

Valoración física comparativa del muestreador Uhland y el Proctor en un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela

Comparative physical evaluation of Uhland and Proctor samplers on a sandy savanna soil in the state of Monagas in Venezuela

Américo J. Hossne García*, Omar Guerra†*

RESUMEN

Es común la obtención de muestras de suelos agrícolas mediante el equipo Uhland. El índice crítico de compactación del suelo se establece con la prueba Proctor. El objetivo fue la comparación física del muestreador Uhland, con caída libre y forzada del martillo, con el aparato Proctor para valorar la alteración mecánica de la muestra. Se utilizaron los Proctor estándar y modificado, el Uhland a caída libre y forzada del martillo, un diseño estadístico completamente aleatorizado con diez repeticiones y cuatro tratamientos, Análisis de Varianza, Mínima Diferencia Significativa y regresión polinómica. Se concluyó que el Uhland produjo resultados similares al Proctor. La energía penetrante del Uhland resultó superior a la compactante del Proctor. La humedad del suelo influyó sobre la densidad aparente seca. La relación de solidez y la porosidad aerífera identificaron mejor el proceso.

ABSTRACT

It is common to obtain agricultural soil samples using the Uhland sampler. The critical index of soil compaction is obtained with the Proctor test. The objective of this work was to perform a physical comparison between the Uhland sampler, with free and forced fall of the hammer, and the Proctor apparatus to assess mechanical alterations of the sample. Standard and modified Proctor instruments were used, as well as the Uhland with free and forced hammer fall. A completely randomized statistical design with ten replicates and four treatments was performed along with the analysis of variance, Minimum Significant Difference and polynomial regression. It was concluded that Uhland and Proctor instruments produced similar results. The penetrating energy of the Uhland was higher than the compacting energy of the Proctor. Humidity in the soil had an influence of the apparent dry density. The solidity ratio of the soil and the air porosity were the parameters that best identified the compaction process for the Proctor and Uhland instruments.

INTRODUCCIÓN

La densidad aparente del suelo es una propiedad utilizada en gran parte en la agricultura, es una medida de la compactación del suelo que consiste en reducir la porosidad aerífera restringiendo la compresibilidad de los suelos o de aumentar la resistencia al cizalleo (Hough, 1969). Recientemente, la preocupación por la precisión en la determinación de la densidad aparente del suelo se ha requerido debido a la expansión de las tierras de regadío, tierras cultivadas bajo labranza cero, la agricultura de precisión y la preocupación por la compactación del suelo. La toma de muestras mediante el equipo Uhland (típicamente utilizado para la determinación de la densidad aparente seca y húmeda), fue introducida por Uhland (1949) quien utilizó anillos de aluminio de 76.2 mm de diámetro y de 76.2 mm de altura, lo patentó de acuerdo a lo descrito por Yoder (1936) modificándolo y mejorándolo. De acuerdo a McKeague (1978) el muestreador Uhland ha recibido aceptabilidad total y ha sido considerado como un muestreador que proporciona muestras imperturbadas (Perfect, Sukop & Haszler, 2002; Folegatti, Brasil & Blanco, 2001; Barrios & Florentino, 2001; Wagner, Rincones, Medina y Mujica, 1995; Bravo & Andreu, 1995; Hossne, 2001).

Recibido: 17 de noviembre de 2012

Aceptado: 23 de mayo de 2013

Palabras clave:

Energía; compactación relativa; solidez; porosidad.

Keywords:

Energy; relative compaction; solidity; porosity.

*Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela. Apartado Postal 414, Maturín, estado Monagas, Venezuela. Zona 6201-A. Correo electrónico: americohossnegarcia@gmail.com/
americohossne@cantv.net

La falta de estandarización de algunos factores básicos, como el tamaño y la forma de las muestras, la fuerza de penetración y la velocidad aplicada en la inserción, la velocidad de extracción de la muestra, y el estado de humedad del suelo durante el muestreo, pueden ser fuentes de variaciones que influyen en las diferencias en los valores de la densidad aparente seca y húmeda determinadas con el Uhland. De acuerdo a Hvorslev (1949), Siddique y Clayton (1995) y Siddique, Farooq & Clayton, (2000), el grado de perturbación de los muestreadores de tubos cilíndricos depende de las dimensiones del muestreador. Folegatti *et al.*, (2001); Vanremortel & Shields, (1993); Silva, Reinert & Reinert, (2000); Lima, Silva, Imhoff & Neves Junior (2005), reportaron que las técnicas utilizadas con diferentes muestreadores pueden influir en los valores de las densidades aparentes.

Es imposible establecer normas en cada etapa de muestreo en el campo, estos errores son difíciles de cuantificar, pero hay que considerar una gran importancia sobre todo cuando se comparan los valores de densidad aparente seca (Lima *et al.*, 2005). Baver (1972) manifestó que el tubo Bradfield produce un efecto muy ligero sobre la estructura del suelo causado por el martillo y que al forzar el instrumento en el suelo causa fragmentación o comprime el suelo. McIntyre and Loveday (1974) notaron que el martilleo con una porra de goma es satisfactoria para el muestreo. Este caso es particular cuando toma muestras con cilindros de longitud corta y la colección de una muestra de suelo disturbado no es crítico. Constantini (1995) estableció que en el muestreo se deben utilizar anillos de cilindros cortos (5 mm – 15 mm) que pueden ser manualmente introducidos. Siguiendo las guías de Raper & Erbach (1985), los muestreadores son empujados en los suelos sueltos y martillados en los suelos más compactos. Lugo (1995) al comparando en el suelo objeto de estudio: el método del hoyo con arena, hoyo con agua y el Uhland con martillo de 5 kg; reportó en sus conclusiones, que el uso del Uhland presentó disminución de la densidad aparente al aumentar la humedad, estadísticamente el método del hoyo con agua y el Uhland dieron resultados similares; pero éstos presentaron diferencias estadísticas con el método del hoyo con arena, emanando este último una densidad aparente menor: hoyo con arena $13.34 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, hoyo con agua $14.72 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, Uhland-A $14.52 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ y Uhland-B $14.72 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$; no concluyó cual fue el mejor; es más, utilizó dos equipos Uhland diferentes y encontró diferencias entre ellos.

El Uhland en su proceso de penetración contempla una alta energía sobre el suelo la cual se aúna a la injerencia de la humedad y el uso frecuente del Uhland a caída forzada del martillo. El ensayo de compactación Proctor, Ralph R. Proctor, 1933, es uno de los más

importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. Consiste en compactar con el empleo de un martillo una porción de suelo en un cilindro con volumen conocido, haciéndose variar la humedad para obtener el punto de compactación máxima en el cual se obtiene la humedad óptima de compactación. El valor de la densidad aparente seca en los valores óptimos de la elástica se le considera generalmente como una densidad máxima o crítica (Wagner, Ambe & Ding, 1994; Ibrahim, Persuad, Zobel & Hass, 2010; Lal & Shukla, 2004; USDA, 2004; Proctor, 2003; ASTM, 2009). Los instrumentos Uhland y Proctor utilizan un mecanismo de golpeo del suelo, el primero penetrando y el segundo densificando la muestra de suelo. El objetivo de este trabajo fue la comparación física del muestreador Uhland, a caída libre y forzada del martillo, con el aparato Proctor para valorar la alteración mecánica de la muestra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en un pedón franco arenoso de sabana en Jusepín (figura 1), estado Monagas, situado a 147 m s.n.m. y coordenadas geográficas de $9^{\circ} 41' 33''$ latitud Norte y $63^{\circ} 23'$ de longitud Oeste; con una precipitación anual de 1 127 mm y una temperatura media anual de 27.5°C . Bajo una vegetación típica de sabana: Chaparro (Dilleniaceae, *Curtella americana*), Meray (*Anacardium occidentale*), Paja peluda (*Trachypogon* y *Axonopus* sp.), Manteco (Malpighiaceae, *Byrsonima crassifolia*), Mastranto (Lamiaceae, *Hyptis suaveolens*), Gramíneas, Ciperáceas, etcétera. El área de trabajo seleccionado del suelo objeto de estudio, pertenece a las condiciones de un Ultisol de sabana del grupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertermic. Estos suelos son utilizados en la explotación de muchos rubros, con labores de encalado y fertilización, como maíz, sorgo y pastizales.



Figura 1. Área de muestreo en los puntos Norte: 1078422,0; 1078979,0; 1079445,0; 1079698,0; 1079821,0; 1079772,0. Este: 451257,0; 451018,0; 451394,0; 451555; 451486,0; 451276,0 respectivamente.

El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), donde se practicó una estratificación del suelo, en el cual el estrato que corresponde a la Unidad Maturín está identificado con textura superficial franco arenosa. La recolección de las muestras y ubicación de los pozos se realizó apoyado en el de muestreo aleatorio simple. En cada una de las áreas de muestreo se realizó un muestreo de las profundidades comprendidas entre 0.00 m - 0.30 m, tomando muestras al azar. Se perforaron 10 calicatas genéticas para la recolección de las muestras con el uso de los Uhland A y B. Se tomaron diez muestras por calicata, por Uhland, para un total de veinte muestras por calicata. El material se desmenuzó: una parte fue para determinar el perfil fisicoquímico (textura y materia orgánica), y el restante se pasó por el tamiz número 10 (2 mm) y se utilizó para la prueba de compactación Proctor. La tabla 1 muestra los componentes físicos con sus respectivas dimensiones de presencia y tamaños.

Tabla 1.
Componentes físicos en porcentajes y diámetro de las partículas en milímetros del suelo de sabana del estado Monagas, Venezuela.

Profundidad cm	Componentes edáficos %							
	Arena muy gruesa	Arena	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla caolinita	Materia orgánica
0 - 15	0.22	2.91	12.18	39.13	13.93	19.43	12.2	0.38
15 - 30	0.52	2.23	11.07	41.09	10.51	18.38	16.2	0.27
30 - 45	0.30	2.46	10.30	34.56	12.58	21.6	18.2	0.20
45 - 60	0.33	2.64	10.84	30.69	14.63	20.67	20.2	0.13
Diámetro mm	1.41	0.72	0.37	0.151	0.07	0.053	0.024	

Diversos estudios realizados en Ultisoles y Oxisoles por García y Herrera (1980), Martínez (1986), Rodolfo (1987), Vargas & López (1983) y Zapata (1986) encontraron a la caolinita y al cuarzo como silicatos más abundantes en la fracción arcillosa de los suelos. Smith (1990) encontró que los suelos de sabana del estado Monagas tuvieron un 76.5% de arena (60% - 90% de cuarzo, inclusiones de mineral de hierro con presencia de muscovita y feldespatos), 10.1% de limo (100% de cuarzo), 13.04% de arcilla (7.18 Å, 3.57 Å y 2.37 Å, cuarzo de 10% - 20% y 5% de pirrofilita) y 1.09 % de materia orgánica; contienen como bases cambiables: 0.41 de Ca, 0.51 de Mg, 0.12 de K y 0.004 de Na todos en me/100 g de suelo; un 5.6 me/100 g de capacidad intercambiable catiónica; y un pH de 4.6. Smith (1990) reportó entre un 70% - 80% de arcillas caoliniticas y de un 5% - 10% de feldespatos.

El muestreador Uhland es un instrumento utilizado para la obtención de muestras de suelo para estudios múltiples. En el proceso de adquisición de muestra, el cilindro es golpeado para su penetración con una alta energía calculada con la ecuación 12; acarreado esto, perturbaciones mecánicas que podrían producir cambios en la densidad aparente seca en función de la humedad del suelo; si la humedad se encuentra por debajo del estado friable cercano al punto de marchitez, la densidad aparente seca se espera que disminuya; si la humedad se encuentra cerca a la capacidad de campo, la densidad aparente seca se espera aumente (Hossne, Mayorca, Salazar, Subero & Zasillo, 2009; Hossne, 2008; Hossne, Paredes, Carvajal, Santaella & Malavar, 2011). El instrumento Uhland A consistió en utilizar el

Uhland en el área de muestreo con caída libre del martillo recorriendo la altura de 86.5 cm las veces necesarias para que el cilindro penetrara completamente, con un total de diez repeticiones aleatorizadas. El instrumento Uhland B consistió en utilizar el Uhland en el área de muestreo, con variaciones de humedad, con caída forzada del martillo; es decir, el martillo era llevado a la posición inicial de la barra e impulsado manualmente hacia abajo las veces necesarias para que el cilindro penetrara totalmente, con un total de diez repeticiones aleatorizadas. Cuando se requiere determinar la densidad aparente seca *in situ*; los cilindros, identificados y con volumen interno preliminarmente medido, con las muestras de suelo son sometidas a la estufa para secado a 110 °C por 24 h. Con esta información se hicieron los cálculos de la masa de suelo húmedo, la masa de suelo seco, la humedad, la densidad aparente seca y otras variables.

El término compactación se utiliza en la descripción del proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos. Se entiende por compactación la aplicación mecánica de cierta energía, o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para lograr una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo. Al obtenerse un mejor acomodo de las partículas sólidas y la expulsión de aire que contiene el suelo, se produce un aumento de su peso volumétrico o específico. El incremento de la densidad se obtiene por medio de la disminución de la cantidad de aire que se encuentra en los espacios vacíos que existen en el material, manteniendo el contenido de humedad relativamente constante. En mecánica de suelos, el ensayo de compactación Proctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de

calidad de la compactación de un terreno. A través de él es posible determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico. Existen dos tipos de ensayo Proctor: el ensayo Proctor estándar y el ensayo Proctor modificado. La diferencia entre ambos estriba en la distinta energía utilizada (ecuación 1), debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Proctor modificado. Ambos ensayos se deben a R. Proctor (1933), y determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos en unas determinadas condiciones de humedad. El ensayo consiste en compactar tres porciones de suelo, por separado, en un cilindro con volumen conocido, haciéndose variar la humedad para obtener el punto de compactación máxima en el cual se obtiene la humedad óptima de compactación. El contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo de un suelo, también varían con la energía de compactación; cuando ésta se aumenta, se obtienen mayores pesos volumétricos secos máximos con humedades óptimas menores. Los instrumentos Proctor fueron utilizados cumpliendo con las normas establecidas con las muestras de suelo recogidas procesando diez muestras con un valor de humedad previamente determinada variándola de 3.5% a 15.5% en base seca con un aumento aproximado de 1.5% de humedad. Se necesitaron casi 4.53 kg de suelo del sitio de trabajo para realizar cada prueba de suelo.

Tanto los instrumentos Uhland como los Proctor son utilizados con procesos de golpes, en este trabajo se emplearon para comparar los efectos compactantes en las muestras de suelo para evaluar el Uhland en la estimación de la densidad aparente seca. Metodológicamente se utilizaron los procedimientos de laboratorio de mecánica de suelos; las mediciones de la densidad aparente seca y los respectivos contenidos de humedad de las muestras al usar el Uhland y los procesos Proctor de acuerdo a AASHTO: T 99-61, estándar, (ASTM D 698-644T) y AASHTO: T-180, modificado, (ASTM D 1557-64T). Se utilizó el Uhland, a caída libre (A) y forzada (B) con martillo de 4.29 kg, altura de 855 mm y con cilindro saca muestra de 71 mm de altura, 82.6 mm de diámetro y grosor de 0.25 mm. En los hallazgos de Rahman & Siddique (2010); Caquot & Kerisel (1969); McIntyre & Loveday (1974); Constantini (1995), evidenciaron que la perturbación debida al muestreo con cilindros, fueron de importancia la relación de volumen y el ángulo de corte fuera del borde. Las expresiones

algebraicas siguientes presentan la forma como se calcularon: la energía compactante (E_c), la compactación relativa (C_R), la relación de solidez o solidez (i_s), la relación de solidez máxima ($i_{s,max}$), la porosidad aerífera (E_a), volumen interno del cilindro (V_T), Volumen de la muestra seca en la estufa (V_S), velocidad de caída del martillo (v), energía cinética del martillo (T) y la curva de saturación-porosidad-aerífera; en donde: diámetro externo (De), diámetro interno (Di), número de golpes con el martillo (N), número de capas (NC), altura de caída del martillo (Ac), masa del martillo (W), número de golpes (N), humedad óptima (w), densidad aparente seca máxima ($\rho_{s,max}$) calculada por optimización de las elásticas estadísticamente obtenidas de las propiedades del suelo objeto de estudio utilizando diferenciación, densidad aparente seca (ρ_s), velocidad inicial (v_0) (se consideró tener un valor de cero para el Uhland a caída libre del martillo, e igual a valor obtenida de v para el Uhland forzado), aceleración de gravedad (g), porcentaje de saturación (S), densidad del agua (ρ_w), gravedad específica (G), tiempo de caída del martillo compactador o de penetración (t_c), tiempo total del proceso de compactación o penetración t_T :

$$E_c = (N \cdot NC \cdot W \cdot Ac) / V_T \quad (1)$$

$$C_R = (\rho_s) / \rho_{s,max} \cdot 100 \quad (2)$$

$$i_s = V_S / V_T \text{ (Hossne, 2001)} \quad (3)$$

$$i_{s,max} = \rho_{s,max} / \rho_p \text{ (Hossne, 2001)} \quad (4)$$

$$E_a = 1 - i_s (1 + w \cdot G) \quad (5)$$

$$V_T = (L \cdot \pi / 4) (De - Di) \text{ (Caquot \& Kerisel, 1969)} \quad (6)$$

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot Ac} \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot W \cdot v^2 \quad (8)$$

$$\rho_s = \frac{G \cdot \rho_w}{1 + w \cdot G} \left(1 - \frac{S}{100}\right) \text{ Curva-saturación-porosidad-aire} \quad (9)$$

$$t_c = Ac / v \quad (10)$$

$$t_T = t_c \cdot NC \cdot N \cdot 2 \quad (11)$$

La figura 2 muestra esquemáticamente el saca muestras tipo Uhland y el molde Proctor, empleados en la obtención de muestras de suelo y el índice crítico de compactación de un suelo respectivamente. El Proctor estándar utiliza tres capas, el modificado cinco capas y al Uhland se le consideró una capa.

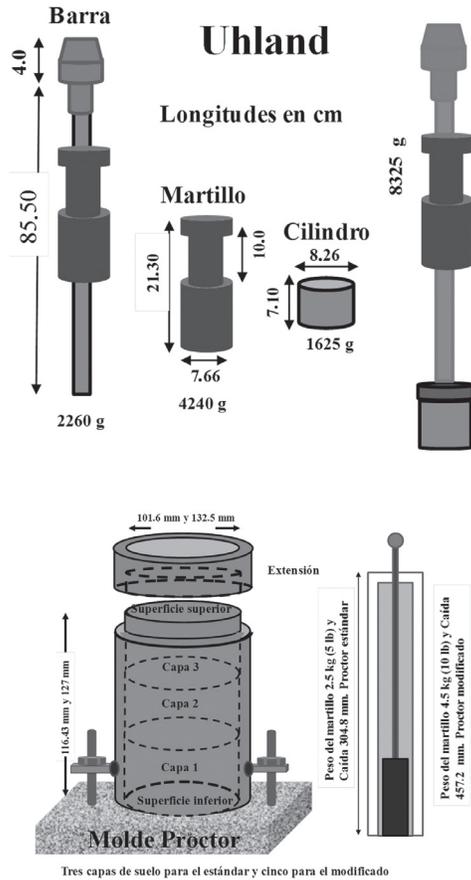


Figura 2. El muestreador tipo Uhland y el molde Proctor estándar y modificado, con sus respectivas características, utilizados en la investigación.

El diseño estadístico utilizado fue completamente aleatorizado con diez repeticiones y cuatro tratamientos conformados por el Proctor estándar, Proctor modificado, Uhland a caída libre y Uhland a caída forzada. Se realizó un Análisis de Varianza para las variables densidad aparente seca, compactación relativa, relación de solidez y porosidad aerífera óptima, y las diferencias entre instrumentos se detectaron mediante la prueba de Mínima Diferencia Significativa (MDS). Se realizó un análisis de regresión polinómica entre densidad seca *versus* humedad en base seca. Todas las inferencias estadísticas se realizaron al 5% de significación.

RESULTADOS

La energía de caída del martillo de los Proctor es utilizada para compactar las muestras, y la empleada por el Uhland (ecuación 12), para determinar la energía de penetración (EP) del cilindro saca muestras por el trabajo (T) realizado por la masa del martillo del Uhland al caer de su altura y golpear el cilindro muestreador, con la velocidad alcanzada, a través de su superficie circunferencial o grosor (e), introduciéndolo en el suelo hasta su altura (h).

$$EP = T / (e \cdot h) \quad (12)$$

En la tabla 2 se presentan las características y las medias de resultados logrados de los aparatos Proctor y Uhland. Se utilizó una densidad de las partículas de $25.81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ (Hossne, 2001).

Tabla 2.

Algunas características mecánicas en el uso de los instrumentos utilizados.

Instrumentos	W kg	N	NC	w %	Ac m	V _T m ³	EC MN·m/m ³	EP MN·m/m ³	
AASHTO:T 99	2.49	25	3	10.78	0.3048	0.000944	0.59152		
AASHTO:T 180	4.54	25	5	8.99	0.4572	0.000944	2.69631		
UHLAND A	4.29	18	1	4.72	0.855	0.000348		15.624	
UHLAND B	4.29	9	1	5.68	0.855	0.000348		31.248	
	ρ_{Smax} kN·m ⁻³	ρ_s kN·m ⁻³	CR %	i_{Smax} %	Ea %	v m/s	T Nm	t _c s	t _T s
AASHTO:T 99	18.422	13.266	72.01	71.38	8.39	2.445	14.891	0.1246	18.6960
AASHTO:T 180	19.901	13.266	66.66	77.11	4.66	2.995	40.725	0.1527	38.1630
UHLAND A		13.266	72.01	51.40	42.22	4.096	71.965	0.2088	7.5151
UHLAND B		13.140	71.33	50.91	41.48	5.792	143.930	0.1476	2.6569

La figura 3 presenta las comparaciones de los cuatro instrumentos en base al número de golpes (N), la masa del martillo (W), la compactación relativa (C_R), la relación de solidez óptima (i_{Smax}), la porosidad aerífera (Ea), el esfuerzo o energía compactante (E_C) y penetrante (EP). Las humedades óptimas de compactación son mostradas.

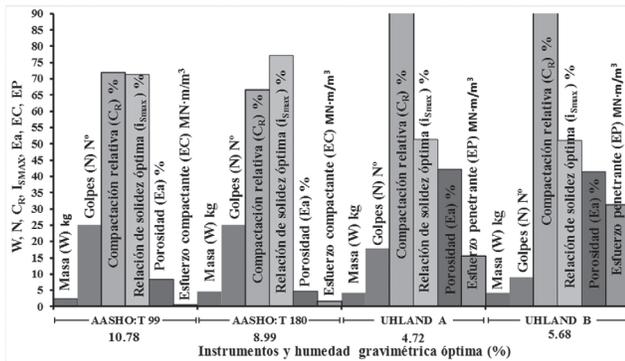


Figura 3. Comparación de seis propiedades ingenieriles de los instrumentos AASHTO Estándar, AASHTO Modificado, Uhland libre de 4.29 kg y Uhland forzado de 4.29 kg respectivamente.

La figura 4 expone los resultados al utilizar los Uhland A y B, incorporando la curva-saturación-porosidad-aire, la cual representa el mejor índice comparativo de compactación, para un 75% de saturación.

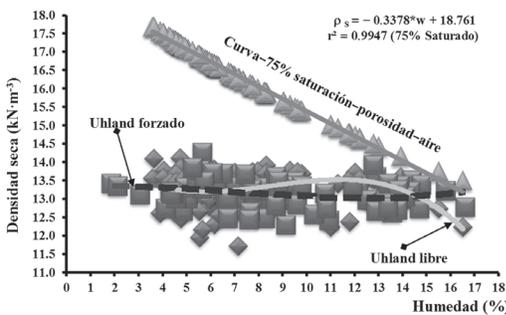


Figura 4. Densidad seca versus humedad en base seca. Muestras procesadas con el equipo Uhland. Muestreo con el Uhland A a caída libre (\blacklozenge) (-) y muestreo con el Uhland B (\blacksquare) (---) a caída forzada.

La figura 5 presenta el comportamiento de la densidad seca con respecto a la humedad obtenida con el uso del Proctor. Al analizar con la regresión múltiple la función $\rho_s = f(w, w^2)$ con respecto al instrumento Proctor estándar produjo una ecuación de regresión $\rho_s = 10.801 + 1.521 \cdot w - 0.076 \cdot w^2$ para un $R^2 = 0.95$ y una significancia de 0.000 para todos los términos del polinomio; produciendo un valor óptimo de 10.14 % de humedad compactante y una densidad seca óptima de 18.51 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$. La regresión múltiple para la función $\rho_s = f(w, w^2)$ con respecto al instrumento Proctor modificado produjo una ecuación de

regresión $\rho_s = 13.974 + 1.319 \cdot w - 0.073 \cdot w^2$ para un $R^2 = 0.98$ y una significancia de 0.000 para todos los términos del polinomio; generando un valor óptimo de 9.034 % de humedad compactante y una densidad seca óptima de 19.93 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

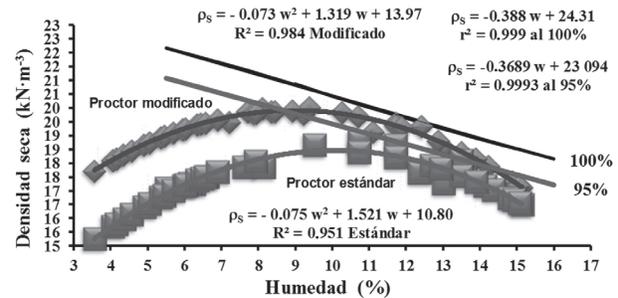


Figura 5. Densidad seca versus humedad en base seca obtenidas con el uso del aparato Proctor estándar y modificado.

La tabla 3 muestra los resultados del Análisis de Varianza (Andeva), en donde la porosidad aerífera fue la única que presentó significancia con respecto a la humedad, aunque ésta fue baja. La compactación relativa no mostró significancia con respecto a instrumento y humedad. La tabla 4 presenta la prueba de la MDS, con la humedad como covariable y las variables dependientes: densidad seca, compactación relativa, porosidad aerífera y relación de solidez.

Tabla 3.

Análisis de Varianza para la compactación relativa (C_R), densidad seca (ρ_s), la porosidad aerífera (Ea) y la relación de solidez (i_s) ajustada para los Instrumentos: Proctor Estándar (1), Proctor Modificado (2), Uhland A caída libre (3) y Uhland B caída forzada (4) en un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela.

Compactación Relativa (C_R) %					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Instrumento	3	55.328	18.4426	2.28	0.0962
Humedad	1	3.700	3.7000	0.46	0.5031
Error	35	282.837	8.0811		
Media	94.248				
CV	3.02				
Densidad Seca (ρ_s) $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$					
Instrumento	3	251.217	83.7389	316.30	0.0000
Humedad	1	0.136	0.1356	0.51	0.4789
Error	35	9.266	0.2647		
Media	15.664				
CV	3.28				
Porosidad Aerífera (Ea) %					
Instrumento	3	3939.60	1313.20	314.02	0.0000
Humedad	1	17.65	17.65	4.22	0.0474
Error	35	146.37	4.18		
Media	37.967				
CV	5.39				
Relación de Solidez (i_s) %					
Instrumento	3	3771.24	1257.08	316.33	0.0000
Humedad	1	2.04	2.04	0.51	0.4785
Error	35	139.09	3.97		
Media	60.689				
CV	3.28				

Tabla 4.

Promedios para la densidad seca, compactación relativa, porosidad aerífera y relación de solidez de un suelo de sabana del estado Monagas, Venezuela. Los instrumentos fueron: Proctor estándar (1), Proctor modificado (2), Uhland a caída libre (3), y Uhland a caída forzada (4).

Instrumento	Densidad Seca (kN·m ⁻³)		Compactación Relativa (%)		Porosidad Aerífera (%)		Relación de Solidez (%)	
	Media	G	Media	G	Media	G	Media	G
1	17.226	B	93.653	AB	31.772	B	66.742	B
2	18.998	A	96.156	A	24.773	C	73.606	A
3	13.303	C	94.173	AB	47.287	A	51.543	C
4	13.128	C	93.010	B	48.038	A	50.863	C

Prueba de MDS ($p \leq 0.05$). Análisis de varianza lineal y AOC general para instrumentos con variables dependientes: densidad seca, compactación relativa, porosidad aerífera y relación de solidez. La Humedad como covariable. Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes. Los instrumentos fueron altamente significativos con respecto a la humedad, pero la variable dependiente porosidad aerífera fue la única significativa con respecto a la humedad.

Valor crítico de T 2.030: Prueba de 2 colas para 39 gl valor crítico = 2.0231 en tabla.

DISCUSIÓN

En la tabla 2 en la columna de los i_{Smax} se observa, que el grado de solidez mayor se obtuvo con el Proctor modificado, para los Uhland fue menor en el orden del 50% producto de las bajas humedades, indicando que los Uhland producen alteraciones de la estructura de la muestra, como había de esperarse. La disminución de la densidad seca obtenida con el Uhland B, fue producto del golpeteo a bajas humedades. Las humedades registradas *in situ* durante el muestreo con el Uhland se encontraron por debajo del índice de marchitez del suelo objeto de estudio. Según Chan (2002) la determinación eficiente de la densidad aparente seca del suelo con el uso de cilindros muestreadores depende de la compresibilidad y desmenuzamiento del suelo, que se ven afectados por el tamaño de la muestra y el contenido de agua del suelo; por otra parte, de acuerdo a Lima *et al.*, (2005); Méndez, Medina, Merazo & Fendel, (1996); Lugo (1995b); Jamison & Weaver (1952) que al aumentar la humedad el suelo puede ser fácilmente compactado dentro del cilindro muestreador alterando la calidad de la muestra. La disminución de la densidad aparente seca producto de la fragmentación causada por el martilleo a bajas humedades. Astudillo (1981) evaluó la energía de compactación en la aplicación del instrumento Proctor encontrando resultados de 0.5866 MNm/m³ a 2.9352 MNm/m³, ajustados a los obtenidos en el trabajo. Baver (1972) expresó que cuando un suelo está demasiado seco o húmedo, una muestra que representa la estructura normal se debe considerar una excepción más que la regla. Hubo un mayor consumo

de energía en el uso del Uhland posiblemente debido a la altura de caída, masa del martillo y una superficie mucho menor. La velocidad de caída del martillo fue prácticamente el doble para los Uhland, que pudo haber causado disturbación del suelo, dependiendo de la humedad y producto del ángulo de fricción suelo-metal; al respecto Stafford & Tanner (1983) determinaron que el ángulo de fricción aumenta logarítmicamente en amplios rangos de velocidad y contenido de humedad. Los valores de las densidades óptimas de los Proctor fueron mayores que los obtenidos con los Uhland. Se puede notar que el volumen interno de los cilindros Proctor fueron aproximadamente igual al triple del volumen del Uhland. Esto podría revelar que los efectos dinámicos del martillo fueron superiores en el cilindro muestreador del Uhland. Numerosos investigadores argumentan que el volumen específico ($1/i_s$) y compactación relativa, pueden ser mejores índices de compactación del suelo que la densidad aparente y porosidad (Soane, Blackwell, Dickson & Painter, 1981). La relación de vacíos también se ha propuesto como un índice de compactación del suelo (Hartge & Sommer, 1979), la cual está conectada con la relación de solidez.

La figura 3 presenta las comparaciones de los cuatro instrumentos en base al número de golpes, la masa del martillo, la compactación relativa, la relación de solidez óptima, la porosidad aerífera y el esfuerzo o energía compactante y penetrante. Las humedades óptimas de compactación son mostradas. Se observa que la mayor porosidad aerífera se produjo con el martillo de 4.29 kg del Uhland, posiblemente producto del efecto vibratorio y las bajas humedades que causaron fragmentación o desagregación física. El mayor contenido de aire de las muestras fue observado en el Uhland A y el menor en las muestras procesadas con el Proctor modificado. La energía de penetración fue más alta en el uso de los Uhland a caída forzada del martillo, prácticamente el doble. Cuanto más seco esté el suelo, más resistente es a la compactación. En un estado saturado de agua los vacíos entre las partículas están parcialmente llenos de agua, creando una cohesión aparente que los une. Suelos granulares con arenas finas y limos tienen poca o ninguna fuerza cohesiva cuando la muestra está seca y el suelo se desmenuza fácilmente (Multiquip INC, 2011). De acuerdo a Mentler, Mayer, Strauß & Blumm, (2004) a vibraciones altas, ocurren hondas de alta amplitud que causan disrupción acelerada de las partículas de suelo.

La figura 4 presenta los resultados al utilizar los Uhland A y B, incorporando la curva-saturación-porosidad-aire, la cual representa el mejor índice comparativo de compactación, para un 75% de saturación.

Se observa la gran variabilidad de los datos para ambos Uhland con un coeficiente de regresión demasiado bajo. Se nota poca diferencia a bajos contenido de humedad. Estas informaciones, para el suelo objeto de estudio, son normalmente alcanzadas; lo cual, sobre todo, axioma principalmente la gran variación de la humedad del suelo durante el muestreo; asociándose, por supuesto el efecto vibratorio y el ángulo de fricción suelo-metal del muestreador a bajas humedades en donde se contempló una disminución de la densidad seca; para el Uhland A aumentó al acrecentar la humedad entre 10% y 13.5% y para el Uhland B disminuyó. Esto estuvo en el rango de la capacidad de campo y el límite plástico del suelo objeto de estudio. La capacidad de campo del suelo se encuentra entre 11% y 13%. Espinoza (1970) determinó la capacidad de campo para el suelo Ultisol de sabana, encontrando: 11.70% (0.0 m – 0.2 m), 13.49% (0.2 m – 0.5 m), 16.89 (0.5 m – 1.0 m) y 19.48 % (1.0 m – 3.50 m) y entre 0.0 m – 0.5 m de 12.6%; con un promedio total de 15.39%, para Fermín (1971) fue de 12.8 % entre 0.0 m y 0.50 m, para Mata (1992) fue de 11.7% entre 0.0 m y 0.70 m y para Salazar (1982) de 12.6 % entre 0.0 m y 0.60 m. Hossne & Salazar (2004) obtuvieron para este suelo un límite plástico promedio de 13.7%. El punto de marchitez encontrado por Gaspar (1983) fue de 6.19% y para Fermín (1971) de 5.53%. Simalenga & Have (1992); Constantini (1995) concluyeron como criterio de uso para un área semiárida, que el suelo puede ser laborado cuando el contenido de humedad se encontraba por debajo del 95% de la capacidad de campo. Hossne (2008) reportó que el índice de friabilidad del suelo objeto de estudio se ubicó entre 7.63% y 9.52%, y que la franja friable para el suelo estudiado produjo respectivamente un valor de 0.59 de la humedad correspondiente al límite plástico inferior (w_{pl}); es decir, $0.59 \cdot w_{pl}$. La diversidad de los resultados mostrados por los estadísticos con muy baja correlación podría ser un índice de la variabilidad producida por los Uhland producto de las variaciones de la humedad; es decir, $\rho_s = f(w)$ para los Uhland. Los resultados observados entraron en los rangos esperados. Según Turnbull & Foster (1957), trabajando con suelos fino arenosos caoliníticos encontraron que a bajos contenidos de humedad, la densidad seca disminuyó o permaneció más o menos constante, esto se observa en la figura 4; también, se percibe que la disminución de la ρ_s a bajas humedades por debajo del punto de marchitez (5.5% a 6.2%) se reflejó lo ya argumentado por Faure (1981) que la compactación de un suelo rico en caolinita, cuando se aumenta el nivel de energía de compactación, la mezcla es más compactada. Rogers & Carter (1987); Sojka, Busscher &

Lehrsh, (2001); Zwarich & Shaykewich (1969); Hvorslev (1949) y McIntyre (1974) encontraron la influencia compactante del peso del martillo cuando el muestreador Uhland se utilizó para obtener muestras. Lo expresado por estos investigadores de la disminución de la densidad aparente a bajas humedades fue producto de la fricción suelo-metal y el efecto vibratorio del Uhland por el martilleo.

En la figura 5 se observa que la humedad óptima de compactación que se obtuvo para el aparato Proctor modificado fue menor producto del martillo de 4.54 kg, en cambio el Proctor estándar usa uno de 2.49 kg. Esto último muestra la influencia compactante del peso del martillo, como se mostró con el Uhland. Karafiath & Nowatzki (1978) expusieron que los campos sujetos a compactación a diferentes humedades por los equipos ingenieriles civiles, mostraron una cercana similitud con los resultados producidos por la prueba Proctor, con algunas variaciones en los valores óptimos del contenido de humedad dependiendo de la tensión de compactación aplicada.

La tabla 3 muestra los resultados del Andeva y la tabla 4 presenta la prueba de la MDS, con la humedad como covariable y las variables dependientes: densidad seca, compactación relativa, porosidad aerífera y relación de solidez. Con respecto a la densidad aparente seca para los instrumentos 3 y 4 no hubo diferencia significativa, y los instrumentos 1 y 2 tuvieron diferencia significativa con el mayor valor para el instrumento 2. Para la compactación relativa el mayor valor fue para el instrumento 2 sin diferencia significativa para todos los instrumentos. Acerca de la porosidad aerífera, el mayor valor lo proporcionaron los instrumentos 3 y 4 sin diferencia significativa, los instrumentos 1 y 2 con diferencia significativas fueron menores. Con respecto a la relación de solidez el instrumento 2 proporcionó el mayor valor secundándole el instrumento 1 con diferencia significativa. La prueba de la mínima diferencia significativa ($p \leq 0.05$) de los coeficientes de variación (CV) para los cuatro instrumentos al evaluar la densidad seca, compactación relativa, porosidad aerífera y relación de solidez, produjo para los instrumentos: el primero 0.0317 (AB), para el segundo 0.0436 (B), para el tercero 0.0194 (A) y para el cuarto 0.0169 (A); con la misma tendencia para los parámetros evaluados. No hubo diferencia significativa entre los instrumentos 1, 3 y 4; pero si con respecto al instrumento 2, en donde se presentó la mayor variación, que hubo de esperarse.

CONCLUSIONES

1. Los efectos de compactación del muestreador Uhland y el aparato Proctor dieron respuestas comparables bajo rangos de humedades de compactación característicos para estos suelos. El Uhland perturba la muestra variando la densidad aparente, por lo tanto es conveniente emplear la saca muestras tipo Uhland solo en caída libre del martillo y condiciones apropiadas del cilindro muestreador.
2. Las humedades por debajo del índice de marchitez durante el muestreo con el Uhland provocaron una disminución de la densidad aparente seca producto de la fragmentación por el martilleo y el efecto vibratorio. Esto indica que el Uhland produjo variaciones estructurales en función de la humedad.
3. Las energías de los muestreadores Uhland fueron muy altas al compararlas con las de los instrumentos Proctor. La relación de solidez y la porosidad aerífera fueron los parámetros que mejor identificaron el proceso de compactación tanto para el Proctor como para el Uhland.
4. Se recomienda un estudio en donde se evalúe el tamaño del cilindro, la humedad del suelo, masa del martillo, altura de caída y forma de la caída. Esto es sugerido fundándose en que el muestreador Uhland es un instrumento sencillo, económico y fácil de utilizar. Por inferencia del empleo del Uhland, los suelos de sabana de acuerdo a su textura son fácilmente perturbados por los procesos vibratorios lo cual expeditamente se podría hacer extrapolación de los efectos de los aperos agrícolas, el pisoteo y la gota de la lluvia.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente por el financiamiento de esta investigación y al Profesor M. Sc. Jesús Méndez Natera por su contribución en el área estadística.

REFERENCIAS

- Astudillo, A. (1981). *Metodología para Inferir el grado de compactación de un suelo agrícola*. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola, Campo Los Guaritos: Maturín, Estado Monagas, Venezuela.
- ASTM (2009). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort 12 400 ft-lbf/ft³ (600 kNm/m³) ASTM D698. In: *ASTM Annual book of ASTM standards* (Volume 4.08) (pp. 836-842). Philadelphia: ASTM international.
- Barrios, R. & Florentino, A. (2001). Evaluación del patrón de humedecimiento de dos suelos subirrigados cultivados con palma aceitera. *Agronomía Tropical* 51(3), 371-386.
- Baver, L. D., Gardner, W. H. & Gardner W. R. (1972). *Soil Physics* (Fourth Edition). Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons INC.
- Bravo, C. & Andreu, E. (1995). Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos*, 3(2),62-68.
- Caquot, A. & Kerisel, J. (1969). *Tratado de Mecánica de Suelos*. Madrid: Interciencia.
- Chan, K. Y. (2002). Bulk density. In: R. Lal (Ed.) *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 128-130) New York: Marcel Dekker.
- Constantini, A. (1995). Soil sampling bulk density in the Coastal Lowlands of South-East Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 33(1), 11-18.
- Espinoza, J. (1970). *Estudio de las series de suelo y levantamiento agrológico en el Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepin*. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos: Maturín, Estado Monagas Venezuela.
- Faure, A. (1981). New conception of plastic and liquid Limits of clay. *Soil and Tillage Research*, 1, 97-105.
- Fermin, A. (1971). *Algunas relaciones suelo-agua de la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente*. Trabajo de Grado. Maturín, Estado Monagas, Venezuela.
- Folegatti, M. V., Brasil, R. P. C. & Blanco, F. F. (2001). Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandiusasfic eutrodox and a typic Hapludox. *Scientia Agrícola*, 58(4), 833-838.
- García, M. & Herrera, R. (1980). *Algunas propiedades del complejo de intercambio de varios Ultisoles de la sabana Nororiental Venezolana*. Venezuela: Centro de Ecología.
- Gaspar, J. (1983). *Determinación de diferentes parámetros físicos del suelo con fines de riego en la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente*. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente: Monagas, Maturín, Venezuela.
- Hartge, V. K. H. & Sommer, G. (1979). Bodenverdichtungen und ihre Beurteilung. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 20, 257-268.
- Hossne, A. (2001). *Indexación física de los suelos agrícolas*. (Versión 5). Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente: Maturín, Estado Monagas, Venezuela.
- Hossne, A. (2008). Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 8(1), 107-117.
- Hossne, A. & Salazar, J. (2004). Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas de Venezuela. *Revista Costarricense* 28(1), 69-80.

- Hossne, A., Mayorca, Y. N., Salazar, L. D., Subero, F. A. & Zasillo, A. M. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 937-950.
- Hossne, A., Paredes, G., Carvajal, R., Santaella, E. & Malaver, J. (2011). Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana. *Acta Universitaria*, 21(3), 5-12.
- Hough, B. K. (1969). *Basic Soils Engineering*. New York: The Ronald Press Company.
- Hvorslev, M. J. (1949). *Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes: report on a research project on the Committee on Sampling and Testing, Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering*. Vicksburg, Mississippi: Waterways Experiment Station.
- Ibrahim, A. M., Persaud, N., Zobel, R. W. & Hass, A. (2010). Reducing compaction effort and incorporating air permeability in Proctor testing for design of urban green spaces on cohesive soils. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 1(1), 021-029. Recuperado de <http://www.academicjournals.org/JSEM>. Fecha de consulta: 07 mayo 2013.
- Jamison, V. C. & Weaver, H. A. (1952). Soil hardness measurements in relation to soil moisture content and porosity. *Soil Science Society of American Journal*, 16(1), 13-15.
- Karafiath, L. L. & Nowatzki, E. A. (1978). *Soil Mechanics for off-road vehicles engineering*. Clausthal, Germany: Trans Tech Publ.
- Lal R. & Shukla, M. (2004). *Principles of soil physics*. New York: Marcel Dekker.
- Lima, H. V., Silva, A. P., Imhoff, A., Neves Junior, A. F. (2005). Alternative method for volumetric core removal in hardsetting soils. *Scientia Agricola*, 62(5): 493-497.
- Lugo, J. (1995)a. *Estudio comparativo de varios métodos para determinar la densidad aparente de los suelos in situ*. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola, Campo Los Guaritos: Maturín, Estado Monagas, Venezuela.
- Lugo, J. (1995)b. Compactación de suelos bajo uso agrícola. En M. Sindoni, L. Caraballo & T. Rodríguez (compiladores), *Taller: Aspectos físicos de los suelos de las sabanas orientales y su efecto sobre la productividad* (pp. 47-49). Maracay, Venezuela: FONAIAP.
- Martínez, B. M. (1986). Estudio de algunas características mineralógicas de las principales unidades de suelos de los Llanos Altos de Monagas, en relación con su fertilidad y práctica de manejo. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica: Maturín. Monagas, Venezuela.
- Mata, R. A. (1992). *Fundamentos para el manejo de los suelos llaneros del Oriente de Venezuela*. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente: Maturín, Monagas, Venezuela.
- McKeague, J. A. (Ed.). (1978). *Manual on soil sampling and methods of analysis* (2nd Edition). Ottawa, Canada: Canadian Society of Soil Science.
- McIntyre, D. S. & Loveday, J. (1974). Bulk density. In J. Loveday (Ed.), *Methods of analysis of irrigated*. (Technical Communication no. 54 of the commonwealth bureau of Soils) (pp. 38-42). England: Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Méndez, J. R. N., Medina, O. H., Merazo, P. & Fendel, A. J. E. (1996). *Relaciones entre la densidad aparente y el contenido de humedad de un suelo de Sabana y caracteres vegetativos en el cultivo de maní*. Departamento de Agronomía, Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente: Maturín, Monagas, Venezuela.
- Mentler A., Mayer H., Strauß P., Blum W. E. H. (2004). Characterisation of soil aggregate stability by ultrasonic dispersion. *Internacional Agrophysics*, 18(1), 39-45.
- Multiqup INC. (2011). *Soil Compaction Handbook*. Recuperado de: http://www.multiqup.com/multiqup/pdfs/Soils_Compaction_Handbook_low_res_0212_DataId_59525_Version_1.pdf. 20 p. Consultado el 05 mayo 2013.
- Perfect, E., Sukop, M. C. & Haszler, G. R. (2002). Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Society of America Journal*, 66(3): 696-701.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. *Engineering News-Record*, 111: 286-289.
- Proctor, R. R. (2003). Fundamental principle of soil compaction. In W. Marr (Ed.), *A History of Progress. Selected U. S. papers in Geotechnical Engineering* (Geotechnical Special Publication No. 118) (pp. 55-58). Reston Virginia: ASCE Publication.
- Rahman, M. M. & Siddique, A. (2010). Effects of sampling disturbance and its minimization in reconstituted over-consolidated Dhaka clays. *DUET Journal*, 1(1), 18-26.
- Raper, R. L. & Erbach, D. C. (1985). Accurate bulk density measurement using a core sampler. *American Society of Agricultural Engineers (Paper no.85-1542)*.
- Rodolfo, S. (1987). *Estudio de las formas y dinámica del potasio en 14 suelos del Nororiente venezolano*. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente: Maturín. Monagas, Venezuela.
- Rogers, J. S. & Carter, C. E. (1987). Soil core sampling for hydraulic conductivity and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1393-1394.
- Salazar, P. A. (1982). Determinación de los diferentes parámetros físicos de suelo con fines de riego en la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente: Maturín, Estado Monagas, Venezuela.
- Siddique, A. & Clayton, C. R. I. (1995). Influence of tube penetration disturbances on un-drained shear characteristics of a clay. *Indian Geotechnical Journal*, 25(4), 415-428.
- Siddique, A., Farooq, S. M. & Clayton, C. R. I. (2000). Disturbances due to tube sampling in coastal soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 568-575.
- Silva, V. R., Reinert, D. J. & Reichert, J. M. (2000). Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. *Ciência Rural*, 30(6), 1065-1068.
- Simalenga, T. E. & Have, H. (1992). Estimation of soil tillage workdays in a semi-arid area. *Journal of Agricultural Engineering Research* 51, 81-89.
- Smith, C. Y. A. (1990). *Caracterización del estado del potasio en 10 estratos subsuperficiales de suelos de la región Nororiental*. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente: Maturín, Monagas, Venezuela.
- Soane, B. D., Blackwell, P. S., Dickson, J. W. and Painter, D. J. (1981). Compaction by agricultural vehicles: A review. 1. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Research*, 1: 207-237.
- Sojka, R. E., Busscher, W. J. & Lehrs, G. A. (2001). *In situ* strength, bulk density, and water content Relationship of a Durinodic Xeric Haplocalcid Soil. *Soil Science*, 166(8), 520 – 529.

- Stafford, J. V. & Tanner, D. W. (1983). Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction. *Soil and Tillage Research*, 3(4), 321-330.
- Turnbull, W. J. & Foster, C. R. (1957). Compaction of a graded crushed stone base course. *Proceedings of 4th Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 181-185.
- Uhland, R. E. (1949). Physical properties of soils as modified by crops and management. *Proceedings Soil Science Society of America*, 361-366.
- USDA (2004). *Soil survey laboratory methods manual. (Version No. 2.0, Report no. 45)*. Lincoln, Nebraska: USDA-NRCS.
- Wagner, M., Rincones, C., Medina G. & Mujica M. (1995). Efecto del arado cincel y el riego sobre el desarrollo de la caña de azúcar en un suelo compactado. *Agronomía Tropical*, 45(1), 5-26.
- Vanremortel, R. D. & Shields, D. A. (1993). Comparison of clod and core methods for determination of soil bulk density. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(17-18), 2517-2528.
- Vargas, N. & Lopez, C. (1983). *Caracterización del potasio en cuatro suelos del estado Monagas. Trabajo de Grado*. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente: Maturín, Monagas, Venezuela.
- Wagner, L. E., Ambe, N. M. & Ding, D. (1994). Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. *Transactions of the ASABE*, 37(4), 1121-1125.
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*. 28(5), 337-351.
- Zapata, R. (1986). *Efecto de la fertilización y encalamiento sobre las propiedades físicoquímicas en la interfase colvida-solución de tres Ultisoles venezolanos (Curso de Postgrado en Ciencia de Suelos)*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía: Maracay, Aragua, Venezuela.
- Zwarich, M. A. & Shaykewich, C. F. (1969). An evaluation of several methods of measuring bulk density of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 49(2), 241-245.