cohesión, ángulo de fricción interna y el módulo de Young. Para ello se utilizó el ensayo de compresión triaxial, rápido, sin consolidar, no drenado. Se efectuó un análisis de regresión multivariado de la dependencia existente entre las propiedades mecánicas del suelo, el estado de humedad y densidad del mismo. Durante el análisis de los resultados se puso de manifiesto una relación no lineal entre las propiedades macroestructurales investigadas y el contenido de humedad del suelo, así como su estado de densificación para los dos primeros horizontes de profundidad muestreados (0 a 0,15 m y 0,15 a 0,30 m); sin embargo, para el horizonte más profundo (0,30 a 0,50 m) se encontró una relación lineal, resultado que pudiera estar condicionado por la presencia de un menor contenido de materia orgánica. Se evidenció que las magnitudes y tendencias de las propiedades en estudio estuvieron condicionadas por el contenido de humedad, densidad, composición granulométrica y contenido de materia orgánica. Las tendencias exhibidas por el suelo objeto de estudio, en cada una de las propiedades investigadas, concordaron con las obtenidas por otros investigadores en diferentes tipos de suelos.

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

Recibido el 12-6-2012 ● Aceptado el 23-1-2013

Autor de correspondencia e-mail: arosaa@udg.co.cu; miguelhs@uclv.edu.cu; bgaskine@udg.co.cu

## Abstract

In the current research, the influence exerted by the content of moisture and the densification degree of a Vertisol on the behavior of its macro-structural properties, for three horizons depths were investigated. The soil under study was classified and its physical properties (specific weight, consistency limits, sorting and content of organic matter) as well as its mechanical properties (cohesion, internal angle of friction and the Young's module were determined. In order to accomplish the latter, the test of three-dimensional compressions was used: fast, without consolidating, not drained. A regression multivariate analysis of the existing dependency between the mechanical properties of the soil, the humidity degree and its density were performed. During the analysis of the results a nonlinear relation between the investigated macrostructure properties and the content of moisture in the soil, as well as its state of densification for the first two sampled horizons of depth were shown (0 to 0.15 m and 0.15 to 0.30 m); nevertheless, for the deepest horizon a linear relation (0.30 to 0.50 m) was found. This result could be conditioned by the presence of a lower contain of organic matter. It made evident that the magnitudes and tendencies of the properties under study depend on the water content, density, grain sized composition and content of organic matter of the soil. The tendencies shown by the soil studied for each one of the investigated properties agree with those obtained by other investigators in different types of soils.

**Key words:** dynamics properties, mechanical properties, soil mechanics, soil dynamics, triaxial.

## Introducción

El estudio de la resistencia mecánica de los suelos agrícolas comprende la determinación de sus propiedades macroestructurales, pues las mismas aportan los datos que caracterizan el comportamiento material del suelo durante los análisis desarrollados para la posterior toma de decisiones. Dentro de estas propiedades se encuentran la cohesión (C), el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), modulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), tensión de fluencia del suelo ( $\sigma_\phi$ ) y la resistencia a los esfuerzos cortantes ( $\tau$ ). Destacándose la cohesión (C), ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y el módu-

## Introduction

The research of the mechanic resistance of agriculture soils involves the determination of its macrostructure properties, because these provide the data that characterize the material behavior of the soil during the developed analyses for the posterior decision-makings. On these properties are the cohesion (C), the internal friction angle ( $\phi$ ) the elasticity module (E), the Poisson coefficient ( $\nu$ ), the creep tension of the soil ( $\sigma_\phi$ ), and the elasticity module ( $\tau$ ). Out of these, highlighting the cohesion (C), internal friction angle ( $\phi$ ) and the elasticity module, because on the

lo de elasticidad (E), debido a que en el caso específico de la simulación computacional de la respuesta mecánica de los suelos mediante el método de elementos finitos (MEF), los modelos constitutivos las emplean como datos de entrada (Herrera, 2006).

Estas propiedades presentan estrecha relación con el estado físico del suelo y sus cambios, encontrándose que tienden a disminuir su magnitud en la medida que aumenta el contenido de humedad y a aumentar en la medida que el suelo se encuentra más denso (Herrera, 2001; Mouazen, 2002; Mouazen *et al.*, 2002; Herrera, 2006; Gitau *et al.*, 2008; González, 2011).

Herrera (2001) encontró valores máximos y mínimos de 44 y 8 kPa respectivamente, para la cohesión y de 17 y 5 grados para el ángulo de fricción interna en un Vertisol sometido a cortante plano, manifestando una tendencia a la disminución de la magnitud de estas propiedades cuando el contenido de humedad del suelo se encontraba cerca del 50%, o sea en la medida que se acercaba a su límite superior de plasticidad, aumentando cuando el suelo alcanzó valores de densidad cercanos a  $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ , o lo que es lo mismo valores cercanos a la máxima densidad alcanzable por estos suelos (Herrera, 2001; Herrera *et al.*, 2001). Estas tendencias coincidieron con las encontradas por otros autores en suelos de diferente naturaleza (Herrera, 2001; Mouazen, 2002; Mouazen *et al.*, 2002; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Herrera, 2006; González, 2011). Para el caso particular de los Vertisoles se tiene como antecedentes los estudios realizados por Rodríguez (1999), Herrera (2001), Herrera *et al.* (2001)

specific case of the computational simulation of the mechanic response of soils with the method of finite elements (MEF), the constitutive models are employed as entrance data (Herrera, 2006).

These properties are closely related to the physical phase of the soil, its changes, evidencing that it tends to reduce the magnitude at the time that increases the humidity content and when the soil gets denser (Herrera, 2001; Mouazen, 2002; Mouazen *et al.*, 2002; Herrera, 2006; Gitau *et al.*, 2008; González, 2011). Herrera (2001) found maximum and minimum values of 44 and 8 kPa respectively, for the cohesion of 17 and 5 degrees for the internal friction angle in a Vertisol submitted to flat cut, and showing a tendency to a reduction on the magnitude of these properties, when the humidity content of the soil was near 50%, that is, at the time it reached to its plasticity limit, it increased when the soil obtained density values near  $1.2 \text{ g.cm}^{-3}$ , or values close to the density maxima reached for these soils (Herrera, 2001; Herrera *et al.*, 2001).

These tendencies agreed to those found by other authors in soils with different nature (Herrera, 2001; Mouazen, 2002; Mouazen *et al.*, 2002; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Herrera, 2006; González, 2011). For the particular case of Vertisols, there are backgrounds from the researches carried out by Rodríguez (1999), Herrera (2001), Herrera *et al.* (2001) in Vertisols for the North Coast of Villa Clara, central region of Cuba, after the essays done with direct cuts, essay which according to Juárez

en los Vertisoles de la costa norte de Villa Clara, región central de Cuba, a partir de los ensayos de corte directo, ensayo que según Juárez (1969), Sowers y Sowers (1979) fue menos exacto para la determinación de  $C$  y  $\phi$ ; además, de no poderse determinar Poisson y Young. Tomando en cuenta estos aspectos, la extensión de 694 900 ha y debido a que por su importancia agrícola los Vertisoles en Cuba presentan un alto grado de mecanización en busca del desarrollo de cultivos con grandes beneficios económicos, como lo son la caña de azúcar, arroz y cultivos varios, se realizó el presente trabajo que tuvo como objetivo determinar la influencia del contenido de humedad y el estado de densificación de un Vertisol en el comportamiento de sus propiedades macroestructurales en tres niveles de profundidad.

## **Materiales y métodos**

La investigación experimental en su primera etapa comprendió la toma de las muestras de suelo, en las áreas de producción del Complejo Agroindustrial Azucarero “Batalla de Santa Clara” perteneciente al municipio Camajuaní, en la provincia Villa Clara, Cuba. El suelo en estudio se clasifica como un Vertisol según las clasificaciones FAO (1988), Soil Survey Staff (2010) y según la Nueva Clasificación Genética de los Suelos en Cuba (MINAGRI, 1999) clasificó como un Vertisol, de tipo genético Vertisol Pélico y subtipo oscuro plástico Gleyzozo.

La segunda etapa comprendió la determinación de sus propiedades mecánicas en el laboratorio de mecánica

(1969), Sowers and Sowers (1979) were less accurate for determining  $C$  and  $\phi$  and, without the possibility of determining Poisson and Young. Considering the latter mentioned and the extension of 694 900 ha, and due to Vertisols in Cuba have lot of agriculture importance, with a high mechanization degree looking for the development of crops with great economical benefits, such as sugar cane, rice and different crops, the current research was carried out with the objective of determining the influence of the humidity content and the density phase of a Vertisol in the behavior of the macrostructure properties at three depths levels.

## **Materials and methods**

The first phase of the experimental research included the sampling of the soil in the production areas of the Sugar Agro industrial Complex “Batalla de Santa Clara”, belonging to the Camajuani county, in Villa Clara, Cuba. The soil under study is classified as a Vertisol according to the FAO classifications (1988), Soil Survey Staff (2010), and according to the new genetic classification of soils in Cuba (MINAGRI, 1999) the soil was classified as Vertisol, with genetic Pelic Vertisol and dark plastic subtype Gleyzed.

The second phase included the determination of the mechanical properties in the mechanic laboratory of soils of the Enterprise of Researches Applied to the Construction of Villa Clara (ENIA-VC).

Recollection and transfer of the soil. For the collection of the soil

de los suelos de la Empresa de Investigaciones Aplicadas a la Construcción de Villa Clara (ENIA-VC).

**Recolección y traslado del suelo.** Para la recolección de las muestras de suelo se abrieron seis hoyos en el campo con dimensiones de 0,60 X 0,60 m, para tres niveles de profundidad de 0 a 0,15; 0,15 a 0,30; 0,30 a 0,50 m. El suelo cortado fue depositado en bolsas de nylon y trasladado posteriormente al laboratorio de mecánica de los suelos.

**Determinación de las propiedades físicas.** En la figura 1 se observan los ensayos realizados en laboratorio de mecánica de los suelos, para la determinación de las propiedades físicas. Se determinó el peso específico, límites de consistencia, la granulometría y el contenido de materia orgánica.

**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 NC 10 (1998). En la figura 2 se observa parte de la instrumentación utilizada para la preparación de las muestras de suelo. 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.

**Determinación de las propiedades macroestructurales.** Estas propiedades se determinaron mediante un ensayo de compresión triaxial rápido, no drenado y sin consolidar previamente (estándar). En la figura 3 se

samples, six holes were opened in the field with dimensions of 0.60 X 0.60 m, for three depth levels of 0 to 0.15; 0.15 to 0.30; 0,30 to 0.50 m. The cut soil was deposited in nylon bags and carried to the mechanic laboratory of soils.

**Determination of the physical properties.** In figure 1 are observed the essays carried out in the mechanic laboratory of soils, for the determination of the physical properties. The specific weight, the consistency limits, the granulometry and the content of organic matter were determined.

**Preparation of soil samples.** For performing the essays was proceeded to form the test tubes of the soils with the shape method, according to the norm NC 10 (1998). In figure 2 are observed parts of the instruments used for the preparation of the samples of the soil. The dimensions of the test tubes employed for the triaxial compression were 100 mm of height x 50 mm of diameter. The humidity and densities of shaping were framed in the intervals from 18 to 50% of humidity from 0.9 to 1.2 g.cm<sup>-3</sup> of apparent dry density.

**Determination of macrostructure properties.** These properties were determined with a fast, undrained and consolidated triaxial essay (standard). In figure 3 are observed the triaxial compression device used for determining the macrostructure of the soil used. The sample or test tube of the soil was put inside a triaxial compression chamber protected with a plastic membrane, which made impossible the filtering of the liquid in the chamber. The



**Figura. 1. Determinación de las propiedades físicas del suelo.**

**Figure. 1. Soil physical properties determination.**

observa el aparato de compresión triaxial utilizado para determinar las propiedades macroestructurales del suelo en estudio. La muestra o probeta de suelo se colocó en el interior de una cámara de compresión triaxial protegida por una membrana de goma que imposibilitó la filtración de líquido conte-

compression velocity was of  $1.27 \text{ mm.s}^{-1}$ . The dynamometer ring employed in the determination of the axial strength presented a capacity of 0.4 to 4.9 kN. Three samples were essayed for each condition of the soil, with compressions of the chamber ( $s_3$ ) from 35; 50 and 75 kPa.



**Figura. 2. Preparación de las muestras de suelo.**

**Figure. 2. Soil samples preparation.**



**Figura. 3. Aparato de compresión triaxial.**

**Figure. 3. Triaxial compression apparatus.**

nido en la cámara. La velocidad de compresión en cada una de las corridas fue de  $1,27 \text{ mm.s}^{-1}$ . El anillo dinamométrico empleado en la determinación de la fuerza axial presentó una capacidad de 0,4 a 4,9 kN. Se ensayaron tres especímenes por cada condición de suelo, con presiones de cámara ( $s_3$ ) de 35; 50 y 75 kPa.

#### **Procesamiento estadístico.**

Se ejecutó a través de un análisis de regresión multivariado de la dependencia existente entre las propiedades mecánicas del suelo y el estado de humedad y densidad del mismo y para ello se empleó el procesador estadístico Stargraphics Plus 5.1.

## **Resultados y discusión**

Se determinaron las propiedades físicas del suelo en estudio para los tres niveles de profundidad y se realizó la caracterización del mismo. Los resultados de estas propiedades físicas se aprecian en el cuadro 1. Los mismos permitieron clasificar el suelo objeto de estudio como una arcilla pesada según el triángulo de clasificación textural del Instituto de Suelos de la Academia de Ciencias (Cairo y Quintero, 1980). Lo que corroboró que los Vertisoles son sue-

**Statistical procedure.** It executed using the multivariate regression analysis of dependence existent on the mechanic properties of the soil and the humidity and density phases. For this, was used the statistical processor Stargraphics Plus 5.1.

## **Results and discussion**

The physical properties of the soil were determined in a study for the three depths levels, and the characterization of the soil was performed. The results of these physical properties are seen in table 1. These allowed classifying the soil as heavy clay, according to the texture classification triangle of the Soil Institute of the Science Academy (Cairo and Quintero, 1980). This corroborated that Vertisols, are highly clayey soils, reaching 73% of clay, which transformed it into a soil with very specific characteristics, from the tillage point of view. On the other hand, the analysis of the consistency limits was carried out, and it was observed that this soil presented an extremely plastic nature, reaching a maximum plasticity level of 58.1%. The highest concentration of organic matter was found on the horizon from 0.00 to 0.15 m of depth.

Cuadro 1. Características físicas del suelo.

Table 1. Soil physical characteristics.

Profundidad (m)	Límites de consistencia (%)						Granulometría (%)				
	Desde	Hasta	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	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	2,65
0,15	0,30	2,62	15,27	23,5	38,0	81,6	58,1	4	23	73	0,86
0,30	0,50	2,63	15,01	23,1	36,7	77,6	54,5	4	24	71	0,77

(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 y el contenido de materia orgánica (MO).



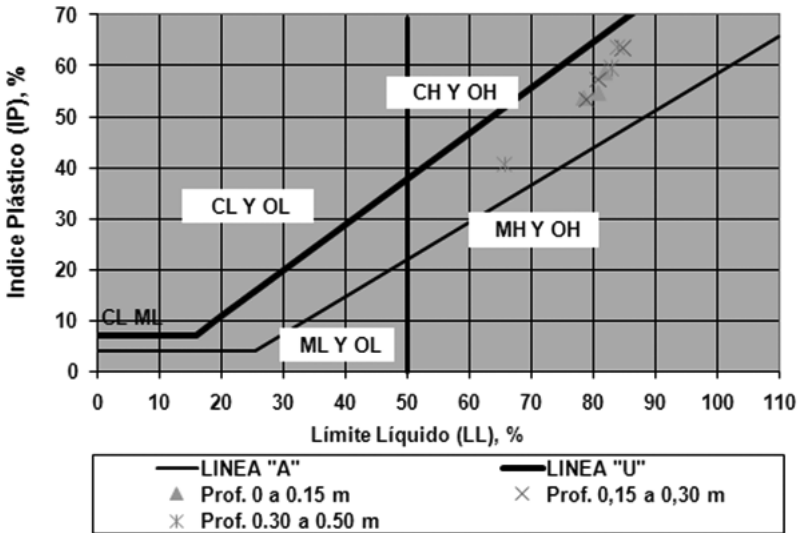
los altamente arcillosos, alcanzando hasta un 73% de arcilla, lo que lo convirtió en un suelo con características muy especiales desde el punto de vista de la dificultad para el laboreo. Por otro lado se ejecutó el análisis de los límites de consistencia y se observó, que este suelo presentó una naturaleza extremadamente plástica, alcanzando un índice de plasticidad máximo de 58,1%. La mayor concentración de materia orgánica se encontró en el horizonte de 0,00 a 0,15 m de profundidad.

Según el sistema unificado de clasificación de suelos, basado en el empleo de la carta de plasticidad (NC 59, 2000), este suelo clasificó como una arcilla de grano fino del tipo CH y OH, arcilla muy plástica orgánica (figura 4).

According to the unified system of the classification of the soils, based on the employment of the plasticity norm (NC 59, 2000), this soil was classified as a fine-grain clay with CH and OH, and organic plastic clay (figure 4).

Once determined the macrostructure properties, the relation to the humidity and density phase of the soil was analyzed. It was detected that these tended to reduce their magnitude at the time that increased the humidity content of the soil, and increased at the time that the soil was denser.

In table 2 are seen the results of the multivariate regression analysis, where was evidenced the close relation



IP: Índice plástico, LL: Límite líquido, Prof: Profundidad, CL: Arcilla poco plástica, ML: Limo, ML y OL: Limo y arcilla orgánica, CL y OL: Arcilla poco plástica y arcilla orgánica, CH y OH: Arcilla muy plástica y limo orgánico, MH y OH: Limo plástico y limo orgánico.

**Figura. 4. Carta de plasticidad para clasificar los suelos.**

**Figure. 4. Letter of plasticity to classify grounds.**

Determinadas las propiedades macroestructurales, se analizó su relación con el estado de humedad y densidad del suelo. Se detectó que las mismas tendieron a disminuir su magnitud en la medida que aumentó el contenido de humedad del suelo e incrementó en la medida que el suelo se encontraba más denso.

En el cuadro 2 se aprecian los resultados del análisis de regresión multivariado, donde se evidenció la estrecha relación entre la magnitud de las propiedades macroestructurales del Vertisol objeto de estudio (cohesión, ángulo de fricción interna y módulo de Young) y el estado físico del suelo (contenido de humedad y densidad del suelo). Los estadígrafos mostraron la validez de las relaciones encontradas para todos los horizontes de profundidad en análisis.

Durante el análisis de los resultados se puso de manifiesto una relación no lineal entre las propiedades macroestructurales investigadas y el contenido de humedad del suelo, así como su estado de densificación para los dos primeros horizontes de profundidad muestreados (0 a 0,15 m y 0,15 a 0,30 m); sin embargo, para el horizonte más profundo (0,30 a 0,50 m) se encontró una relación lineal, resultado que pudiera estar condicionado por la presencia de un menor contenido de materia orgánica.

**Cohesión (C):** El resultado de la determinación del comportamiento de la cohesión a partir del análisis de regresión multivariado mostró una tendencia a disminuir no linealmente en la medida que aumentó el contenido de humedad para los dos primeros niveles de profundidad (0 a 0,15; 0,15 a

between the magnitude of the macrostructure properties of Vertisol (cohesion, internal friction angle and Young module), and the physical phase of the soil (humidity content and density of the soil). The statisticians showed the accuracy of the relations found for all the depth horizons under analyses.

During the analysis of the results, was indicated a non-linear relation between the researched macrostructure properties and the humidity content of the soil, as well as its density phase for the first two sampled depth horizons (0 to 0.15 m and 0.15 to 0.30 m); however, for the deepest horizon (0.30 to 0.50 m) was found a linear relation, result that might be conditioned by the presence of a lower content of organic matter.

**Cohesion (C):** The result of the behavior determination of the cohesion after the multivariate regression analysis, showed a non-linear tendency to reduce at the time that increased the humidity content for the first two depth levels (0 to 0.15; 0.15 to 0.30 m), with a regression coefficient ( $R^2=97.09\%$  and  $R^2=97.40\%$ ) respectively. This tendency agreed to the ones referred in other soils by Ortiz and Hernánz (1988), Chuchman *et al.* (1993), Chancellor (1994), Sánchez (1995), Herrera (2001), Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002), Pérez de Corcho *et al.* (2004), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) and González (2011), even though it differed to the one obtained by Duran (2002) and Sánchez (2011), where the cohesion reached a maximum value for a determined humidity content, and then, it started to reduce. On the third

Cuadro 2. Propiedades macroestructurales.

Table 2. Macrostructural properties.

Propiedad	Valores		Profundidad m	Ecuación	R <sup>2</sup> ajust %	Error estándar
	Máximo	Medio				
C, kPa	87,17	39,21	0 a 0,15	$18\ 372,5/W^2 + 21,156\ 4 * (\gamma\delta)^2$	97,09	8,29
	86,25	39,80	0,15 a 0,30	$19\ 428,2/W^2 + 21,906\ 5 * \gamma\delta$	97,40	8,38
f, °	66,09	43,31	0,30 a 0,50	$-0,795\ 34*W + 67,006\ 8 * \gamma\delta$	99,23	4,09
	25,17	17,67	0 a 0,15	$-0,005\ 876\ 74 * W^2 + 22,565\ 8\ \gamma\delta$	95,89	3,62
E, kPa	25,93	17,61	0,15 a 0,30	$-0,006\ 865\ 87 * W^2 + 23,469 * \gamma\delta$	94,77	4,33
	23,29	12,99	0,30 a 0,50	$-0,579\ 874 * W + 30,79*sqrt(\gamma\delta)$	96,71	2,44
E, kPa	15 510,95	6 804,70	0 a 0,15	$3,385\ 12E6 * W^2 + 3\ 516,01 * (\gamma\delta)^2$	97,92	1 221,58
	17 552,53	6 170,74	0,15 a 0,30	$4,855\ 18E6 * W^2 + 1\ 790,21 * (\gamma\delta)^2$	99,25	784,28
	12 074,16	7 701,23	0,30 a 0,50	$-156,193 * W + 12\ 415,5 * \gamma\delta$	94,03	2 089,43

R<sup>2</sup>: Coeficiente de regresión, C: Cohesión, f: Ángulo de fricción interna, E: Módulo de Young, W: Humedad, gd: Densidad.

0,30 m), con un coeficiente de regresión ( $R^2= 97,09\%$  y  $R^2= 97,40\%$ ) respectivamente. Tendencia que coincidió con las referidas en otros suelos por Ortiz y Hernánz (1988), Chuchman *et al.* (1993), Chancellor (1994), Sánchez (1995), Herrera (2001), Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002), Pérez de Corcho *et al.* (2004), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) y González (2011), aunque difirió de la tendencia encontrada por Duran (2002) y Sánchez (2011) donde la cohesión alcanzó un valor máximo para un determinado contenido de humedad y luego comenzó a disminuir. Destacándose, que en el tercer horizonte (0,30 a 0,50 m) la cohesión disminuyó de forma inversamente proporcional al contenido de humedad con un coeficiente de regresión  $R^2=99,23\%$ . Sin embargo, se observó que en la medida que el suelo se encontraba más denso la cohesión aumentó en los tres horizontes muestreados. Para el primer horizonte de profundidad se encontró que aumentó de forma no lineal, en contraposición al resto de los horizontes, donde la cohesión aumentó linealmente con el consiguiente aumento de la densidad (cuadro 2), alcanzando valores máximos de 87,17 kPa cuando el suelo presentó un 18% de humedad (estado seco y compactado) y valores mínimos de 20,53 kPa cuando el suelo tuvo un 50% de humedad (húmedo y poco compacto). Estas magnitudes concordaron para un rango de humedad entre el 32 y 48% con las encontradas por otros autores (Ortiz y Hernánz, 1988; Chuchman *et al.*, 1993; Pérez de Corcho *et al.*, 2004), en suelos de textura arcillosa (25 a 35 kPa), alcanzando valores muy superiores a los ci-

horizon (0.30 to 0.50 m), the cohesion reduced inversely proportional to the humidity content, with a regression coefficient of  $R^2=99.23\%$ . However, it was observed that at the time the soil was denser, the cohesion increased in the three sampled horizons. For the first depth horizon, was found that it had a non-linear increment, on the contrary of the rest of the horizons, where the cohesion increased lineally with the subsequent increment of density (table 2), reaching maximum values of 87.17 kPa, when the soil presented a 18% of humidity (dry and compacted phase) and minimum values of 20.53 kPa, when the soil had a 50% of humidity (wet and less compact). These magnitudes agreed with a humidity rank from 32 to 48%, to those found by Ortiz and Hernánz, 1988; Chuchman *et al.*, 1993; Pérez de Corcho *et al.*, 2004), in clayey soils (25 to 35 kPa), reaching superior values to those cited by these authors, when the humidity content reduced ( $W<32\%$ ). The comparison of these results to the ones obtained by other researches such as Rodríguez (1999) and Herrera (2001) in Vertisol, showed superior magnitudes of this variable, which was conditioned by the essay method employed by these authors (direct cut), since is known that the triaxial compression essays were more accurate than those with direct cuts. Similar results were obtained by Mouazen (2002) when comparing these two essays in a loamy-sandy soil.

The comparison on the cohesion magnitude on each depth horizon allowed affirming that there was a tendency to reduce its value at the time that increases the depth of sampling

tados por estos autores cuando el contenido de humedad disminuyó ( $W < 32\%$ ). La comparación de estos resultados con los obtenidos por otros investigadores como Rodríguez (1999) y Herrera (2001) en Vertisol mostró magnitudes superiores de esta variable, lo cual estuvo condicionado por el método de ensayo empleado por estos (cortante directo), pues se reconoce que los ensayos de compresión triaxial fueron más exactos que los de corte directo. Resultados similares fueron encontrados por Mouazen (2002) al comparar estos dos ensayos en un suelo franco arenoso.

La comparación de la magnitud de la cohesión en cada horizonte de profundidad permitió afirmar, que hubo una tendencia a la disminución de su valor en la medida que aumenta la profundidad de muestreo (cuadro 2). Encontrándose que los máximos valores se obtuvieron en el primer horizonte de muestreo, resultado que estuvo condicionado por el contenido de materia orgánica 2,65% (cuadro 1), pues un aumento del contenido de materia orgánica trajo como consecuencia un aumento de la resistencia mecánica del suelo. Sin embargo, en el segundo y tercer horizonte el valor de la cohesión fue menor, producto de que en ambas profundidades el contenido de materia orgánica fue inferior, resultados similares fueron encontrados por Fielke (1999).

Las magnitudes de esta variable en el primer y segundo horizonte fueron similares a pesar de la marcada diferencia en el contenido de materia orgánica, debido a la influencia que ejerció la plasticidad, pues el índice de plasticidad en el segundo horizonte fue

(table 2). The maximum values were obtained on the first sampling horizon, result which was conditioned by the content of organic matter 2.65% (table 1), because an increment on the content of organic matter caused an increment on the mechanic resistance of the soil. However, in the second and third horizon, the cohesion value was lower, since in both depths, the content of organic matter was inferior, similar results were found by Fielke (1999). The magnitudes of this variable in the first and second horizon were similar in spite of the marked difference in the content of the organic matter, due to the influence that had the plasticity, because, the plasticity index in the second horizon was higher. This result evidenced that for the soil under study, the plasticity had a higher influence on the mechanical resistance of the soil than on the content of the organic matter.

#### **Angle of internal friction ( $\phi$ ).**

The results of the statistical processing showed that the values on the first two depth horizons had a non-linear reduction with the increment of the humidity content (table 2), increasing these values lineally with the increment of the apparent density (table 2), with a regression coefficient  $R^2=95.89\%$  and  $94.77\%$  respectively. The minimum values obtained for these two horizons researched were similar to the magnitudes referred by other authors in different types of the soils (Ortiz and Hernánz, 1988; Chuchman *et al.*, 1993; Sánchez, 1995; Rodríguez, 1999; Herrera, 2001; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Gitau *et al.*, 2008), and the maximum were closed to the reported by Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002) and Gitau *et al.*

mayor. Este resultado evidenció que para el suelo en estudio la plasticidad tuvo mayor influencia en la resistencia mecánica del suelo que el contenido de materia orgánica.

#### **Ángulo de fricción interna ( $\phi$ ).**

Los resultados del procesamiento estadístico mostraron que sus valores en los dos primeros horizontes de profundidad disminuyeron no linealmente con el aumento del contenido de humedad (cuadro 2). Incrementándose estos valores de forma lineal con el aumento de la densidad aparente (cuadro 2), con un coeficiente de regresión  $R^2=95,89\%$  y  $94,77\%$  respectivamente.

Los valores mínimos que se obtuvieron para estos dos horizontes investigados se acercaron a las magnitudes referidas por otros investigadores en diferentes tipos de suelos (Ortiz y Hernández, 1988; Chuchman *et al.*, 1993; Sánchez, 1995; Rodríguez, 1999; Herrera, 2001; Pérez de Corcho *et al.*, 2004; Gitau *et al.*, 2008) y los máximos estuvieron cerca de los reportados por Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002) y Gitau *et al.* (2008). Las tendencias presentadas en estos dos horizontes concordaron con las referidas por Chancellor (1994), Herrera (2001), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) y González (2011) en suelos de naturaleza semejante al Vertisol objeto de estudio. Sin embargo, otros investigadores como Mouazen *et al.* (2002), Pérez de Corcho *et al.* (2004), Gitau *et al.* (2008) y Sánchez (2011) reportaron que el ángulo de fricción interna aumenta su valor hasta alcanzar un valor máximo para un contenido de humedad determinado, a partir del cual comenzó a disminuir según el aumento del contenido de humedad.

(2008). The tendencies presented in these two horizons agreed to those referred by Chancellor (1994), Herrera (2001), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) and González (2011) in soils with a nature similar to Vertisol. However, other researches such as Mouazen *et al.* (2002), Pérez de Corcho *et al.* (2004), Gitau *et al.* (2008) and Sánchez (2011) reported that the internal friction angle increases its value to reach a maximum value for a determined humidity content, after which started to reduce according to the increment on the humidity content. This difference might be due to the nature of the soil researched, because it has been found in soils with a lower content of clay than in the research soil.

In the horizon from 0.30 to 0.50 m of depth, was observed that when the humidity content increased, the internal friction angle had a inversely proportional reduction, however, this variable, in relation to the density, had a non-linear increment with a regression coefficient of  $R^2=96.71\%$  (table 2).

When comparing the behavior of the internal friction angle of the soil in the three evaluated depth levels, was observed that its magnitude reduced at the time that increased the depth of the soil, reaching minimum values that oscillated from 0.21 to 25.17° (table 2), showing the cohesive character of this soil, which behaved as a un-friction or cohesive soil, when found of a phase with a humidity at 50%. This result was conditioned by the influence of the clay content, which when increasing provoked the reduction of the internal friction angle. Also, the action of the water content

Esta diferencia podría estar dada por la naturaleza del suelo investigado, pues ha sido encontrada en suelos con un menor contenido de arcilla que el suelo investigado.

En el horizonte de 0,30 a 0,50 m de profundidad se observó que al aumentar el contenido de humedad disminuyó de forma inversamente proporcional el ángulo de fricción interna, sin embargo, está variable con relación a la densidad incrementó de forma no lineal con un coeficiente de regresión  $R^2=96,71\%$  (cuadro 2).

Al comparar el comportamiento del ángulo de fricción interna del suelo en los tres niveles de profundidad estudiados, se observó que su magnitud disminuyó en la medida que se incrementó la profundidad del suelo, llegando a alcanzar valores mínimos que oscilaron de  $0,21$  a  $25,17^\circ$  (cuadro 2), poniendo de manifiesto el carácter cohesivo de este suelo, el cual llegó a comportarse como un suelo no friccionante, o lo que es lo mismo puramente cohesivo, cuando se encontró en estado suelto con una humedad cercana al 50%. Este resultado estuvo condicionado por la influencia del contenido de arcilla, el cual al aumentar provocó la disminución del ángulo de fricción interna. Además de que la acción del contenido de agua actuó como lubricante disminuyendo la fricción interpartículas.

Las magnitudes determinadas se encontraron en el rango planteado como típico para suelos de elevado contenido de arcilla, lo cual concordó con lo referido por Ortiz y Hernánz (1988) y Sánchez (1995).

En comparación con los resultados obtenidos por Rodríguez (1999) y Herrera (2001) en Vertisoles, las mag-

acted as lubricant, reducing the inter-particles friction.

The magnitudes determined were found in the rank posed as typical for soils with elevated clay content, which agreed to the referred by Ortiz and Hernánz (1988) and Sánchez (1995).

Compared to the results obtained by Rodríguez (1999) and Herrera (2001) in Vertisols, the magnitudes reached were superior to those found by these researches. However, these results agreed to the ones found by Mouazen (2002) in loamy-sandy soil.

**Young module (E).** The determination result of the behavior of this property after the multivariate regression analysis showed a close dependence in relation to the humidity and density phase of the soil, with a tendency to a non-linear reduction with the increment of the humidity content of the soil (table 2), the opposite happened when increased the density of the soil, that is, its magnitude had a non-linear increment with the subsequent increment of the apparent density with a regression coefficient  $R^2=97.92\%$  and  $R^2=99.25\%$  in the first two depth sampled horizons (table 2).

The tendencies showed, agreed to the ones found by Chancellor (1994), Mouazen and Neményi (1999), Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002), Hossne *et al.* (2003), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) and González (2011) for clayey soils, and with other nature. In the third depth horizon, was seen an inversely proportional line between Young module and the humidity phase, with a regression coefficient  $R^2=94.03\%$ . Likewise, the

nitudes alcanzadas fueron superiores a las encontradas por estos investigadores. Sin embargo, concordaron con los resultados obtenidos por Mouazen (2002) en suelo franco arenoso.

**Módulo de Young (E).** El resultado de la determinación del comportamiento de esta propiedad a partir del análisis de regresión multivariado mostró una estrecha dependencia con respecto al estado de humedad y densidad del suelo, tendiendo a disminuir de forma no lineal con el aumento del contenido de humedad del suelo (cuadro 2), ocurriendo lo contrario cuando se incrementó la densidad del suelo; es decir, su magnitud aumentó no linealmente con el consiguiente aumento de la densidad aparente, con un coeficiente de regresión  $R^2=97,92\%$  y  $R^2=99,25\%$  en los dos primeros horizontes de profundidad muestreados (cuadro 2).

Las tendencias mostradas coincidieron con las encontradas por Chancellor (1994), Mouazen y Neményi (1999), Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002), Hossne *et al.* (2003), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) y González (2011) tanto para suelos con textura arcillosa, como de otra naturaleza. En el tercer horizonte de profundidad se mostró una relación lineal e inversamente proporcional entre el módulo de Young y el estado de humedad, con un coeficiente de regresión  $R^2=94,03\%$ . De igual forma la relación entre el módulo de Young y la densidad aparente del suelo fue lineal pero directamente proporcional; es decir, sus valores aumentaron en la medida que el suelo se tornó más denso (cuadro 2).

La tendencia de disminución del módulo de Young se explica, porque al

relation between the Young module and the apparent density of the soil was linear but directly proportional, that is, their values increased at the time the soil became denser (table 2).

The reduction tendency of the Young module is explained because, when increasing the water content, this acted as a lubricant, allowing that the particles of the soil were recognized more easily from the empty spaces, propitiating the fluency of the material to a lower effort. Also, the increment of the humidity provoked a reduction of the rigidity and the resistance to the cut, because the volume of the solids reduced, and the attraction strength decreased among the particles of the soil. However, the magnitudes of the Young module were higher when the soil was more compact; due to on this phase there was a closer contact between the particles, increasing their rigidity, which increased the elasticity.

Comparing the behavior of the Young model (E) on each of the horizons, was observed that the maximum values (17 552 kPa) were obtained in the intermediate horizon (depth from 0.15 to 0.30 m), which presented the highest clay content and manifested its influence on the mechanical resistance of the soil (tables 1 and 2).

These results evidenced that the soil under research was a heavy weight difficult to work, due to the high resistance to the attraction, which mainly showed when worked in a dry phase, because on this phase were combined high values of cohesion and internal friction, which tribute the increment to the cut resistance of the



aumentar el contenido de agua esta actuó como lubricante, permitiendo que con mayor facilidad las partículas del suelo fueran reorganizadas entre los espacios vacíos, propiciando la fluencia del material a un menor esfuerzo cortante. Además de que el incremento de la humedad provocó una disminución de la rigidez y de la resistencia al corte, debido a que el volumen de los sólidos disminuyó y decreció la fuerza de atracción entre las partículas de suelo. Sin embargo, las magnitudes del módulo de Young fueron mayores cuando el suelo se encontraba más compacto, debido a que en este estado hubo un contacto más cercano entre sus partículas, aumentando su rigidez, lo que incrementó la elasticidad.

Comparando el comportamiento del módulo de Young (E) en cada uno de los horizontes, se observó que los máximos valores (17 552 kPa) se alcanzaron en el horizonte intermedio (Profundidad de 0,15 a 0,30 m), el cual presentó el mayor contenido de arcilla lo que puso de manifiesto la influencia de la misma en la resistencia mecánica del suelo (cuadros 1 y 2).

Estos resultados evidenciaron que el suelo objeto de estudio fue un suelo pesado de difícil laborabilidad dada la elevada resistencia a la tracción que ofreció sobre todo cuando se laboró en estado seco, pues en este estado se combinaron valores elevados de la cohesión y fricción interna los cuales tributaron al aumento de la resistencia al corte del suelo y por consiguiente al aumento de la resistencia a la tracción. De igual forma especial atención se debe prestar al laboreo del suelo, cuando este posee una humedad por encima del 36% pues la misma marca el límite de adheren-

soil, subsequently, the increment of the attraction resistance.

Likewise, special attention must be paid to the tillage of the soil, when its humidity be over 36%, since this marks the adherence limit of the soil to the surface of the tillage tool, that is, after it, the adherence value grows considerably, provoking the basement of the soil in the working areas of the tillage tools, affecting the quality of the work and the physical fertility of the soil.

At humidities over this value, decreases considerably the mechanic resistance of the soil, therefore, there is a great possibility that there would be problems on the mechanic traction means employed during tillage. The optimum humidity for the tillage of these soils is close to the plastic limit of it, that is, from 20 to 25% of humidity, because on this rank of humidity, the soil offers the lowest resistance to the tillage, due to it reaches the minimum values of the sum of the efforts product to the cut resistance of the soil and the slope on the surface of the tillage tool.

## Conclusions

The tendencies exhibited by the soil studied on each of the properties agreed to the ones obtained by other researchers in different types of soils, likewise agree to the properties in soils with clayey nature.

The behavior of the macrostructure properties of Vertisol, was conditioned by the humidity and density phase of it, reaching the highest mechanical resistance when the soil was dry and compact.

cia del suelo a la superficie de la herramienta de labranza, es decir a partir de esta el valor de la adherencia crece considerablemente provocando el embasamiento del suelo en los órganos de trabajo de los aperos de labranza, afectando la calidad de la labor y atentando contra la fertilidad física del suelo. A humedades por encima de este valor decrece considerablemente la resistencia mecánica del suelo por lo que existe una gran probabilidad de que surjan problemas de trafabilidad de los medios de tracción mecanizados empleados durante la labranza. Las humedades óptimas para el laboreo de estos suelos están cercanas al límite plástico del mismo, es decir de 20 a 25% de humedad, pues en este rango de humedad el suelo ofrece la menor resistencia al laboreo debido a que se alcanzan los valores mínimos de la sumatoria de los esfuerzos que surgen producto a la resistencia al corte del suelo y su deslizamiento sobre la superficie de la herramienta de labranza.

## Conclusiones

Las tendencias exhibidas por el suelo objeto de estudio en cada una de las propiedades estudiadas concordaron con las obtenidas por otros investigadores en diferentes tipos de suelos, igualmente concordaron las propiedades en suelos de naturaleza arcillosa.

El comportamiento de las propiedades macroestructurales del Vertisol objeto de estudio estuvo condicionado por el estado de humedad y densidad del mismo, alcanzando la mayor resistencia mecánica cuando el suelo estuvo seco y compacto.

The content of organic matter and clay present in the soil influenced directly on the behavior if the macrostructure properties of the soil studied.

The results obtained resulted of great interest for the producers and the decision-makers at the time of planning and carrying out tillage works, allow defining that the optimum humidity for the tillage of Vertisol was in the interval from 20 to 25%.

*End of english version*

---

---

El contenido de materia orgánica y arcilla presente en el suelo influyeron directamente en el comportamiento de las propiedades macroestructurales del suelo objeto de estudio.

Los resultados alcanzados resultaron de especial interés para los productores y tomadores de decisiones a la hora de planificar y realizar las operaciones de labranza, permitiendo definir que la humedad óptima para el laboreo del Vertisol en estudio se encontraba en el intervalo de 20 a 25%.

## Literatura citada

- Cairo, C. P y G Quintero. 1980. Suelos. Pueblo y Educación. Ciudad Habana. 367 p.
- Chancellor, W. J. 1994. Soil physical properties, S. K.: 21-254.
- Chuchman, A., R. Jacques y J. Olivet. 1993. Labranza vertical. Uruguay. Universidad de la República. 27 p.
- Duran, G. H. M. 2002. Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco. Terra Latinoamericana 20(3): 227-234.

- FAO. 1988. FAO-UNESCO: Soil map of the world, reviewed legend. Roma. Italia. 12 p.
- Fielke, J. 1999. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements whit soil. *J. Agric. Eng. Res.* 74: 91-101.
- Gitau, A. N., L.O. Gumbo y S. K. Mwea. 2008. Mechanical Behavior of a Hard-Setting Luvisol Soil as Influenced by Soil Water and Effective Confining Stress. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal.* X: 14.
- González, C.O. 2011. Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio. Departamento de Ingeniería Agrícola. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas: 124 p.
- Herrera, M. 2001. Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA). La Habana, Cuba, Universidad Agraria de La Habana: 65 p.
- Herrera, M. 2006. Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos. Departamento de Mecanización Agrícola. La Habana, Cuba, Universidad Agraria de La Habana: 109 p.
- Herrera, M., C. Iglesias, O. Gonzalez, E. López y Á. L. Sánchez. 2008. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 17(3): 31-37.
- Herrera, M., C. Iglesias, M. Rodriguez, A. García de La Figal, R. Delgado y M. Fernández. 2001. Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores. Parte I. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 10(3): 29-37.
- Hossne, A., J. Christopher, G. Paredes, E. Carvajal, J. Santaella, J. Malaver y A. Cova. 2003. Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Biagro* 15 (3): 173-182.
- Juárez, B.E. y Rico R.A. 1969. Mecánica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos. Revolucionaria. La Habana. 437 p.
- MINAGRI. 1999. Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. La Habana, Cuba, Instituto de Suelos: 35p.
- Mouazen, A.M. 2002. Mechanical behaviour of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading. *Journal of Terramechanics* 39: 115-126.
- Mouazen, A.M. y M. Neményi. 1999. Finite elements of subsoiler cutting in non homogeneous sandy loam soil. *Soil & Till. Res.(UK).* 39 (3): 115-126.
- Mouazen, A.M., H. Ramon y J. De Baerdemaeker. 2002. Effects of Bulk Density and Moisture Content on Selected Mechanical Properties of Sandy Loam Soil. *Biosystems Engineering* 83(2): 217-224.
- NC 10. 1998. Geotecnia. Preparación de las muestras de suelos.
- NC 59. 2000. Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos.
- Ortiz, C.J. y J.L. Hernández. 1988. Técnica de la Mecanización Agraria. Mudi-Prensa. 643 p.
- Pérez de Corcho, J.S., M. Herrera y C.E. Iglesias. 2004. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de suelos ferralíticos rojos en áreas de producción de piña. Sexta Conferencia Científica Internacional UNJCA, 2004, Uniyersidad de Ciego de Avila, Ciego de Avila, Cuba.
- Rodríguez, M. 1999. 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. Departamento de

- Mecanización Agrícola. Santa Clara, Cuba, Universidad Central de Las Villas: 100 p.
- Sánchez, I.A.L. 2011. Determinación de los parámetros de un ultrasol requeridos por el método de elementos distintos para la simulación del desgaste de los aperos de labranza. Departamento de ingeniería agrícola. San José de las Lajas, Universidad Central de Las Villas: 82 p.
- Sánchez, V.R. 1995. Dinámica y Mecánica de los Suelos. Agrotécnica (ESP). Madrid. 426 p.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. Washinton, DC, USDA-Natural Resources Conservation Service. 346.
- Sowers, G.B. y F.B. Sowers. 1979. Introducción a la mecánica de los suelos y cimentaciones. Pueblo y Educación. La Habana. 677 p.