

Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana

Américo J. Hossne*, G. Paredes*, R. Carvajal, E*. Santaella*, J. Malaver*

RESUMEN

El objetivo consistió en evaluar: La cohesión aparente (C) versus el ángulo de fricción interna (ϕ), la densidad aparente seca (ρ_s), la tensión normal (σ), la humedad del suelo (w) y la profundidad (Pro). Metodológicamente el triaxial se utilizó para evaluar a C, ϕ , ρ_s , σ y w y estadísticamente la regresión lineal, regresión paso a paso, análisis de variancia, mínima diferencia significativa y el análisis para el mejor subconjunto. Entre los resultados se obtuvo una cohesión aparente máxima de 98,05 kN•m⁻² con tensión normal de 835,58 kN•m⁻² y humedad de 6,12 %; y de 68,31 kN•m⁻² con densidad aparente seca de 1640 kg•m⁻³ y humedad de 6,04 %. Se registró un ángulo fricción interna entre 31,77° y 33,31°. Las ecuaciones regresionales obtenidas fueron: $C = -1,503*(\rho_s*w) - 139,307*\rho_s + 298,149$ y $\tau = 0,022*(\sigma*\phi) + 0,024*(C*\phi) - 1,224*\phi + 4,317$. El orden de influencia, para el mejor subconjunto, de los regresores independientes sobre la cohesión fue w, ρ_s ; también, w, σ , Pro y sobre la tensión cortante (τ) fue w, σ , ϕ , C, Pro. Se concluyó: (a) la humedad y la densidad aparente seca fueron las que más influyeron sobre la cohesión aparente, (b) sobre la tensión cortante fueron el ángulo de fricción interna y los efectos combinados ($\sigma*\phi$) y ($C*\phi$), y (c) significativamente los mayores valores de la cohesión, tensión normal y cortante se lograron a la profundidad de 60 cm. Se conjeturó que las variables C y ϕ actúan independientemente sobre la resistencia del suelo estudiado.

ABSTRACT

The objective consisted in assessing: cohesion (C) versus the internal friction angle (ϕ), bulk density (ρ_s), the normal stress (σ), soil moisture (w) and depth (Pro). Methodologically the triaxial was used to evaluate C, ϕ , ρ_s , σ and w, and statistical linear regression, step wise linear regression, variance analysis and least significant difference and the best subset analysis. The results yielded a maximum apparent cohesion of 98,05 kN • m⁻² with normal tension of 835.58 kN • m⁻² and humidity of 6,12 % and 68,31 kN • m⁻² with density dry bulk 1640 kg • m⁻³ and 6.04 % moisture. There was an internal friction angle between 31,77° and 33,31°. The regression equations obtained were: $C = -1,503*(\rho_s*w) - 139,307*\rho_s + 298,149$ y $\tau = 0,022*(\sigma*\phi) + 0,024*(C*\phi) - 1,224*\phi + 4,317$. The order of influence, for the best subset, of the independent regressors upon cohesion, were w, ρ_s ; too, w, σ , Pro and for shear stress (τ) was w, σ , ϕ , C, Pro. It was concluded: (a) soil water content and dry bulk density were the most influenced the apparent cohesion, (b) on the shear stress were the angle of internal friction and combined effects ($\phi \sigma$) and ($C * \phi$), and (c) higher significantly values of cohesion, normal and shear stress were obtained at a depth of 60 cm. It was conjectured that the variables C and ϕ act independently on soil strength.

Recibido: 20 de octubre de 2009
Aceptado: 30 de octubre de 2011
Artículo basado en las instrucciones para autores vigentes hasta junio de 2011

INTRODUCCIÓN

La cohesión verdadera se cree es causada por la atracción molecular entre las partículas, y la cohesión aparente es debido a la tensión superficial del agua. Se ha estimado que los suelos agrícolas franco arenosos carecen de cohesión. Se considera que la cohesión es una propiedad de las arcillas de los tipos expansibles poco o muy poco existentes en los suelos franco arenosos, a excepción de la presente arcilla caolinita considerada inexpandible. Al respecto

Palabras clave:

Resistencia; densidad seca; ángulo de fricción; profundidad; humedad.

Keywords:

Soil resistance; bulk density; friction angle; soil depth; water content.

* Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad de Oriente. Monagas, Venezuela. Apartado Postal 414, Monagas, Venezuela 6201-A. Correos electrónicos: americohossnegarcia@gmail.com, americohossne@cantv.net

Smith (1990) reportó entre un 70 % - 80 % de arcillas caoliníticas y de un 5 % - 10 % de feldespatos para el suelo objeto de estudio. Muchas investigaciones que relacionan el rendimiento de los cultivos, el crecimiento radical y el desarrollo vegetativo con la densidad aparente seca, o con la resistencia del suelo al penetrómetro; lo hacen sin contemplar la humedad edáfica. La densidad aparente seca, una forma de medir el estado de compresibilidad, se basa en la reducción de los poros aeríferos, considerados por Wiersum (1962) y Fisher (1964) como poros de 3 mm. Roseberg y McCoy (1990) reportaron que los suelos franco arenosos finos con macroporos mayores de 1 mm contaban con una permeabilidad aerífera superior que los que carecían de macroporos. Muchos problemas importantes en la administración de suelos agrícolas que afectan las propiedades físicas se asocian con los tipos y las cantidades de las arcillas y las bases intercambiables en el suelo. El aumento de la densidad aparente, resultante de la manipulación mecánica como ocurre con la labranza y el tráfico, es fuertemente afectado por el nivel de humedad del suelo. En contenido de humedad alto, el suelo pierde su fuerza de cohesión, se convierte en plástico y si sigue aumentado el contenido de humedad pierde sus propiedades plásticas aproximándose a un líquido en sus características mecánicas. El control de la erosión eólica se logra con dos frentes: la reducción de la velocidad del viento a nivel del suelo, y aumentar la cohesión del suelo, mejorando así su resistencia. Los suelos franco arenosos, ricos en partículas entre 10 y 100 micras de tamaño, son los más vulnerables (Bagnold, 1937). La disminución de la erosión con el contenido de humedad reportado por Ademosun (1990) para un suelo franco arenoso, se produjo en la región donde la máxima cohesión del suelo fue producida por las moléculas de agua. Ademosun (1990) informó que la erosión eólica se redujo de forma lineal con el aumento de la humedad del suelo dentro del rango de 12 % a 16 % en un suelo franco arenoso. Gupta y Surendranath (1989) reportaron que la erosión eólica aumentaba gradualmente con el contenido bajo de humedad del suelo de alrededor 6,9 % hasta alcanzar 18,9 %. El contenido de humedad del suelo, densidad aparente seca, el índice de plasticidad y el contenido de materia orgánica tienen un gran efecto en la cohesión del suelo. Además, la raíz de la planta también afecta a la cohesión del suelo. Es por eso que la cohesión de la capa superficial del suelo saturado en tierras de cultivo y arbustos es menor (Xu Mingxiang *et al.*, 2002). Ariel y colaboradores, (2011) reportaron que las resistencias mecánicas del suelo vertisol, por ellos investigado, disminuyó en la medida que aumenta el contenido de humedad, sin embargo la misma aumentó en la medida que el suelo estaba más denso o compacto, y que los valores de la cohesión y fricción interna fueron ligeramente mayores cuando se obtienen mediante un

ensayo de compresión triaxial, en comparación con los obtenidos de un ensayo de cortante horizontal. En términos generales, la erosión del suelo muestra una relación negativa con la cohesión del suelo. Cohesión del suelo está relacionada con el tipo de suelo, materia orgánica, contenido de agua del suelo y así sucesivamente (Brunori, *et al.*, 1989). Experimentalmente se ha demostrado que la atracción molecular entre partículas es insignificante a una distancia de 10^{-6} cm. Phillips y Young (1973) y William y colaboradores (1979), encontraron que para suelos arcillosos un cambio de humedad de 23,5 % a 21,3 % se produjo una cohesión de $9,6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ y $17,7 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Daguar (1976) investigando el suelo franco arenoso de sabana, encontró para la cohesión un valor de $54,89 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ con el cilindro torsional y $2,46 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ con la prueba directa, no especificó el contenido de humedad pero hizo hincapié en su influencia inversa para la cohesión. Battika (1985) reportó para el suelo franco arenoso de sabana, objeto de estudio, un valor de la cohesión aparente seca de $37,73 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ a 10,5 % de humedad con el cilindro torsional *in situ* y $15,55 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ para una humedad 10,08 % con el uso del aparato de corte horizontal. El objetivo general consistió en inquirir el proceso resistente de los suelos agrícolas en función de la cohesión involucrando algunos parámetros físicos mecánicos y la inferencia de la humedad. El objetivo específico consistió en evaluar la cohesión aparente (C) versus el ángulo de fricción interna (ϕ), la densidad seca (ρ_s), la tensión normal (σ), la humedad del suelo (w) y la profundidad en un suelo agrícola franco arenoso de sabana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en las sabanas franco arenosas de Jusepín, estado Monagas en Venezuela, situada 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 $27,5^{\circ}\text{C}$. Bajo una vegetación típica de sabana: Chaparro (*Curatella americana* (Dilleniaceae)), Merey (*Anacardium occidentale*), Paja Peluda (*Trachypogon* y *Axonopas* sp), Manteco (*Byrsonima crassifolia* Malpighiaceae), Mastranto (*Hyptis suaveolens* Lamiales), Gramineous, Ciperaceas, etc. El área del suelo en estudio seleccionado pertenece a las condiciones de un Ultisol y al subgrupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertérmico. Estos suelos son utilizados en la explotación de muchos rubros como: maíz, sorgo y pastizales, con labores de encalado y fertilización. Las tablas 1 y 2 muestran las características físicas y químicas del suelo en estudio. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango establecido por Estrada (1965) y Rucks y colaboradores (2004).

Tabla 1. Componentes físicos en porcentajes y diámetro promedio en mm de las partículas del suelo de sabana investigado 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	

Tabla 2. Perfil químico del suelo de sabana investigado del estado Monagas, Venezuela.

Profundidad cm	pH en pasta H ₂ O	pH en pasta KCL	Materia Orgánica		P Soluble en Ácido Cítrico ppm	Cationes cambiabiles m.e.q/ 100 g de suelo						C.I.C m.e.q por 100 de suelo Mg	Satura- ción de bases Na	Satura- ción de acidez K
			C ₄ Orgánico	N ₂		Ca	0,40	0,12	0,06	AL ⁺³	H ⁺			
			%	%		g	%	%						
0 - 15	4,70	3,90	0,38	0,04	1,85	0,79	0,31	0,10	0,04	0,68	0,55	2,60	52,69	47,31
15 - 30	4,70	3,90	0,27	0,03	1,23	0,40	0,37	0,04	0,03	0,84	0,68	2,37	35,86	64,14
30 - 45	4,70	3,90	0,20	0,02	1,23	0,51	0,24	0,02	0,03	0,96	0,71	2,62	36,26	63,74
45 - 60	4,80	3,90	0,13	0,01	1,23	0,28	0,24	0,01	0,03	0,96	0,76			

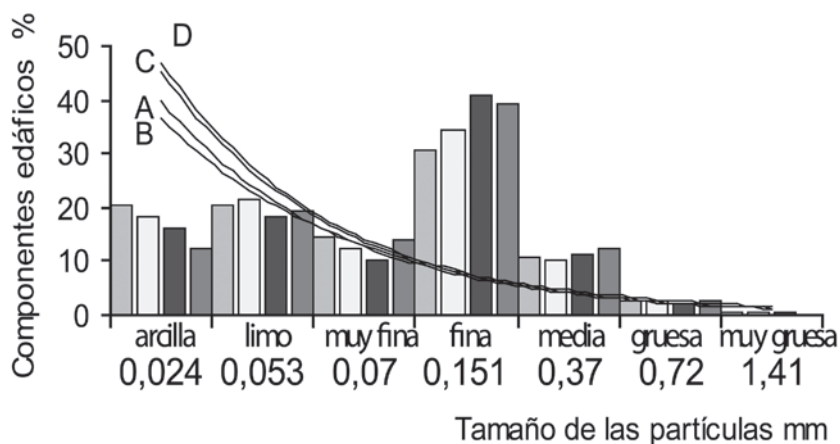


Figura 1. Contenido de arcilla, limo, arena muy fina, arena fina, arena media, arena gruesa y arena muy gruesa respectivamente versus el tamaño de las partículas, en los cuatro horizontes del suelo objeto de estudio. Las tendencias del tamaño de las partículas versus profundidad son: (A) de 0 cm - 15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

En la figura 1 se visualiza 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 encuentra a la profundidad entre 45 cm y 60 cm.

El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), donde se practicó una estratificación de los suelos 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 de muestreo se realizó un muestreo del horizonte comprendido entre 0,00 m - 0,30 m y 0,30 m - 0,60 m, tomando muestras al azar del mismo. Las pruebas triaxiales se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar, estado Bolívar. En el triaxial se utilizaron 120 muestras para la función $C = f(w, \sigma, \phi, \rho_s)$ y 42 para la función $C = F(\phi, \rho_s, w)$.

La expresión matemática que relaciona la presión principal (σ_1) (igual a la presión principal de cámara (σ_3) más la carga del pistón (P), la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ), está dada por:

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

Se estableció comparación con la ecuación general de la línea recta $Y = A + B*X$, obteniéndose:

$$C = \frac{(\sum \sigma_1 - \sum \sigma_3) \frac{N \sum \sigma_1 * \sigma_3 - \sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{N \sum \sigma_3^2 - (\sum \sigma_3)^2}}{2 * \sqrt{\frac{N \sum (\sigma_1 * \sigma_2) - \sum \sigma_1 \sum \sigma_2}{N * \sum \sigma_3^2 - (\sum \sigma_3)^2}}} \quad (2)$$

$$r = \frac{N * \sum (\sigma_1 * \sigma_3) - \sum \sigma_1 * \sum \sigma_3}{\sqrt{(N * \sum (\sigma_3)^2 - (\sum \sigma_3)^2) * (N * \sum (\sigma_1)^2 - (\sum \sigma_1)^2)}} \quad (3)$$

Con la aplicación de regresión lineal para los valores de (σ_1) y (σ_3), obtenidos a nivel de laboratorio con el equipo triaxial, se obtuvo la cohesión para cada análisis, en donde N representó el número de datos y r el coeficiente de regresión lineal. Se utilizó la regresión lineal, regresión lineal paso a paso, el análisis para el mejor subconjunto, el análisis de varianza para la cohesión aparente, la tensión normal, y la tensión cortante ajustado por la profundidad y humedad del suelo y el análisis de mínima diferencia significativa (MDS) con comparaciones apareadas de $p \leq 0,05$ ajustada con respecto a las profundidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se modeló la función $C = f(\rho_s, \phi, w, \rho_s * \phi, \rho_s * w, \phi * w)$, las variables independientes, densidad aparente seca, ángulo de fricción, humedad y tres efectos combinados respectivamente. Se le aplicó el método de regresión lineal paso a paso con el criterio de probabilidad de F para 0,01 de entrada y 0,05 de salida. Se obtuvieron dos modelos: para el primero con la variable predictora introducida $\rho_s * w$ con un r^2 de 0,859, significancia de 0,000 un Durbin-Watson de 1,883, FIV de 1,000 y un índice de condición de 0,03 para la constante y de 6,068 para la variable $\rho_s * w$, y para el segundo con la variable introducida ρ_s con un r^2 de 0,978, significancia de 0,000, un Durbin-Watson de 1,883, FIV de 1,324 y un índice de condición de 1,000 para la constante y de 6,631 para la variable $\rho_s * w$ y 72,371 para la variable ρ_s . La variable independiente humedad (w) excluida en ambos modelos

con un FIV de 192,117 en el modelo 1 y de 2986,441 en el modelo 2. Esto podría indicar que la variable independiente humedad (w) fue responsable de la alta colinealidad producida. Las ecuaciones lineales de regresión producidas fueron $C_{\text{MODELO1}} = -2,185 * (\rho_s * w) + 62,722$ y $C_{\text{MODELO2}} = -1,503 * (\rho_s * w) - 139,307 * \rho_s + 298,149$, con una significancia de 0,000 para todas las variables independientes. Se nota que el ángulo de fricción interna no entró en ninguno de los dos modelos, menos sus efectos combinados; indicando esto que la cohesión aparente del suelo objeto de estudio no fue influencia por la fricción.

Se constituyó la función $\tau = f(C, \sigma, \phi, w, C * \sigma, C * \phi, C * w, \sigma * \phi, \sigma * w, \phi * w)$, las variables independientes cohesión aparente, tensión normal, ángulo de fricción interna, humedad y seis efectos combinados respectivamente. Se le aplicó el método de regresión lineal paso a paso con el criterio de probabilidad de F para 0,01 entrada y 0,05 de salida. Se obtuvieron tres modelos: para el primer con la variable predictora $\sigma * \phi$ con un r^2 de 0,996, significancia de 0,000, un Durbin-Watson de 0,923, FIV de 1,000 y un índice de condición de 1,000 para la constante y de 3,243 para la variable $\sigma * \phi$, para el segundo con la variable predictora introducida $C * \phi$ con un r^2 de 1,00, significancia de 0,000, un Durbin-Watson de 0,923, FIV de 5,832 y un índice de condición de 1,000 para la constante y de 2,693 para la variable $\sigma * \phi$ y 8,818 para la variable $C * \phi$ y para el tercer modelo con la variable predictora introducida ϕ con un r^2 de 1,00, significancia de 0,000, un Durbin-Watson de 0,923, FIV de 5,832 y un índice de condición de 1,000 para la constante, de 3,024 para la variable $\sigma * \phi$, 7,716 para la variable $C * \phi$ y 29,887 para ϕ . La variable independiente humedad (w) excluida en todos los modelos con un FIV de 10,344 en el modelo 1, de 14,166 en el modelo 2

y de 21,135 en el modelo 3. Esto podría indicar que la variable independiente humedad (w) fue responsable de la colinealidad producida. Las ecuaciones lineales de regresión producidas fueron $\tau_{\text{MODELO1}} = 0,023*(\sigma*\phi) - 18,920$, $\tau_{\text{MODELO2}} = 0,020*(\sigma*\phi) + 0,036*(C*\phi) - 4,485$, y $\tau_{\text{MODELO3}} = 0,022*(\sigma*\phi) + 0,024*(C*\phi) - 1,224*\phi + 4,317$ con una significancia de 0,000 para todas las variables independientes predictoras. Se nota que la cohesión aparente sólo entró en los modelos 2 y 3 como efecto combinado; indicando esto que el ángulo de fricción interna influye más que la cohesión aparente sobre la tracción, resistencia y tenacidad al crecimiento radical en el suelo objeto de este estudio.

Una medida común para evaluar la colinealidad de parejas o de múltiples variables es el valor del factor de inflación de la varianza (VIF). Al respecto, una regla empírica citada por Kleinbaum y colaboradores (1988); Zapata y colaboradores (2004); Hair y colaboradores (1999) consiste en considerar que existen problemas de colinealidad si algún FIV es superior a 10. Según Adnan y colaboradores (2006), el valor de VIF mayor de diez (10) es una indicación de multicolinealidad. Para Belsley los índices de condición entre 5 y 10 están asociados con una colinealidad débil, mientras que índices de condición entre 30 y 100 señalan una colinealidad moderada a fuerte. Los índices de condición altos (mayores que 30) indican el número de colinealidades y la magnitud de los mismos mide su importancia relativa. Si un componente tiene un índice de condición mayor de 30 y dos o más variables tienen una proporción de varianza alta en el mismo, esas variables son colineales. El estadístico de Durbin-Watson está siempre entre 0 y 4. Un valor de 2 significa que no hay autocorrelación en la muestra. Valores cercanos a 0 indican autocorrelación positiva y los valores mayores de 4 indican autocorrelación negativa (Durbin y Watson (1950); Savin y White (1977)). No hay dudas que la variable independiente w tiene una alta acción colineante, posiblemente debido a su efecto en los componentes físicos y terramecánicos del suelo. Braunack y Williams (1993), en una de sus conclusiones manifestaron que el contenido inicial de agua es importante en la determinación de la resistencia del suelo y de su perturbación. Según Hossne (2008) las densidades aparentes de un suelo franco arenoso fueron alteradas y variaron en forma inversamente proporcional con la humedad.

El análisis de correlación lineal produjo signos diferentes a los derivados al realizarse la regresión lineal, posiblemente debidos a reajustes entre las demás variables, producto de la alta multicolinealidad. Se utilizaron dos procedimientos recomendados por Adnan y colaboradores (2006): primeramente utili-

zando, en lugar de las variables, la diferencia entre la variable y la media; sin embargo, aunque se redujo el VIF no hubo respuesta satisfactoria; segundamente, se eliminó el factor w en el análisis de regresión; los valores de VIF se redujeron. Indicando esto último la gran influencia de la humedad sobre las otras variables independientes, lo cual creó los efectos de multicolinealidad que no se pudieron eliminar.

El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, la variable independiente w forzada y las variables σ , ϕ y Pro libres, produjo en el orden de influencia: w , σ , ϕ y Pro para la variable dependiente C . El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, la variable independiente w forzada y las variables ρ_s , y ϕ libres, produjo en el orden de influencia: w , ρ_s , y ϕ para la variable dependiente C . Bateman y colaboradores (1965), encontraron que los valores de tensión cortantes obtenidos con baja tensión normal eran mayores en magnitud que la aplicada tensión normal, lo cual indicó que la cohesión es primordialmente responsable de la tensión cortante registrada, la cual aumentó con el incremento de la densidad seca. El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, con la variable independiente w forzada y las variables C , σ , ϕ y Pro libres, produjo para la variable dependiente τ su dependencia de las variables independientes en el siguiente orden de influencia: w , σ , ϕ , C y Pro.

De acuerdo a Ranjit (2005) y Hawking y Pendleton (1983), si el objetivo es simplemente predecir a Y de un conjunto de variables X , la multicolinealidad no es problema, la predicción sería exacta, y el r^2 general (r^2 ajustado) cuantifica lo bien que el modelo predice a Y ; pero si el problema es entender como los valores de X impactan a Y , entonces multicolinealidad es un gran problema. Sin embargo, se obtuvo $\tau_{\text{determinado}} \approx \tau_{\text{calculado}}$ con correlación de 0,9999 y $C_{\text{determinado}} \approx C_{\text{calculado}}$ con correlación de 0,9561.

La tabla 3 presenta el análisis de los promedios por mínima diferencia significativa y análisis de variancia (ANDEVA) para la cohesión aparente, tensión normal y la tensión cortante para el suelo objeto de estudio. Se observa que los valores mayores ocurrieron significativamente a la profundidad de 60 cm. Esto era de esperarse al observar en la figura 1 que el tamaño de las partículas disminuyó al profundizar para el suelo objeto de estudio. Todas fueron altamente significativas con respecto a la humedad. Seguel (2004) encontró para un suelo andisol una cohesión aparente de 18,4 kN/m² a 24,2 kN/m² a la profundidad de 0 cm - 15 cm, y de 3,0 kN/m² a 32,3 kN/m² entre 40 cm - 55 cm.

Tabla 3.

Análisis de los promedios por mínima diferencia significativa y análisis de variancia (ANDEVA) para la cohesión aparente, tensión normal y la tensión cortante para el suelo objeto de estudio.

Tratamiento	Cohesión (kN/m ²)		Tensión normal (kN/m ²)		Tensión cortante (kN/m ²)	
	Media	Grupo	Media	Grupo	Media	Grupo
Pro	Media	Grupo	Media	Grupo	Media	Grupo
60	25,466	A	495,97	A	313,28	A
30	18,651	B	449,32	B	254,26	B

Mínima diferencia significativa (MDS). Comparaciones apareadas ($p \leq 0,05$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes. Valor crítico T 1,980

ANDEVA para la cohesión aparente (C)

Fuente	G L	Suma de cuadrado	Cuadrado medio	F	P
Profundidad	1	1330,4	1330,4	6,89	0,0098
Humedad	1	40347,2	40347,2	208,84	0,0000
Error	117	22603,7	193,2		
Total	119	Media = 22,058	Coeficiente de variación (CV) = 63,01		

ANDEVA para la tensión normal (σ)

Fuente	G L	Suma de cuadrado	Cuadrado medio	F	P
Profundidad	1	62 339	62 339	16,43	0,0001
Humedad	1	4 559 211	4 559 211	1201,28	0,0000
Error	117	444 050	3 795		
Total	119	Media = 472,64	CV = 13,03		

ANDEVA para la tensión cortante (τ)

Fuente	G L	Suma de cuadrado	Cuadrado medio	F	P
Profundidad	1	99 785	99 785	20,01	0,0000
Humedad	1	4 539 846	4 539 846	910,20	0,0000
Error	114	583 565	4 988		
Total	119	Media = 283,77	CV = 24,89		

La densidad aparente seca con media de 1,7881 g/cm³ y CV de 0,46 y el ángulo de fricción interna con media de 24,50° y CV de 12,56.

La figura 2 presenta la relación de la cohesión versus la humedad, tensión normal y el ángulo de fricción interna; se observa la influencia de la humedad y la tensión normal sobre la cohesión. El ángulo de fricción interna alcanza sus mayores valores a bajas humedades y alta tensión normal; la cohesión y la fricción son parámetros independientes uno del otro, al considerar que pueden existir separadamente. Según Clare (2004) la cohesión es producida por las fuerzas de amarre de las partículas, y es independiente de la tensión normal. La cohesión en este suelo es capilar. Lambe y Whitman (1979) y Echeverría (2005), reportaron que la humedad puede introducir una cohesión aparente entre las partículas por capilaridad. Estos resultados son revelados en la figura 2.

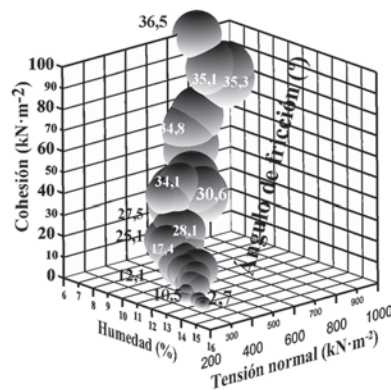


Figura 2. La cohesión aparente en relación con la humedad gravimétrica, la tensión normal y el ángulo de fricción interna del suelo franco arenoso de sabana investigado. Estado Monagas, Venezuela.

Las arenas poseen una cohesión significativa, que le permite mantenerse con un talud vertical, pero es un estado inestable (Caquot y Kerisel, 1969 y Guillén, 2004). Se observa que los valores máximos de la cohesión aparente se produjeron a humedades bajas. El punto de marchitez para estos suelos encontrado por Gaspar (1983) fue de 6,19 % y para Fermín (1971) fue de 5,53 %. Es de hacer notar que la capacidad de campo de estos suelos se encuentran entre 11 y 12 %. Espinoza (1970) determinó la capacidad de campo para el suelo ultisol de sabana, encontrando: 11,70 % (0 - 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 y 0,50 m, para Mata (1992) fue de 11,7 % entre 0 y 0,70 m y para Hossne y Salazar (2004) de 12,6 % entre 0 y 0,60 m. El límite plástico para estos suelos se encuentra entre 12,92 y 14,04 (Hossne y Salazar, 2004). Al analizar las informaciones citadas arriba, se podría decir que el comportamiento de la cohesión aparente en función de la humedad comienza a hacerse cero en las cercanías del límite plástico. Fountaine y Brown (1959), en pruebas en arenas con uso de una caja torsional de corte, registró una cohesión aparente 390 kN/m² y de 230 kN/m² a una humedad de 9 %; Shoop (1993) reportó una cohesión de 14,8 kN/m² con el método directo de corte y de 6,5 kN/m² y 17,4 kN/m² con el triaxial indrenado y drenado respectivamente, no mencionó la humedad.

La figura 3 muestra la relación entre la cohesión registrada a la profundidad de 0 cm - 30 cm y 30 cm - 60 cm. Se observa que para la humedad de 10,5 % la cohesión fue de 21,724 kN/m² para ambas profundidades; de aquí en adelante con el aumento de la humedad, la cohesión

empezó a acercarse a cero con menores valores para la profundidad de 30 cm - 60 cm, y para la disminución de la humedad la cohesión aumentó exponencialmente. Este comportamiento fue debido a que el contenido de caolinita aumenta con la profundidad y que la cohesión es capilar. Hossne (2008) reportó que el contenido de arcilla caolínica de estos suelos aumenta al profundizar.

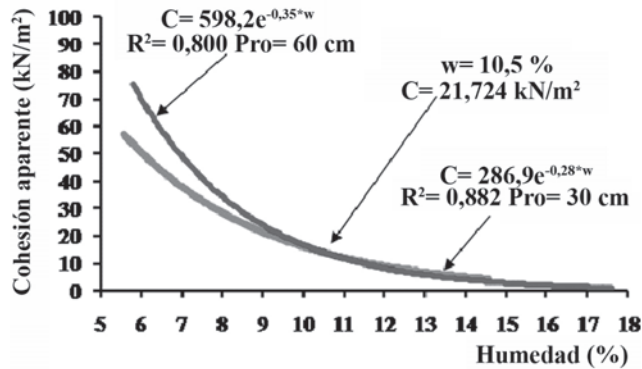


Figura 3. Cohesión aparente versus la humedad gravimétrica del suelo objeto de estudio.

Se creó un polinomio de tercer grado de trece términos para $C = F(w, \rho_s)$; en donde C , w y ρ_s representaron la cohesión aparente, la humedad gravimétrica y densidad aparente seca respectivamente. Al permitir la regresión múltiple la optimización del polinomio creado, los términos w , ρ_s , $w^2 \rho_s$, w^2 , ρ_s^2 , $w^3 \rho_s^2$ y w^3 fueron eliminados con valores de P mayores de 0,05, para forjar un polinomio de tercer grado con cinco términos mostrado en la ecuación 4, con un R^2 de 96,37, R^2 ajustado de 95,98, un error estándar de 3,53, un error absoluto de 2,32, estadístico Durbin-Watson = 1,71859 ($P=0,1396$) y autocorrelación de residuos en retraso 0,137675. Puesto que en el estadístico Durbin-Watson el valor- P es mayor que 0,05, evidencia que no tuvo indicación de una autocorrelación seria en los residuos con un nivel de confianza del 95,0 %. Cada término constó de un P menor de 0,0000, y para la constante de 0,1372. El valor de P para el modelo fue de 0,0000. El modelo matemático muestra que la cohesión es independiente del ángulo de fricción interna. Al aplicar superficie de respuesta a la ecuación 4 se obtuvo la figura 4. Se observa que la cohesión para humedades entre 5 % y 7 % alcanzó sus máximos valores producto de la alta atracción entre las partículas y a la densidad aparente seca entre sus máximos valores. Para humedades superiores al 8 % las líneas de la densidad aparente se horizontalizaron mostrando poca influencia por el efecto de la humedad.

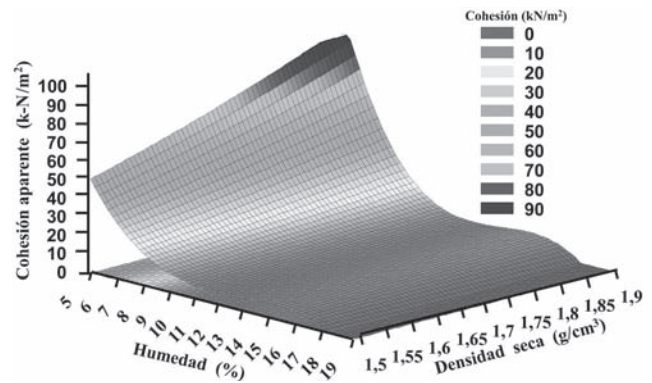


Figura 4. Cohesión aparente versus la densidad aparente seca y la humedad gravimétrica del suelo investigado.

La densidad aparente seca alcanzó sus máximos valores entre $1,75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ y $1,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Los niveles de densidades se lograron con el agregado de agua en el proceso de la preparación de los especímenes utilizados en el triaxial; en donde el efecto Proctor originó el aumento de la densidad seca. Los cambios en el contenido de humedad tienen un efecto más pronunciado que los cambios en la densidad aparente en la cohesión aparente (ASAE, 1971). La cohesión aumenta con el incremento de la densidad aparente seca (ASME, 1971). Seguel y Orellana (2008); Volokitin y Demidov (2010) reportaron, en los suelos estudiados por ellos, que la cohesión aparente aumentó exponencialmente con el incremento de la densidad aparente seca. Proctor (1948) aplicó diferentes cantidades de energía compactante (variando: peso del martillo, altura de caída del martillo y el número de golpes por capas) a un suelo arenoso y a un suelo arcilloso; encontró que los aumentos de la densidad resultaron en continuo aumento de la cohesión para el suelo arcilloso, pero en un pequeño aumento de la cohesión para el suelo arenoso. Panwar y Siemens (1972) en un ensayo de esfuerzo cortante por el método del corte directo concluyeron que el esfuerzo cortante disminuyó con el aumento de la humedad y de la densidad. Ellos encontraron que los valores de la cohesión fueron altos a bajos contenidos de humedad, excepto a la densidad de $1,2 \text{ g} / \text{cm}^3$. Las tendencias mostradas en la figura 4, concuerdan con los resultados obtenidos en suelos arcillosos por Ortiz y Hernanz (1989); Herrera (2006); y Ariel de la Rosa y colaboradores (2010). A pesar de la multicolinealidad se obtuvo $C_{\text{determinado}} \approx C_{\text{calculado}}$ (calculada con la ecuación 4) con coeficiente de regresión lineal de 0,942 y coeficientes de variación de 0,94 y 0,84 para C determinada y C calculada respectivamente.

La resistencia de los suelos es según las ecuaciones de Coulomb: $\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi$ y de Micklethwait (1944):

$H = A \cdot C + V \cdot \tan \phi$, la del suelo objeto de estudio es altamente influenciado por la humedad, el ángulo de fricción interna, la cohesión y la tensión normal. Esto repercute sobre los sistemas tractivos. La cohesión mostró la menor influencia sobre la tensión cortante en el suelo estudiado. Esto implica que los cauchos tractivos de tacos altos, por su costo, no deberían ser utilizados. Ademosun (1990) informó que el tiro disminuyó linealmente con el grado hidrométrico del suelo con un rango de 12 % a 16 % en un suelo franco arenoso. Gupta y Surendranath (1989) informaron que el requerimiento de tiro aumentó gradualmente con un bajo grado hidrométrico de 6,9 % hasta que alcanzó 18,9 %. En este trabajo se obtuvo la mayor cohesión a la humedad entre 6,12 % y 6,69 %. Hossne (2008) reportó para este suelo una zona friable entre 7,63 % y 9,52 %; que indicaría (según la ecuación de la figura 3) un rango de cohesión entre 33,88 kN/m² y 19,96 kN/m² adecuado para la labranza.

CONCLUSIONES

La humedad edáfica fue la variable independiente que más influyó sobre la cohesión. Se obtuvo un valor máximo de 98,05 kN•m⁻² a una humedad de 6,12 %. Cuando la densidad seca fue de 1640 kg/m³, la humedad de 6,04 % y la fricción interna de 33,31°, se produjo una cohesión máxima de 68,31 kN•m⁻². El orden de influencia de las variables independientes w , ρ_s y ϕ sobre la cohesión fue w , ρ_s . El orden de influencia de las variables independientes w , σ , Pro y ϕ sobre la cohesión fue w , σ , Pro. El orden de influencia de las variables independientes w , σ , C, Pro y ϕ sobre la tensión cortante fue w , σ , ϕ , C, Pro. Los mayores valores, con alta significancia, para la cohesión aparente, la tensión normal y la tensión cortante ocurrieron a la profundidad de 60 cm. El ángulo de fricción interna no influyó sobre la cohesión, indicando posiblemente que estos parámetros son independientes terramecánicamente. La cohesión aparente influiría su efecto resistente en las labores agrícolas como en el desarrollo radical sólo a valores bajos de humedad. En el estado friable se podría producir un rango de cohesión entre 33,88 kN/m² y 19,96 kN/m², adecuado para la labranza y el desarrollo radical.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

Ademosun, O. C., (1990). The design and operation of a soil tillage dynamics equipment. *The Nigerian Engineer*. 25 (1): 51-57.

Ariel de la Rosa, A. A., M. Herrera S. y O. González C., (2011). Propiedades macroestructurales de un Vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos (MEF). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 20(2): 27/11.

Bagnold, R. A., (1937). The size-grading of sand by wind. *Proceedings of the Royal Society of London*. 163(913): 250-264.

Bateman, H. P., Naik, M. P. y Yoerger, R. R., (1965). Energy Required to Pulverize Soil at Different Degrees of Compaction. *J. Agr. Eng. Res.* 10:132.

Braunack, M. V. and Williams, B. G., (1993). The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*. 30(4): 299-311.

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.

Belsley, D.A., (1991). *Conditioning Diagnostics: Collinearity and weak data in regression*. John Wiley & Sons.

Boguzas, V., Kairyte, A., and Jodaugiene, D., (2010). Soil physical properties and earthworms as affected by soil tillage systems, straw and green manure management. *Zemdirbyste Agriculture*. 97(3): 3-14. ISSN 1392-3196.

Brunori, F., Penzo, M.C., and Torri, Firenze, D., (1989). *Soil shear strength: its measurement and soil detachability*. Catena.

Caquot, A. y Kerisel, J., (1969). *Tratado de Mecánica de Suelos*. Interciencia, Constanilla de Los Ángeles. 549 p.

Clare, E. K., (2004). *The influence of the clay fraction on the engineering properties of soil, with some suggestion for future research*. Road Research Laboratory, Harmondsworth, Middlesex.

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.

Durbin, J., and Watson, G. S., (1950). Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression, I. *Biometrika* 37: 409-428.

Durbin, J., and Watson, G. S., (1951). Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression, II. *Biometrika* 38: 159-179.

Echeverri O. R., (2005). *Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín*. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Geotecnia, Medellín. 104 p.

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.

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. 78 p.

Fisher, J. E., (1964). Evidence of Circumnutational Growth Movements of Rhizomes of *Poa pratensis* L. that aid in soil Penetration. *Canad. J. Bot.* 42:293-299.

- 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. Monagas, Maturín, Venezuela. 75 p.
- Grim, R. E., (1962). *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill book company, New York. 320 p.
- Guillén, M. C. E., (2004). *Estabilidad de taludes en los departamentos de Guatemala y Alta Verapaz, casos reales*. Trabajo De Graduación. Asesorado por Ing. Carlos Roberto Guillén Lozano. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. 119 p.
- Gupta, C. P and Surendranath., (1989). Stress field in soil owing to tillage tool Interaction. *Soil and Tillage Research*. 13: 123 – 149.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., and Black, W. C., (1999). *Análisis multivariante*. Prentice Hall Iberia, 799 p.
- Herrera, M., (2006). *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias), Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba. 109pp.
- Hossne, A. J., (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. J., (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*. 26(3): 195-202.
- Hossne, A. y 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.
- Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L., and Muller, K. E., (1988). *Applied regression analysis and other multivariable methods*. PWS-KENT Publishing Company.
- Lambe, W. T. and Whitman, R. V., (1979). *Soil Mechanics*, SI Version. John Wiley and Sons. 553 p.
- Micklethwait, E. W. E., (1944). *Soil Mechanics in Relation to fighting Vehicles*. Military Coll. Of Science, Chobham Lane, Chertsey.
- Mingxiang, Xu, Liu Guobin and Hu Weiyin., (2002). *Soil Characteristics and Its Dynamic Variation in a Small Catchment on the Loess Plateau of China*. 12th ISCO Conference. Beijing 2002. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi, 712100 .
- Ortiz, J. y Hernandez, J. L., (1989). *Las máquinas agrícolas y su aplicación*, Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Panwar, J. S. and Siemens, J. C., (1972). Shear strength and energy of soil failure related to density and moisture. *Transaction of the ASAE*. 15(3): 423-427.
- Proctor, R. R., (1948). *The relationship between foot pounds per cubic foot of compactive effort and shear strength of compacted soils*. 2d International Conf. Soil Mech. Proc. 5:219
- Phillips, S. H. and Young, H. M. Jr., (1973). *No-Tillage Farming*. Reiman Associates, Milwaukee. Pp 224.
- Roseberg, R. J. and McCoy, E. L., (1990). Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Science American Journal* 54: 969-974.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M., (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Universidad De La República, Facultad de agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay. Montevideo-Uruguay. 68 p.
- Savin, N. E. and White. K. J., (1977). The Durbin-Watson Test for Serial Correlation with Extreme Sample Sizes or Many Regressors. *Econometrica*, 45(8): 1989-96.
- Seguel, S. O. R., (2006). *Influencia del potencial mátrico en la generación de estructura y resistencia mecánica de suelos derivados de materiales volcánicos*. Tesis Doctoral. Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias Agrarias. Valdivia – Chile. 100 p.
- Seguel, O. y Orellana. I., (2008). Relación entre las propiedades mecánicas de suelos y los procesos de génesis e intensidad de uso. *Agro Sur*. 36 (2) 82-92.
- Shoop, S. A., (1993). *Terrain Characterization for Trafficability*. CRREL Report 93-6 US Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 30 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.
- Volokitin, M. P. and Demidov, V. V., (2010). *Demidov Evaluation of degradation of some agrophysical properties of the gray forest soils*. Institute for Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences, Institutskaya, 2, Pushchino, 142290 Russia <http://www.cost869.alterra.nl/Magdeburg/Volokitin.pdf>. 1 p.
- Wiersum, L. K., (1962). Uptake of nitrogen and phosphorus in relation to soil structure and nutrient mobility. *Plant and Soil*. 16(1): 62-70. ISSN 1573-5036.
- Zapata, A., Cano, J. D. y Rojo, J., (2004). Correlación de medidas obtenidas a partir de sondas de succión y extracto de saturación del suelo regado con aguas salinas. *Ingeniería de Agua* 11(3): 329-338.