

# Ángulo de fricción interna de un suelo agrícola franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela

The internal friction angle of an agricultural savanna sandy loam soil. Monagas State, Venezuela

**Américo José HOSSNE GARCÍA**

Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente, Maturín. Apartado Postal 414, Monagas, Venezuela 6201-A. E-mail: americohossne@cantv.net y americohossnegarcia@gmail.com

Recibido: 15/08/2010      Fin de primer arbitraje: 31/01/2012      Primera revisión recibida: 27/03/2012  
Fin de segundo arbitraje: 18/05/2012      Segunda revisión recibida: 25/06/2012      Aceptado: 27/06/2012

## RESUMEN

Por propósitos agrícolas, las características de falla de un suelo (cohesión y el ángulo de fricción interna) son de interés en los aspectos del crecimiento radical, tenacidad del suelo, diseño de implementos, sistemas tractivos en la interfaz suelo/tracción, erodibilidad, elasticidad, deformación, infiltración, capacidad de campo, diseño de las fuentes de potencia y equipos autopropulsados. El objetivo consistió en evaluar: (a) El ángulo de fricción interna versus la cohesión aparente, la densidad seca, la tensión de compresión normal, la profundidad y la humedad, y (b) La influencia de la fricción interna en la resistencia del suelo. Metodológicamente se utilizó el aparato triaxial y el análisis de regresión para interpretar la variancia entre los parámetros. Entre los resultados se logró un ángulo de fricción interna media de  $24,50^\circ$ , el valor máximo fue de  $36,98^\circ$  para un 6 % de humedad. Se concluyó que: (a) la tensión normal fue la que más influyó sobre el ángulo de fricción interno, (b) Tuvo una relación altamente significativa e inversa con la humedad, (c) Disminuyó con la densidad aparente para valores menores de  $1,73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y al aumentar la densidad seca, la fricción incrementó rápidamente, (d) Se lograron valores altos del ángulo de fricción con respecto a la cohesión aparente a humedades entre 5% y 9% producto del aumento de la compactación o tensión normal, (e) El ángulo de fricción y la humedad fueron grandes responsables de la resistencia del suelo estudiado y (f) Tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna actuaron independientemente.

**Palabras clave:** Resistencia del suelo, cohesión, tensión cortante, tensión normal, densidad, triaxial.

## ABSTRACT

For agricultural purposes, characteristics of soil failure (cohesion and the angle of internal friction) are of interest in the aspects of root growth, soil tenacity, implement design, tractive systems on the soil/traction, erodibility, elasticity, deformation, infiltration, field capacity, designing power supplies and self-propelled equipment. The objective was to assess: (a) The angle of internal friction versus cohesion, bulk density, normal compression stress, depth and gravimetric soil moisture and (b) The influence of the internal friction on the soil resistance. Methodologically the triaxial was used and the regression analysis to interpret the variance between parameters. Among the results achieved an average internal friction angle of 24.50, the maximum value was 36.98 at 6% soil moisture. On concluded that: (a) The normal stress was the most influential on the angle of internal friction (b) varied inversely with moisture but highly significant (c) decreased with bulk density for smaller values of  $1.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and increasing bulk density, friction increased rapidly, (d) With respect to soil cohesion, high values were achieved at soil moisture between 5% and 9% due to the increase of compaction or the normal stress, (e) The friction angle and the water content were huge responsible for the studied soil resistance and (f) Both the cohesion and internal friction angle of soil parameters acted independently.

**Key words:** Soil resistance, cohesion, shear tension, normal tension, density, triaxial.

## INTRODUCCIÓN

La resistencia de un suelo de acuerdo a la ecuación de Coulomb, está en función del ángulo de fricción interna, la cohesión y la tensión normal (Heyman, 1998). Los componentes de la ecuación de Coulomb han sido estudiados por muchos investigadores como por ejemplo Escario y Saez,

(1986); Gan *et al.*, (1988); De Campos y Carillo, (1995); y Fredlund *et al.*, (1997). Delage y Graham, (1996) agruparon varios resultados experimentales y observaron que la fricción podría aumentar con la succión según Escario y Saez, (1986) en suelos plásticos, Drumright y Nelson, (1995) en franco arenosos, o decrecer de acuerdo a Delage *et al.*, (1987) y Maâtouk *et al.*, (1996) en suelos limosos de

baja plasticidad y en suelos piro plásticos imperturbados. respectivamente.

Los cambios en el ángulo de fricción interna con la succión fueron también considerados por Toll, (2000) en suelos gravosos (7% limo y 8% arcilla) en donde mostró un aumento del ángulo de fricción interna con un aumento de la succión. Los suelos franco arenosos tienen resistencia debido más que todo a la fricción. Arena y mezclas con arena gruesa tienen un ángulo de fricción superior que los suelos limosos sin plasticidad. Cuanto más denso esté el suelo, el ángulo de fricción es superior. Cuando existe el relleno de los espacios pequeños entre las partículas de suelo, hay mayor resistencia entrelazada y friccional para un suelo bien fraccionado que para un suelo granular uniforme. Partículas de suelo compuestas de cuarzo tienden a tener un ángulo de fricción superior que las partículas de suelo compuestas de carbonato débil. Las partículas grandes clasificadas según el tamaño, como las partículas de arena gruesa clasificadas según el tamaño, tienen típicamente la fricción superior que la arena. Debido a las variaciones en los tipos de suelos, gradaciones, los arreglos de las partículas, y la densidad seca; el ángulo de fricción es raramente uniforme con la profundidad (Day, 1994).

El ángulo de fricción de la arena es determinado por medios indirectos, como la prueba de penetración normal y la prueba de penetración de cono (Day, 1994). Daguier (1976) utilizó un cilindro torsional in situ y el método de corte horizontal o directo para determinar el ángulo de fricción interna en el suelo franco arenoso de sabana objeto de estudio y encontró un valor de 54,08° con el cilindro torsional y de 38,37° con la prueba directa; no especificó la humedad, pero observó disminución con el aumento de la humedad. Lambe y Whitman, (1979) encontraron que para suelos arcillosos un cambio de humedad de 23,5 a 21,3 % produjo un ángulo de fricción interna, sin variación, de 18°

Battika (1985) determinó el ángulo de fricción interna para el suelo franco arenoso de sabana objeto de estudio; utilizando el cilindro torsional in situ obtuvo 57,53° para 10,5 % de humedad y con el uso del aparato de corte horizontal 31,48° para una humedad 10,08 %. El objetivo general consistió en investigar el proceso resistente de los suelos agrícolas involucrando parámetros físicos mecánicos y la influencia de la humedad con el uso del triaxial. El objetivo específico consistió en evaluar: (a) El ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) versus la cohesión aparente (C), la densidad seca ( $\rho_s$ ), la tensión de compresión normal o esfuerzo desviador ( $\sigma$ ), la humedad (w) y la profundidad (Pro); y (b) El grado de influencia del ángulo de fricción interna en la resistencia ( $\tau$ ) del suelo objeto de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo para el análisis experimental se realizó en un suelo franco arenoso de sabana en el estado Monagas, situado a una altura de 147 msnm y coordenadas geográficas de 9° 41' 33" latitud norte y 63° 23' de longitud oeste; con una precipitación anual de 1127 mm y una temperatura media anual de 27,5 °C. Bajo una vegetación típica de sabana: Chaparro (*Curatella americana Dilleniaceae*), Mery (*Anacardium occidentale*), Paja Peluda (*Trachypogon* y *Axonopas sp*), Manteco (*Byrsonima crassifolia Malpighiaceae*), Mastranto (*Hyptis suaveolens Lamiaceae*, Gramíneas, Ciperáceas, etc. El área de trabajo del suelo objeto de estudio seleccionado, pertenece a las condiciones de un Ultisol de sabana del grupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertérmic.

Los Cuadros 1 y 2 muestran las características físicas y químicas respectivamente del suelo. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango establecido por Rucks *et al.*, (2004) y CIVIL2121

Cuadro 1. Componentes físicos en porcentajes y diámetro promedio en mm de las partículas del suelo de sabana estudiado del Estado Monagas, Venezuela.

Profundidad (cm)	Componentes Edáficos (%)							
	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla Caolinita	Materia Orgánica
0 – 15 (A)	0,22	2,91	12,18	39,13	13,93	19,43	12,2	0,38
15 – 30 (B)	0,52	2,23	11,07	41,09	10,51	18,38	16,2	0,27
30 – 45 (C)	0,30	2,46	10,30	34,56	12,58	21,6	18,2	0,20
45 – 60 (D)	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	

(2012). La Figura 1 muestra la mayor representatividad de arenas de ese suelo en especial las arenas finas, las líneas de tendencia muestran que los componentes varían muy poco para las diferentes profundidades a partir de las arenas muy finas hacia la derecha y que la mayor cantidad de componentes de menor diámetro se encuentran entre 45 y 60 cm de profundidad. Estos suelos ocupan una extensa área agrícola venezolana y son utilizados en la explotación de muchos rubros como maíz, sorgo, yuca y pastizales.

Se utilizó el aparato triaxial en compresión confinada con drenaje para determinar a C,  $\phi$ ,  $\rho_s$  y  $\sigma$ . Se utilizó el equipo de compactación Mini Hardware para confeccionar los especímenes, los cuales tuvieron una altura y diámetro inicial iguales a las del cilindro moldeador. La velocidad del ensayo estaba calibrada para el tipo de prueba (1,2 mm/min). Cuando se presentaron fallas por deformación plástica las lecturas se tomaron hasta un 20 % de la deformación lineal, o cuando las lecturas del deformímetro de carga se repetían más de 4 veces. El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), donde se practicó una estratificación del suelo, en el cual el estrato está clasificado como de textura superficial franco arenosa, comprendida en una superficie aproximada de 55 ha. Se perforaron 20 calicatas para la recolección de las muestras y se conformó como una muestra compuesta. La recolección de las muestras y ubicación de los pozos se realizó apoyado en el método de muestreo aleatorio simple. En cada uno de las áreas se realizó un muestreo del horizonte comprendido entre 0,00-0,30 m profundidad y 0.30-0.60 m, tomando muestras al azar del mismo. Estadísticamente la regresión, el análisis de regresión paso a paso y el análisis de regresión para el mejor subconjunto fueron empleados.

La muestra se secó al aire y luego se desmenuzó para eliminar los terrones. Se pasó por un tamiz de 4,69 mm y se volvió a desmenuzar. Al suelo estudiado para los estratos 0,00-0,30 m y 0,30-0,60 m se utilizaron 4 presiones de cámara (60, 120, 180, 240 kPa) y once (11) niveles base de humedad (5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15), con tres repeticiones para formar un sub-total de 132 unidades experimentales. Las unidades experimentales se representaron por los especímenes ensayados en la cámara de compresión triaxial.

La expresión matemática que relaciona la presión principal ( $\sigma_1$ ) (igual a la presión principal de cámara ( $\sigma_3$ ) más la carga del pistón o esfuerzo desviador), la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), está dada por (Crespo, 2007):

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \left( C * \cot(\phi) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) * \text{sen}(\phi) \quad (1)$$

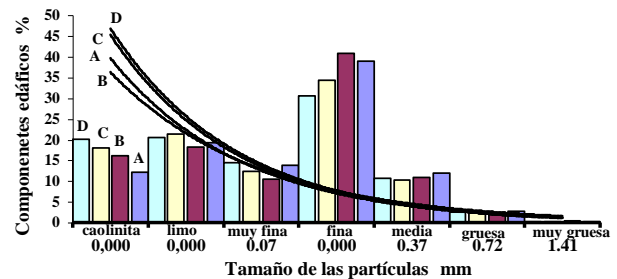


Figura 1. Contenido de arcilla, limo, arena muy fina, arena fina, arena media, arena gruesa y arena muy gruesa respectivamente versus el tamaño de las partículas, en los cuatro horizontes estudiados. Las tendencias del tamaño de las partículas versus profundidad son: (A) de 0-15 cm, (B) de 15 a 30 cm, (C) de 30 a 45 cm y (D) de 45 a 60 cm.

Cuadro 2. Perfil químico del suelo estudiado. Suelo de sabana franco arenoso del Estado Monagas, Venezuela

Prof (cm)	pH en pasta H <sub>2</sub> O	pH en pasta KCL	Materia Orgánica		P (ppm)	Cationes cambiables (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> de suelo)						C.I.C. (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> de suelo)	SB (%)	SA (%)
			C <sub>4</sub> orgánico (%)	N <sub>2</sub> (%)		Ca	Mg	Na	K	AL <sup>+3</sup>	H <sup>+</sup>			
0 - 15	4,70	3,90	0,38	0,04	1,85	0,79	0,31	0,10	0,04	0,68	0,55	2,47	50,20	49,80
15 - 30	4,70	3,90	0,27	0,03	1,23	0,40	0,37	0,04	0,03	0,84	0,68	2,36	35,59	64,41
30 - 45	4,70	3,90	0,20	0,02	1,23	0,51	0,24	0,02	0,03	0,96	0,71	2,47	32,39	67,61
45 - 60	4,80	3,90	0,13	0,01	1,23	0,28	0,24	0,02	0,03	0,96	0,76	2,29	24,89	75,11

Prof: Profundidad (cm); P: Fósforo soluble en ácido cítrico; C.I.C.: Capacidad de intercambio catiónico; SB: Saturación de bases y SA: Saturación de acidez.



cohesión aparenta aumentó por efecto de la tensión normal, sin influir sobre el ángulo de fricción interna. Se nota que la fricción fue inversamente proporcional con respecto a la humedad. Los mayores valores de la fricción se lograron para humedades entre 6% y 9,1% y cohesiones entre 19 y 34 kPa. Para la tensión normal de 401 kPa acompañada de una humedad del 5 % y cohesión de 64 kPa produjo un ángulo de fricción interna de 30°. Los cambios en el contenido de humedad tienen un efecto pronunciado en los parámetros C y  $\phi$  (ASAE, 1971).

Faure (1981) señaló que cuando realizó gran número de pruebas rápidas consolidadas con el triaxial, sin drenaje, a una velocidad de compresión de 60 mm/s y 0, 0,1, 0,2, 0,3 y 0,4 MPa de presión a diferentes contenidos de humedad sobre caolinita pura ( $K_0$ ) y sobre una mezcla de arena con caolinita (31 %) (FK 31), para una energía de compactación de  $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $6,12 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ ); observó que cuando el contenido de agua aumentaba, el ángulo de fricción permanecía constante o disminuía lentamente; pero después decreció rápidamente en ambos casos. Las fuerzas cohesivas entre illita, esmectita o vermiculita son mayores que para caolinita, pero caolinita puede movilizar más altos valores de resistencia de cizallamiento expresados como el ángulo de fricción interna (Gibson 1953; Horn, 1988). Al respecto Smith (1990) reportó entre un 70-80 % de arcillas caoliníticas y de un 5-10 % de feldespatos para el suelo objeto de estudio. Aquí la importancia de la transferencia de peso hacia las ruedas tractivas del tractor para aumentar la tracción en este suelo en donde su resistencia es más función del ángulo de fricción interna que la cohesión.

La Figura 3 representa gráficamente la variación del ángulo de fricción interna en función de la humedad gravimétrica para dos profundidades. Al resolver el sistema de las dos ecuaciones lineales mostradas, se encontró que el punto de corte fue para  $\phi = 26,25^\circ$  y  $w = 10,24\%$  para las dos profundidades respectivamente; de aquí en adelante, los valores de  $\phi$  para el estrato 30-60 se colocaron por debajo. Esto se explicaría por el aumento de partículas más pequeñas al profundizar. Se observa que las humedades entre 9 y 10 % caracterizaron el fenómeno para la fricción interna, posiblemente debido a que el suelo se encontraba en el estado friable y mucho antes de la capacidad de campo, al respecto Hossne (2008b) reportó para este suelo una zona friable entre 7,63 % y 9,52 %, y la capacidad de campo para el suelo Ultisol de sabana se encuentra alrededor en un

promedio de 12,6 % (Espinoza, 1970; Fermín, 1971; Mata, 1992; Hossne y Salazar, 2004). Battika (1985) encontró valores similares con el aparato de corte directo. García (2002) halló que en un suelo franco con las características siguientes: 39% de arena, 40% de limo, 21% de arcilla, 1,5% de materia orgánica, límite líquido 27%, límite plástico 19% y gravedad específica 2,64, el mayor ángulo de fricción interna fue de  $27^\circ$  para una humedad gravimétrica de 12% y una mayor cohesión de 24 kPa; observó poca variación de la fricción con respecto a la humedad. Posiblemente influyó el tipo de arcilla y el alto contenido de materia orgánica y limo.

La hipótesis de que el ángulo de fricción es independiente de la humedad del suelo se ha comprobado en muchos casos, pero no siempre es cierto. Por ejemplo, de acuerdo a Escario y Sáez (1986) el ángulo de fricción podría aumentar con la disminución de la humedad en arcillas plásticas; según Drumright y Nelson, (1995) podría aumentar en una arena de cobre de relaves; de acuerdo Delage *et al.*, (1987) y Maatouk *et al.*, (1996) podría decrecer en los limos de baja plasticidad y en suelos no perturbados piroclásticos. Los cambios en el ángulo de fricción con las variaciones de la humedad del suelo fueron considerados por Toll, (2000) sobre Kiunyu de grava (7% de limo y 8% de arcilla) que mostraron un aumento de  $\phi$  con la disminución de la humedad del suelo. Razouki *et al.*, (2007) reportaron que un suelo arcillo franco limoso con  $\phi$  entre  $10^\circ$  y  $27^\circ$  con el suelo parcialmente saturado, pero  $\phi$  se acercó a cero cuando estuvo saturado. Islam *et al.*, (2006) observaron, en suelos CL, ML y MH, que la humedad poco influyó sobre el ángulo de fricción interna. Ahokas, (2002); Asmaranto *et al.*, (2010) y De Campos *et al.*, (1992), encontraron que un

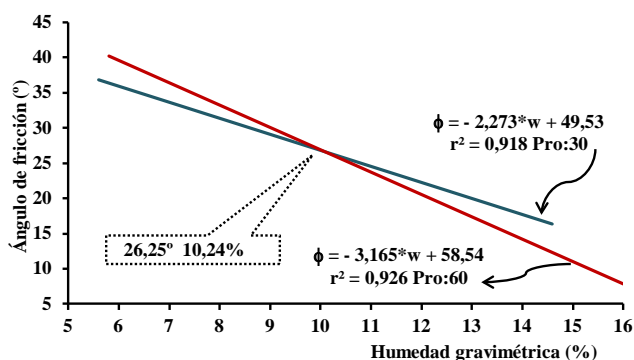


Figura 3. Ángulo de fricción ( $\phi$ ) versus la humedad ( $w$ ) del suelo franco arenoso de sabana para la profundidad 0-30 cm y de 30-60 cm.

aumento de la humedad redujo el ángulo de fricción interna.

La regresión lineal paso a paso aplicada a la función  $\phi = F(C, \rho_s, w)$  con P de entrada de 0,05 y salida de 0,10; con las variables independientes C y  $\rho_s$  forzadas, y w libre, un  $r^2$  de 0,9788 y una correlación de Pearson con exclusión del intercepto de: (0,08603, 0,8980, 0,7258); produjo para el modelo resultante la ecuación lineal  $\phi = 0,00292*C + 40,5332*\rho_s - 3,18673*w - 13,6171$ , con un P general de 0,000 y un P de 0,96; 0,0015; 0,0000; 0,58 para el orden de la ecuación. El VIF fue de 23,4; 9,2; 8,4 para las variables independientes en el orden de la función. Sin embargo el análisis de regresión para el mejor subconjunto para las variables independientes w libre y la cohesión (C) como la densidad seca ( $\rho_s$ ) forzadas, produjo a w como la más influyente, siguiéndole  $\rho_s$  y por último C, con  $r^2$  de 0,978. A pesar de la multicolinealidad  $\phi_{determinado} \approx \phi_{calculado}$  con correlación de 0,9893\*. La multicolinealidad fue objeto de la influencia que tiene la humedad sobre la cohesión y la densidad seca. En la ecuación se observa que la influencia de C sobre  $\phi$  fue muy pequeña (0,00292) con un  $r^2$  de 0,96 y un VIF muy alto (23,4); en cambio,  $\rho_s$  y w resultaron influyentes sobre  $\phi$ , mostrando la inconexión entre  $\phi$  y C.

Las derivaciones estadísticas armonizaron con los resultados de la Figura 4, en donde se observa que la cohesión influyó muy poco sobre la fricción, aparentemente sólo para valores altos de C y valores bajos de la compactación que ocurrieron a bajas humedades, pero en forma constante sin alterar los valores de la fricción interna. En correspondencia a estos resultados según ASAE, (1971) si  $\phi$  fuese medido en especímenes preparados a diferentes contenidos de humedad con el correspondiente proceso compactante, los valores de  $\phi$  podrían no estar correlacionados con la densidad seca alcanzada; además, los cambios en el contenido de humedad causaron un pronunciado efecto sobre  $\phi$  que los cambios en la densidad aparente. La presencia de películas de agua en las interfaces redujo substancialmente el ángulo de fricción interna, Kézdi (1974). El coeficiente de fricción interna de suelos livianos para un contenido de humedad dado aumenta al aumentar la compactación; para suelos de textura fina tienen una respuesta similar. Para las arenas el ángulo de fricción interna aumenta con la densidad aparente (ASME, 1971). En suelos de textura gruesa, el factor importante en impedir el crecimiento de raíces puede resultar de la superficie rugosa de las

partículas de arena (Cruse *et al.*, 1980). La fricción resultante entre el desplazamiento de partículas por la raíz en crecimiento previenen su expansión o alargamiento de las raíces de maíz; además, ciertamente la compactación intensificaría esta condición al mover las partículas más cerca Chaudhary *et al.*, (1985).

De acuerdo a Greacen y Sands (1980) la descripción de la relación entre compactación y resistencia depende ampliamente de las teorías de mecánica de suelos. La densidad aparente seca ( $\rho_s$ ) es la medida de los niveles de compactación y la resistencia del suelo es valorada con la ecuación de Coulomb ( $\tau = C + \sigma*\tan\phi$ ), en donde  $\tau$  representa la resistencia o tensión cortante, C la cohesión,  $\sigma$  la tensión normal o compresión y  $\phi$  el ángulo de fricción interna. Según Wiersum (1957) y Fisher (1964) la densidad seca producto de la compactación, se basa en la reducción de los poros aeríferos, considerados como poros de 3 mm. Son muchas las investigaciones que relaciona a  $\phi$  con  $\sigma$  y  $\rho_s$ : Hough (1969) y Day (1994) reportaron que para un suelo granular cuanto mayor es la densidad, mayor es el ángulo de fricción; Day (1994) registró que arena y mezclas con arena gruesa tienen un ángulo de fricción superior que los suelos limosos sin plasticidad, cuanto más denso esté el suelo, el ángulo de fricción es superior; Bjerrum *et al.*, (1961) y Sands *et al.* (1979); Chancellor (1971) examinaron el ángulo de fricción en arenas con partículas entre 60-200  $\mu\text{m}$ , encontraron  $\phi = 40^\circ$  para una densidad

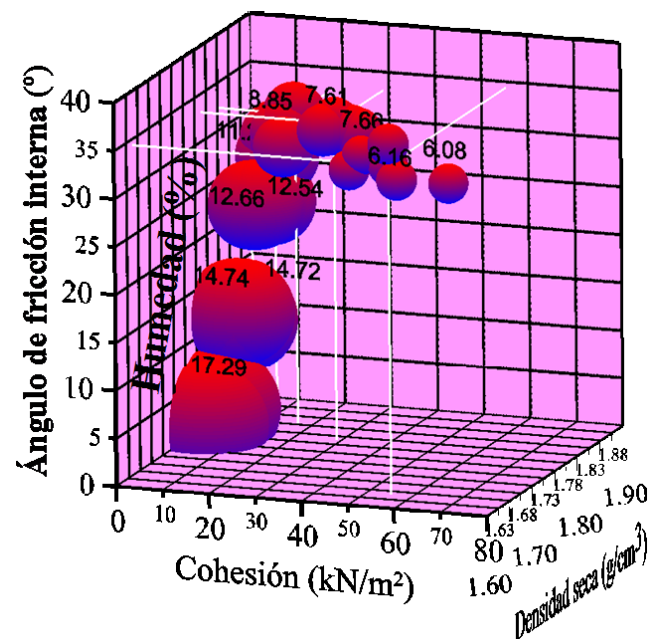


Figura 4. El ángulo de fricción interna en función de la densidad seca, cohesión aparente y la humedad.

máxima de  $1,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , que decreció linealmente a  $\phi = 30^\circ$  para  $\rho_s$  de  $1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y para la densidad con valores menores  $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  decreció rápidamente a  $20^\circ$ ; De Ploey y Cruz (1979) realizaron mediciones del ángulo de fricción encontrando que varió de  $21^\circ$  a  $35^\circ$  y la densidad seca varió entre  $1,5$  y  $2,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  para regolito desarrollado en gneis.

El análisis de varianza para el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) con una media de  $24,5^\circ$  con un coeficiente de variación de 12,56, produjo alta significación con respecto a la humedad (0,0000), pero no hubo con respecto a la profundidad (0,4946). De acuerdo a Farinha, (2010) y Solanas *et al.*, (2004) el coeficiente de variación entre 0 y 10 es muy bajo, y entre 10 y 20 es bajo. La prueba de la mínima diferencia significativa (MDS) ( $p \leq 0,05$ ) mostró que no hubo diferencia significativa de  $\phi$  con relación a la profundidad (a las profundidades de 0 a 30 cm y 30 a 60 cm se obtuvieron para  $\phi$   $22,04^\circ$  y  $23,26^\circ$  respectivamente), y con relación a la humedad se obtuvieron valores sin diferencia significativa de  $35,84^\circ$  a la humedad del 5% disminuyendo  $\phi$  un 3,5% al aumentar la humedad hasta 10% para un  $\phi$  de  $30,06^\circ$ . Para una humedad de 9% el valor de  $\phi$  fue de  $27,09^\circ$ .

En el Cuadro 3 se presentan las medias, mínimos y máximos del ángulo de fricción ( $\phi$ ) obtenidos para las profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm con una significancia de 0,017. Se incluyeron los respectivos valores de la cohesión, tensión cortante y humedad. Se anexaron los respectivos valores de correlación, coeficiente de regresión, eta y linealidad. Se observa que tanto la humedad como la tensión normal influyeron más sobre el ángulo de fricción interna que la cohesión. El ángulo de fricción interna tuvo un valor promedio de  $22,27^\circ$  a la profundidad de 60 cm, y de  $21,22^\circ$  a la profundidad de 30 cm sin diferencia

significativa. Los mayores valores del ángulo de fricción interna fueron: (a)  $36,86^\circ$  para la profundidad de 60 cm, una tensión normal de 919,41 kPa, una cohesión capilar de 77,66 kPa y una humedad de 6,8% y (b)  $35,74^\circ$  para la profundidad de 30 cm, una tensión normal de 737,72 kPa, una cohesión capilar de 42,60 kPa y una humedad de 5,60%.

Estos resultados están apoyados por García (2002); Davison y Springman (2000); Mouazen y Ramón, 2002; Kemper y Rosenau, 1984; Fredlund y Rahardjo, 1993; Likos y Lu, 2002. Según Kézdi (1974), trabajando con suelo Osorno, encontró que el ángulo de fricción interna varió entre  $20^\circ$  y  $48^\circ$ . De acuerdo a Hough (1969) el limo y las arenas uniformes finas y medias tiene un ángulo de fricción interna entre  $26^\circ$  y  $30^\circ$ , los suelos incohesivos generalmente el ángulo de fricción interna es raras veces menor de  $26^\circ$  o mayor de  $36^\circ$ , en donde un valor de  $30^\circ$  puede ser asumido. Fountaine y Brown (1959) en pruebas en arenas con uso de una caja torsional de corte registraron un ángulo de fricción interna de  $45^\circ$  y de  $44^\circ$  a una humedad de 9 %. Daguar (1976) en el suelo franco arenoso de sabana objeto de estudio encontró un valor de  $54,08^\circ$  con el cilindro torsional y de  $38,37^\circ$  con la prueba directa; no especificó la humedad, pero observó disminución con el aumento de la humedad.

Battika (1985) determinó el ángulo de fricción interna para el suelo franco arenoso de sabana objeto de estudio; utilizando el cilindro torsional in situ obtuvo  $57,53^\circ$  para 10,5 % de humedad y con el uso del aparato de corte horizontal  $31,48^\circ$  para una humedad 10,08 %. En estas revisiones el ángulo de fricción interna varió de  $20^\circ$  a  $57^\circ$ , el obtenido en este trabajo varió entre  $22^\circ$  y  $36^\circ$  con las respectiva variaciones de la humedad, mostrando que el resultado para el suelo objeto de

Cuadro 3. La media, valores mínimos y máximos del ángulo de fricción interna en función de la cohesión, tensión normal y humedad para las profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm. Correlación, coeficiente de regresión, coeficiente Eta y linealidad.

Profundidad (cm)	Medias $\Phi$ ( $^\circ$ )	$\Phi$ ( $^\circ$ )	C ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$\sigma$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	w (%)
30	26,70	13,94	6,35	261,40	14,58
30		35,84	60,69	811,32	6,22
60	22,30	0,63	0,36	154,03	16,59
60		36,98	46,88	790,86	6,10
	r		0,68	0,905	- 0,953
	$r^2$		0,462	0,819	0,909
	Eta		0,999	1,000	0,999
	Linealidad		0,003	0,000	0,000

este estudio se encuentra sostenido por la bibliografía. Los resultados obtenidos por Daguier (1978) y Battika (1976) están más cercanos al ángulo de fricción interna de las arenas; mostrando esto, posibles errores experimentales.

La regresión lineal paso a paso para la función  $\tau = F(\sigma, \phi, C, w, Pro)$  con una significancia total P de 0,000, un  $r^2$  de 1 para el Modelo 5 y una correlación de Pearson de: (0,997\*\*\*: 0,877\*\*\*: 0,921\*\*\*: - 0,936\*\*\*: - 0,062) para cada término en el orden de influencia y de la función, produjo para el Modelo 5 la ecuación lineal  $\tau = 1,572*\sigma - 6,768*\phi - 2,266*C + 2,133*w - 264,502$ . La regresión paso a paso mostró que la tensión normal ( $\sigma$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fueron los que más influyeron en la tensión cortante ( $\tau$ ). Al determinar a  $\tau = F(C, \sigma, \phi, w)$  por regresión lineal se observaron también cambios en signos producto de la alta multicolinealidad con un VIF de 86,18; 28,06; 24,83; 23,7; 1,3 para las variables independientes en el orden de la función. Sin embargo,  $\tau_{determinado} \approx \tau_{calculado}$  con correlación de 1.

La Figura 5 presenta gráficamente la tensión cortante ( $\tau$ ) en función del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), la cohesión capilar (C) y la tensión normal ( $\sigma$ ) representada por el diámetro de las burbujas. Como se puede observar la fricción interna influyó más sobre la tensión cortante que la cohesión capilar. Se

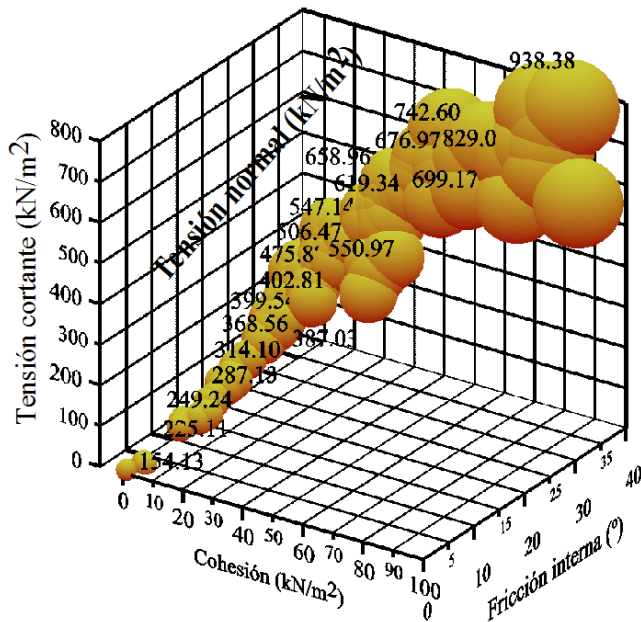


Figura 5. Representación gráfica de la tensión cortante versus el ángulo de fricción, cohesión y la tensión normal

distingue que la tensión normal fue la que más intervino sobre la tensión cortante. Se nota que sólo los valores altos de la cohesión fueron los que influenciaron sobre la tensión cortante. Esto coincide con los resultados obtenidos con la regresión lineal paso a paso. Al respecto Hossne et. al., (2002) encontraron que la resistencia del suelo objeto de estudio aumentó con el incremento de las presiones de cámara (tensión principal menor) y disminuyó inversamente proporcional con la humedad.

El agua se hace más estricta en los poros pequeños que en los poros dilatados. Por esta razón, un estrato de arcilla con sus pequeños poros puede sostener más agua que la arena. Los pequeños poros permiten que el suelo retenga más agua por la atracción capilar que es inversamente proporcional al tamaño de las partículas y que puede existir en cualquier suelo insaturado y su magnitud en general es inversamente proporcional al grado de saturación; es decir, el tamaño de los poros está relacionado con la cohesión capilar (cohesión aparente) originada por la compactación que ocasiona la cercanía entre las partículas reduciendo la macroporosidad, que aumenta cuanto más alto es el contenido de humedad, amplificando la retención de agua (Goering *et al.*, (2003); Orr *et al.*, (1975); Dobbs y Yeomans, (1982); Bygdén y Wästerlund, (2007); Kobayashi *et al.*, (2008); Van Doren, (1976); Hillel, (1980); Reickoski *et al.*, (1981); Voorhees y Lindstrom, (1984); Blackwell *et al.*, (1985); Allegre *et al.*, (1986); Maaitah, (2012), Lenaerts *et al.*, (2008); Ugbe, (2011); Hunt, (1986); Ellies y Smith, (1998); Razouki y Kuttah, (2007); Shahangian, (2011)). En base a todas estas revisiones y a los resultados conseguidos, el posible efecto de la cohesión aparente sobre el ángulo de fricción interna, observarse en las Figuras 2 y 4, no es sino la consecuencia de la compactación sobre la cohesión; que al aumentar, aumenta la densidad aparente. Al respecto, el valor de VIF para  $\sigma$  fue de 42,242 mostrando una alta multicolinealidad, mayor que el de la humedad que fue de 20,556; y según Adnan *et al.*, (2006) el valor de VIF no debe ser mayor de diez (10). Esto soporta la conclusión de que la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna actúan independientemente sobre la tensión cortante.

La resistencia de los suelos según las ecuaciones de Coulomb:  $\tau = C + \sigma \tan \phi$  y la ecuación de tracción de los suelos de Micklethwait (1994):  $H = A*C + V * \tan \phi$ , están en función de C,  $\phi$ ,  $\sigma$ , A y V; en donde A es el área de agarre de las ruedas tractivas



y  $V (A \cdot \sigma)$  el peso que reciben las ruedas tractoras. En el suelo objeto de estudio se encontró que las variables más influyentes en el comportamiento físico mecánico fueron el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la tensión normal ( $\sigma$ ). Se podría inferir que el uso de cauchos con tacos cortos y buena transferencia de peso hacia las ruedas tractoras, mejorarían el uso eficiente del tractor. Se debe entender que la transferencia de peso debe estar en condiciones óptimas. Los valores altos del ángulo de fricción interna con cargas normales son de gran importancia práctica como por ejemplo en la mejora del tiro por aumento de peso en las ruedas tractoras; por el contrario, para los implementos agrícolas que se asen al suelo, mayores reducciones en los requerimientos de fuerzas por el suelo pueden lograrse disminuyendo las cargas normales; es decir, la transferencia de peso debe ser óptima (Fountaine y Brown 1959).

### CONCLUSIONES

Entre los resultados se obtuvo un ángulo de fricción interna altamente significativo e inversa con respecto a la humedad, no hubo diferencia significativa para las profundidades de muestreo y tuvieron un valor de  $27^\circ$  para 9,91 % de humedad y un valor máximo de  $36,98^\circ$  para una humedad de alrededor 6 %. El orden de influencia de las variables independientes fueron como lo muestra la función:  $\phi = F(w, \sigma, C, Pro)$ .

La humedad edáfica influyó sobre el ángulo de fricción interna mucho más que la densidad seca. Esto fue debido posiblemente a que la mayor compactación se logró a humedades altas. Con respecto a la densidad aparente, disminuyó para valores menores de  $1,73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y al aumentar  $\rho_s$ , el ángulo de fricción incrementó rápidamente.

La poca influencia observada de la cohesión sobre el ángulo de fricción interna fue sólo producto del efecto de la compactación o la tensión normal. Tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna actuaron independientemente.

La función  $\tau = F(\sigma, \phi, C, w, Pro)$  representa la tensión cortante en relación a las variables independientes en el orden de influencia. La tensión normal ( $\sigma$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) fueron los que más influyeron en la tensión cortante ( $\tau$ ). Los altos valores de la cohesión aparente influyeron sobre la tensión cortante; y esto sólo se logró a bajos contenidos de humedad entre 5 y 9 %.

De acuerdo a la ecuación de Coulomb, la resistencia de estos suelos son altamente influenciados por la humedad y el ángulo de fricción interna. Esto repercute sobre los sistemas tractoras. El ángulo de fricción interna mostró alta influencia sobre la tensión cortante en el suelo estudiado. Esto implica que los cauchos tractoras de tacos altos por su costo no deberían ser utilizados en estos suelos; también, que el peso vertical que reciben las ruedas tractoras es de mayor influencia que el tipo de estrías que utiliza el tractor o fuente tractora en el sistema de tracción. La tracción sería mejorada (si es necesario) con la transferencia de peso (control automático de profundidad y el control posicional, ambos componentes del sistema hidráulico) y el lastrado de las ruedas tractoras.

### AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente por el financiamiento y apoyo de esta investigación.

### LITERATURA CITADA

- Adnan N.; M. H. Ahmad AND R, Adnan. 2006. A comparative study on some methods for handling multicollinearity problems. *Matematika* 22 (2): 109-119.
- Ahokas, J. 2002. Maamekaniikka. (In Finnish). *Maaja kotitalousteknologian julkaisu* 8.
- Allegre, J. C.; D. K. Cassel and D. E. Brandy. 1986. Effect of Land Clearing on Subsequent Management of Soil Physical Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1379-1384.
- Asmaranto, R.; R. A. Aryani and S. N. Anwar. 2010. Changes of soil erodibility due to wetting and drying cycle repetitions on the residual soil. *International Journal of Academic Research* 2 (5):149-152.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 1971. *Compaction of agricultural soils*. ASAE Monograph. 299950 Niles Road, St. Joseph, Michigan 49085. 471 p.

- Battika, J. N. 1985. Estudio del esfuerzo de cizalleo de varios tipos de suelos agrícolas venezolanos. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 144 p.
- Blackwell, P. S.; M. A. Ward, R. N. Lefevre and D. J. Cowan. 1985. Compaction of a swelling clay soil by agricultural traffic, effects upon conditions for growth of winter cereals and evidence for some recovery of structure. *Journal of Soil Science* 36 (4): 633-650.
- Bjerrum, I.; S. Kringstad and O. Kummenejee. 1961. The shear strength of fine sand. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Proc. Vol. I: 29-37.
- Bygdén G. and I. Wästerlund. 2007. Rutting and soil disturbance minimized by planning and using bogie tracks. *Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused* 46: 5-12.
- Chancellor, W. J. 1971. Effects of compaction on soil strength. *In: Compaction of Agricultural Soils, Am. Soc. Agric. Eng. Monogr.:* 190-213.
- Chaudhary, M. R.; P. R. Gajri, S. S. Prihar and R. Khera. 1985. Effect of deep tillage on soil physical properties and maize yields on coarse textured soils. *Soil Till. Res.* 6: 31-35.
- CIVIL2121. 2012. Soil classification. Engineering Geology and Geomechanics. Classification systems based on the US system (The Unified Soil Classification System, USCS), or the British Standard Soil Classification System, The Australian Soil Standard. [Http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve](http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve). 12p. Revisado febrero 2012.
- Crespo, V. C. 2007. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Limusa, México. 6ta Edición. ISBN: 9789681869632. 646 p.
- Cruse, R.M., D.S. Cassal, and F.G. Averette. 1980. Effect of particle surface roughness on densification of coarse textured soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 692-696.
- Daguar, R. N. 1976. Esfuerzo cortante de varios suelos agrícolas Venezolanos. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 74 p.
- Day, R. W. 1994. *Soil mechanics and foundations*. American Geotechnical San Diego, California. McGraw-Hill Publishing Co., New York.
- De Campos, T. M. P. and C. W. Carrillo. 1995. Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. *Proc. 1st Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris* (1): 31-38.
- De Campos, T. M. P.; M. H. N. Andrade and E. A. Vargas Jr.. 1992. Unsaturated colluvium over rock slide in a forest site in Rio de Janeiro. 6<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, 1357-1364.
- Delage P., Suraj de Silva G.P.R. and De Laure E. 1987. Un nouvel appareil triaxial pour les sols non saturés. IX<sup>ème</sup> Conf. Eur. Mécanique des Sols et Travaux de Fondations, Dublin, Balkema, Rotterdam, (1): 26-28.
- Delage P. and J. Graham. 1996. Mechanical behaviour of unsaturated soils. *Proc. 1st Int. Conf on Unsaturated Soils, Paris, Balkema, Rotterdam UNSAT' 95* (3): 1223-1256.
- De Ploey, J. and O. Cruz. 1979. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. *Catena* 6: 111-122.
- Dobbs, H. T. and J. M. Yeomans. 1982. Capillary condensation and prewetting between spheres. *Gifu Shika Gakkai Zasshi* 4: 10133-10138.
- Drumright, E. E. and J. D. Nelson. 1995. The shear strength of unsaturated tailings sand. *Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, Balkema, UNSAT'95* (1): 45-50.
- Ellies, A. S. y R. R. Smith. 1998. Evaluación del efecto de cargas sobre un suelo alfisol con diferentes niveles de humedad. *Agricultura Técnica (Chile)* 58 (3): 205-212.
- Escario V. and J. Saez. 1986. The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique* 36: 453-456.
- Espinoza, J. 1970. Estudio de las Series de Suelo y Levantamiento Agrológico del Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepín. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería

- Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela: 42 p.
- Farinha R. 2010. Introducción a la estadística, conceptos básicos y teoría práctica. [www.arfsoft.com.uy](http://www.arfsoft.com.uy). 30 p.
- Faure, A. 1981. New conception of plastic and liquid limits of clay. *Soil and Tillage Research* 1: 97-105.
- Fermín, 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. 78 p.
- Fisher, J. E. 1964. Evidence of circumnutational growth movements of rhizomes of *Poa pratensis* L. that aid in soil penetration. *Canad. J. Botl.* 42: 293-299.
- Fontaine, E. R. and N. J. Brown. 1959. Shearing resistance of top soils under small normal loads. *Journal of Agricultural Engineering Research* 4 (1): 53-59.
- Fredlund, M. D.; D. G. Fredlund and G. W. Wilson. 1997. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain size distribution and volume-mass properties. Proc. 3<sup>rd</sup> Brazilian Symp. Unsaturated Soils NSAT'97, Brazil.
- Gan, J. K.; M. D. Fredlund and H. Rahardjo. 1988. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal* 25 (3): 500-510.
- Gibson, R. E. 1953. Experimental determination of the true cohesion and true angle of internal friction in clays. *Proceeding 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Switzerland*, 1: 126-131.
- Goering, C. E.; M. L. Stone, D. W. Smith and P. K. Turnquist. 2003 Off-road vehicle engineering principles. Editorial ASAE, Michigan, p. 474.
- Greacen, E. L. and R. Sands. 1980. Compaction of forest soils. A review. *Aust. J. Soil Res.* 18: 163-169.
- Hawking, R. R. and, O. J. Pendleton. 1983. The regression dilemma. *Commun. Stat. Theo. Meth.* 12: 497-527.
- Heyman, J. 1998. Coulomb's analysis of soil thrust. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Paper 11431. Geotech. Engng.* 83-88.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Acad. Press, N.Y. USA. 413 p.
- Horn, R. 1988. Compressibility of arable land. In: Drescher, J.; Horn, R.; de Boodt, M. (eds.). *Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement* 11: 53-71.
- Hossne, G. A. J. 2008a. Fisicomecánica y las Implicaciones Agrícolas de los Suelos de Sabana del Estado Monagas, Venezuela. Trabajo de Ascenso para Titular. Biblioteca del Núcleo de Monagas de la Universidad de Oriente. Dos (2) Tomos. 442 p.
- Hossne, G. A. J. 2008b. Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola* 8 (1): 107-117.
- Hossne, G., A. J.; J. Christopher, E. Santaella y J. Malaver. 2002. Evaluación de la resistencia terramecánica a tres presiones laterales de cámara de un suelo ultisol de sabana del estado Monagas. *Revista UDO Agrícola* 2(1): 73-78.
- Hossne, A y J. Salazar. 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.
- Hough, B. K. 1969. *Basic soils engineering*. Second Edition. The Ronald Press Company, New York. USA. 634 p.
- Hunt, R. E. 1986. *Geotechnical engineering analysis and evaluation*. McGraw-Hill, Technology & Engineering, New York. USA. 729 p.
- Islam T.; Md. S. Islam and Md. N. Hoque. 2006. Properties of some selected soil under Mymensingh District in Bangladesh. *Journal of Agriculture and Rural Development* 4 (1&2): 149-154, ISSN 1810-1860.
- Kézdi, Á. 1974. *Handbook of soil mechanics*. Elsevier Scientific Publishing Company. 288 p.
- Kobayashi, Y.; M. Kobashi and N. Kanetake. 2008.

- Reactive infiltration of tin powder preform with molten aluminum for the fabrication of nitride ceramics Composite. *Materials Transactions*, 49 (7): 1616-1620.
- Lambe, W. T. and R. V. Whitman. 1979. *Soil mechanics, SI Version*. John Wiley and Sons. 553 p.
- Lenaerts, T.; A. Bart and Ph. Dutr . 2008. Porous Flow in Particle-Based Fluid Simulations, *ACM Transactions on Graphics* 27 (3). 8 p.
- Ma toug A.; S. Leroueil and P. La Rochelle. 1996. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil. *G otechnique* 45 (3): 465-477.
- Maaitah O. N. 2012. Soil-water characteristic curve model-silty sand soil. *Jordan Journal of Civil Engineering* 6 (1): 54-67.
- Mata, R. A. 1992. *Fundamentos para el manejo de los suelos llaneros del Oriente de Venezuela*. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 292 p.
- Micklethwait, E. W. E. 1944. *Soil mechanics in relation to fighting vehicles*. Military Coll. of Science, Chobham Lane, Chertsey.
- Orr, F. M.; L. E. Scriven and A. P. Rivas. 1975. Pendular rings between solids, meniscus properties and capillary force. *J. Fluid Mech.* 67 (4): 723-742.
- Ranjit, K. P. 2005. *Multicollinealidad: Causes, effects and remedies*. Roll No. 4405. LA.S.R.I, Library Avenue, New Delhi-110012. India.
- Razouki S. S. and D. K. Kuttah. 2007. Strength erosion of a fine-grained gypsiferous soil during soaking. *The Arabian Journal for Science and Engineering* 32 (1B): 147-152.
- Reickoski, D. C.; W. B. Voorhes and J. K. Radke. 1981. Unsaturated water flow through a simulated wheel track. *Sci. Soc. Am. J.* 45: 3-8.
- Rucks, L.; F. García, A. Kapl n, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay. Montevideo, Uruguay. 68 p.
- Sands, R.; E. L. Greaten and C. J. Gerard. 1979. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. I. A penetrometer study. *Ausr. J. Soil Res.* 17: 101-13.
- Shahangian S. 2011. Variable cohesion model for soil shear strength evaluation. Pan-Am CGS, Geotechnical Conference. DBA, Engineering Limited, Toronto, Ontario. 9 p.
- 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. 83 p.
- Solanas, A.; L. Salafranca, J. Fauquet y M. I. N n ez. 2004. *Estadística descriptiva en ciencias del comportamiento*. Madrid: Thompson. antonio.solanas@ub.edu.
- Toll D. G. 2000. The influence of fabric on the shear behavior of unsaturated compacted soils. *In: Advances in Unsaturated Geotechnics*, ASCE Geotechnical Special Publication 99, 222-234.
- Ugbe F. C. 2011. Effect of multicyclic compaction on cohesion in lateritic soils. *Arch. Appl. Sci. Res.* 3 (3): 115-121.
- Van Doren, D. M. 1976. Influence of traffic on soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 595-597.
- Voorhees, W. B. and M. J. Lindstrom. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:152-156.
- Wiersum L. K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant and Soil* 9: 75-85.