

RESISTENCIA TERRAMECÁNICA EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD EDÁFICA DE UN SUELO ULTISOL DE SABANA DEL ESTADO MONAGAS, VENEZUELA

Américo Hossne G.,¹ J. Christopher¹, G. Paredes¹, E. Carvajal¹,
E. Santaella¹, J. Malaver¹ y A. Cova¹

RESUMEN

La resistencia de los suelos agrícolas generalmente es evaluada en función de la compactación al medir la densidad aparente sin hacer referencia de la humedad. La tensión cortante o de cizalleo (τ) es el índice de la resistencia de un suelo a cualquier tipo de carga. Los suelos resisten de forma inversamente proporcional a la humedad para diferentes valores de tensión normal en el plano de falla de acuerdo a la teoría Coulomb-Mohr. Conocer el índice de resistencia de los suelos agrícolas es de utilidad para evaluar los requerimientos tractivos de los aperos, tractores y posiblemente el proceso de crecimiento radical. Los objetivos de este trabajo consistieron en evaluar el esfuerzo de cizalleo a diferentes niveles de humedad edáfica (w) para cada tensión normal (σ) y las interrelaciones con la cohesión aparente (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ) de un suelo agrícola de sabana. Se utilizó un aparato triaxial para determinar τ y un análisis de regresión para interpretar la proporción de la variancia entre los parámetros. Se concluyó que la expresión $\tau = -0,782 w + 1,180 C + 6,745 \phi - 1,152$ fue la mejor para un R^2 ajustado = 1***, que la resistencia τ aumenta al elevar la tensión normal pero es inversamente proporcional a la humedad y tiende a cero cuando el estado del suelo se acerca al límite líquido (alrededor del 17% de humedad para los suelos de sabana estudiados). Estos suelos presentan cohesión a pesar de su alto porcentaje de arena. La humedad edáfica fue el índice que más influyó sobre la resistencia al corte, mientras que el ángulo de fricción interna influyó más que la cohesión aparente sobre dicha resistencia.

Palabras clave adicionales: Implicaciones físicas, trabajabilidad del suelo, triaxial

ABSTRACT

Terramechanic resistance as a function of moisture content of a savanna Ultisol soil in Monagas State, Venezuela

It is usual to evaluate the resistance of agricultural soils as a function of compression when measuring the bulk density without making reference of the soil moisture. The shear strength (τ) is the index of the soil resistance due to any load type. Soils resist in an opposite way to their wetness for different values of normal tension on the failure plane according to the Coulomb-Mohr theory. The index of resistance of the agricultural soils is useful to evaluate the tractive requirements of the farm implements, tractors and, probably, the process of root growth. The objectives of this research consisted on evaluating the shear strength at different levels of soil moisture (w) for each normal tension (σ) and the interrelations with the cohesion (C) and the angle of internal friction (ϕ) of an agricultural soil of savanna. A triaxial apparatus was used to determine τ , and a regression analysis to interpret the proportion of the variance among the different parameters. We concluded that the algebraic expression $\tau = -0.782 w + 1.180 C + 6.745 \phi - 1.152$ was the best for R^2 adjusted = 1***, that the resistance increases when increasing the normal tension but it is inversely proportional to the soil moisture and tends to zero when the state of the soil comes closer to the liquid limit (around 17% of moisture for the studied savanna soils). This soil shows cohesion regardless its high percentage of sand. The soil moisture was the index that most affected the shear strength while the angle of internal friction influenced more than cohesion on the referred soil resistance.

Additional key words: Physical implicatios, soil workability, triaxial

INTRODUCCIÓN

Según Larson y Allmaras (1971) en un suelo arcilloso saturado la cohesión tiene un valor finito pero el ángulo de fricción interna es o se acerca a cero; sin embargo, para suelos agrícolas

insaturados tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna tienen valores finitos. Ellos establecen que mientras la teoría de Mohr-Coulomb es utilizada para describir la línea de falla en suelos insaturados, la teoría no puede ser estrictamente aplicada como tal. La teoría

Recibido: Octubre 1, 2002

Aceptado: Julio 25, 2003

¹ Dpto. de Ingeniería Agrícola. Universidad de Oriente (UDO). Maturín, Venezuela.
email: ahossne@monagas.udo.edu.ve

especifica una relación funcional entre la efectivas o estáticamente macroscópicas tensiones interpartículas mas que tensiones aplicadas. Esto, sin embargo, no ha sido comprobado en todas las situaciones por lo que es necesaria más investigación al respecto para un mejor esclarecimiento.

En muchos estudios concernientes con suelos agrícolas, las tensiones aplicadas que causan fallas cortantes son importantes; por ejemplo, ejecución de los aperos o implementos agrícolas, trafabilidad, erosión y el crecimiento de las raíces de las plantas (Lloyd y Collis-George, 1982). Los estudios de la resistencia al cizalleo de los suelos agrícolas por efecto de la presión que sobre ellos ejercen las raíces han sido poco incursionados. Al respecto, Martino y Shaykewich (1994) establecieron que una resistencia de 2000 kN/m² del suelo es crítica para la penetración radical y que es independiente de la textura; sin embargo, en la mayoría de los casos con resistencias mayores de ésta, las raíces son capaces de crecer utilizando los canales bióticos, los espacios y las heterogeneidades de la estructura del suelo. Zou et al. (2001) concluyeron que la elongación radical decrece exponencialmente con el aumento de la resistencia del suelo cuando el potencial mátrico se mantiene constante.

El estudio de la cohesión aparente, el ángulo de fricción interno y la humedad edáfica son índices físico-mecánicos responsables de la resistencia de los suelos. Como es el caso de las ruedas tractivas de un tractor, cuya efecto es función del suelo (C , ϕ y w) y presión (σ) que ejercen las ruedas. Es por eso que se realiza el lastrado del tractor para aumentar la presión normal y favorecer la transferencia de peso del implemento hacia las ruedas tractivas al emplear el control automático de profundidad.

La resistencia de los suelos es normalmente evaluada por la expresión matemática de Coulomb la cual expresa la tensión cortante de los suelos en función de la cohesión aparente de las partículas de suelo (C) y el ángulo de fricción interno (ϕ) (McKyes, 1989). El criterio de falla de la resistencia de un suelo es conocido como el Círculo de Mohr-Coulomb de tensiones, el cual expone los planos de fallas; la humedad (w) no es considerada en la ecuación, ya que, por lo general, las evaluaciones se hacen con muestras

saturadas por las pruebas realizadas en la ingeniería de la construcción para obtener las tensiones efectivas y la presión de agua de los poros (Towner, 1983).

Los parámetros que conforman la ecuación de Coulomb son útiles para evaluar los requerimientos tractivos de aperos, tractores y deberían considerarse en el proceso de crecimiento de raíces de las plantas. Con fines agrícolas la situación cambia, al considerar que los cambios de humedad son fundamentales. En este trabajo se estudió la influencia de los parámetros C , ϕ , σ y w del suelo sobre su resistencia al corte (τ) y se evaluó el esfuerzo de cizalleo a diferentes niveles de humedad para cada tensión normal así como las interrelaciones con la cohesión y el ángulo de fricción interna de un suelo agrícola de sabana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un muestreo de suelos en la Estación Agrícola Experimental de la Escuela de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Oriente, Jusepín, estado Monagas, Venezuela, situada a 147 msnm, a 9° 41'N y 63° 23'W, con una vegetación arbórea típica de sabana, gramíneas y ciperáceas. El área de trabajo seleccionada presenta un suelo Ultisol de sabana del subgrupo de los Oxic Paleustult familia de temperatura isohipertérmico, en condiciones de suelo virgen. Las pruebas triaxiales se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), donde se practicó una estratificación de los suelos presentes en la estación experimental, en el cual el estrato que corresponde a la Unidad Maturín está clasificado como Unidad II con textura superficial franco arenosa, comprendida en una superficie aproximada de 55 ha. Se perforaron 20 calicatas al azar para la recolección de las muestras en un área de aproximadamente tres hectáreas. En cada una de las calicatas el muestreo (dos cilindros por estrato con el uso del Uhland) se realizó en cada horizonte comprendido entre 0,00-0,15 m, 0,15-0,30 m, 0,30-45 m y 0,45-0,60 m de profundidad, respectivamente. Para el análisis triaxial se conformó una muestra compuesta. El

Cuadro 1 muestra los promedios de los componentes físicos con sus respectivas dimensiones de presencia y tamaños, el cual caracteriza el perfil físico del suelo en estudio.

Cuadro 1. Componentes físicos y diámetro de partículas por profundidad del suelo Ultisol II de sabana del estado Monagas

Profundidad cm	Componentes edáficos (%)							
	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla	Materia orgánica
0 - 15	0,22	2,91	12,18	39,13	13,93	19,43	12,2	0,94
15 - 30	0,52	2,23	11,07	41,09	10,51	18,38	16,2	0,66
30 - 45	0,30	2,46	10,30	34,56	12,58	21,6	18,2	0,45
45 - 60	0,33	2,64	10,84	30,69	14,63	20,67	20,2	0,29
Diámetro prom (mm)	1,41	0,72	0,37	0,15	0,07	0,05	0,02	

Se empleó el procedimiento usual del Laboratorio de Mecánica de Suelos. Se obtuvieron los contenidos de humedad y las tensiones cortantes

mediante un aparato de las muestras Triaxial (Figura 1). Los parámetros σ , ϕ y C fueron determinados como se indica en la Figura 2.

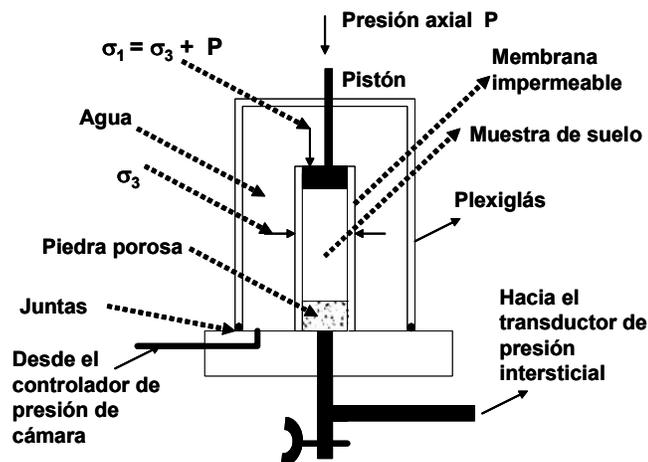
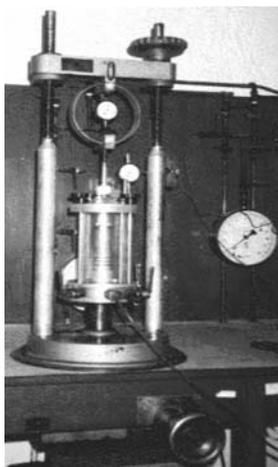


Figura 1. Fotografía y esquema del aparato Triaxial utilizado en el experimento

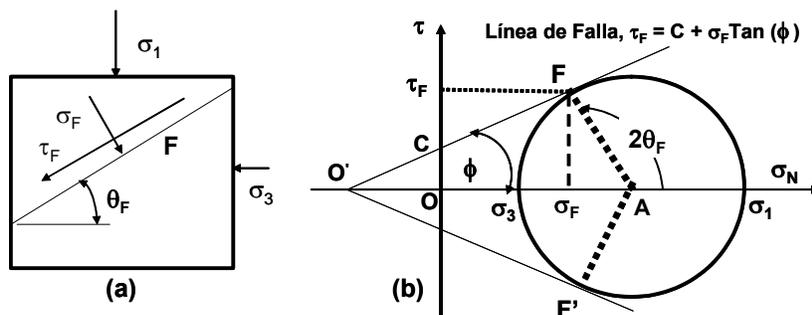


Figura 2. Criterio de tensión cortante de falla Morh-Coulomb (Crespo, 1998; McKyes, 1989)

La Figura 2a presenta el esquema representativo de un elemento sometido a las tensiones principales (σ_1 y σ_3), el plano de falla F, la tensión normal σ_F y la tensión cortante τ_F , ambas actuando en el plano de falla a un ángulo θ_F . La Figura 2b muestra el plano de falla F(τ_F , σ_F) en el punto del círculo de Mohr, la dirección $2\theta_F$ del plano, la fricción interna, la cohesión y las respectivas tensiones principales de cámara σ_1 y σ_3 .

La expresión matemática que relaciona a σ_1 , σ_3 , C y ϕ (Crespo, 1998) es la siguiente:

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

de la cual se obtiene la ecuación lineal:

$$\sigma_1 = 2 * C * \sqrt{\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}} + \sigma_3 * \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi}.$$

Haciendo la comparación con la ecuación general de una línea recta $Y = A + B * X$, con la aplicación de regresión para los valores se obtiene a C y ϕ con las siguientes expresiones:

$$\phi = \text{Arctan}\left(\frac{B - 1}{B + 1}\right)$$

$$C = \frac{A}{2 * \sqrt{\frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}}}$$

Finalmente, el análisis de los resultados se realizó mediante el desarrollo de ecuaciones de regresión entre los diferentes parámetros evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 presenta la variación para diferentes especímenes analizados por tensión de cámara, entre la resistencia al corte (τ) del suelo a cuatro diferentes tensiones principales de cámaras (σ_3) (400, 300, 200 y 100 kN/m²) versus C, w y ϕ , respectivamente. Las curvas 1, 2, 3 y 4 muestran a τ directamente proporcional a la cohesión del suelo en estudio, aumentando con el incremento de la presión de cámara σ_3 .

Las curvas 5, 6, 7 y 8 muestran a τ inversamente proporcional al contenido de humedad del suelo en estudio y directamente proporcional con la presión de cámara σ_3 . Las curvas 9, 10, 11 y 12 muestran a τ directamente proporcional al ángulo de fricción del suelo en estudio y directamente proporcional con la presión de cámara σ_3 . Esto último se atribuye a que la fricción interna es una propiedad importante de las arenas. Según Greacen y Sands (1980) en las arenas C = 0, y τ se determina utilizando la ecuación de Coulomb en función directa de ϕ y la tensión normal σ_F en el plano de falla. El suelo estudiado carece de arcillas expansibles; sin embargo, muestra cohesión posiblemente debido al efecto combinado limo-caolinita. Esto es corroborado por Salazar (1999) quien encontró que la contracción de estos suelos se debe al efecto combinado del limo y la caolinita.

En la Figura 4 se puede observar como la tensión cortante a presión de cámara cero ($\sigma_3 = 0$) varía con respecto a la humedad, cohesión y el ángulo de fricción interna. El subíndice cero de τ representa el valor de la presión de cámara σ_3 . La caída de τ_0 versus la humedad es muy rápida entre 5 y 12 %, la tensión cortante τ_0 versus C varía linealmente y τ_0 versus ϕ aumenta aceleradamente después de los 25°. Greacen y Sands (1980) mencionan que se han analizado ángulos de fricción interna en arenas con partículas entre 60 y 200 μm , (este tamaño de partículas existen en el suelo estudiado) y se han encontrado valores para ϕ entre 20° y 45° dependiendo del estado de compactación. De nuevo se observa la dependencia directa y contundente de τ con respecto a w. Como comparación con las cargas ejercidas por las raíces de las plantas según referencias de Martino y Shaykewich (1994) la presión máxima que una raíz puede ejercer está alrededor de 700 a 1300 kN/m² en la dirección axial y de 400 a 600 kN/m² en la dirección radial. Zou et al. (2001) establecieron que el disminuir el contenido de humedad del suelo tiene un efecto en el aumento de la resistencia para los suelos de textura fina mayor que en los suelos de textura gruesa. Esto es aplicable en estos suelos ya que el ángulo de fricción interna es el más influyente sobre la tensión cortante.

El Cuadro 2 presenta los resultados del análisis de regresión para las Figuras 3 y 4 donde

los subíndices 100, 200, 300 y 400 representan las evaluaciones de las presiones (kN/m²) de cámara analizadas. El subíndice cero representa el análisis para $\sigma_3 = 0$ de las curvas de la Figura 4. Las regresiones son satisfactorias con mayores valores de R² para τ con respecto a la humedad edáfica w, siguiéndole los valores con respecto a C y por último a ϕ . De esto se infiere que la humedad influye más en el comportamiento cambiante de la tensión cortante (τ).

Cuadro 2. Análisis de regresión de τ vs. C, ϕ y w correspondientes a la Figura 1 y Figura 2 cuando σ_3 es igual a cero.

Relaciones	Expresión matemática	R ²
1: t ₄₀₀ vs. C	t=-0,0775*C ² +5,5947*C+153,63	0,8439
2: t ₃₀₀ vs. C	t=-0,0581*C ² +4,446*C+115,22	0,8708
3: t ₂₀₀ vs. C	t=-0,0387*C ² +3,2973*C+76,816	0,9084
4: t ₁₀₀ vs. C	t=-0,0194*C ² +2,1487*C+38,408	0,9593
5: t ₄₀₀ vs. w	t=-0,1506*w ² -6,3283*w+288,21	0,9359
6: t ₃₀₀ vs. w	t=-0,0029*w ² -7,9962*w+239,9	0,9476
7: t ₂₀₀ vs. w	t=0,1448*w ² -9,6641*w+191,59	0,9613
8: t ₁₀₀ vs. w	t=0,2926*w ² -11,332*w+143,28	0,9721
9: t ₄₀₀ vs. ϕ	t=0,2637*\phi ² -1,3581*\phi+67,487	0,9391
10: t ₃₀₀ vs. ϕ	t=0,2479*\phi ² -2,7001*\phi+64,263	0,9103
11: t ₂₀₀ vs. ϕ	t=0,2321*\phi ² -4,0421*\phi+61,04	0,8569
12: t ₁₀₀ vs. ϕ	t=0,2163*\phi ² -5,3841*\phi+57,816	0,7452
t ₀ vs. w	t=0,667*w ² -18,041*w+127,52	0,9579
t ₀ vs. ϕ	t=0,1896*\phi ² -7,9063*\phi+84,332	0,896
t ₀ vs. C	t=C	1

La Figura 5 muestra como τ varía con respecto a la humedad edáfica para siete diferentes presiones de cámara (σ_3). Los subíndices de τ son las presiones de cámara (desde 0 a 1200 kN/m²). Todas las tensiones de corte disminuyeron con respecto a w con la tendencia hacia cero cuando w se acerca al 17 %, la cual concuerda con el límite líquido para este suelo encontrado por Salazar (1999). Esta información es corroborada por los resultados del triaxial como se observó además en las Figuras 3 y 4.

La influencia de la presión de cámara se refleja en forma paralela. El aumento de la tensión cortante es proporcional al aumento de σ_3 . Para σ_3 igual a cero, τ se hace cero en los alrededores de la capacidad de campo del suelo. La capacidad de campo del suelo se observa entre 12 y 13%. Espinoza (1970) determinó la capacidad de campo para un suelo Ultisol de sabana y encontró un valor de 12,6 % para el estrato de 0 a 0,5 m de profundidad.

Godwin y Spoor (1977) en un estudio sobre los factores de suelo que influyen en el trabajo diario, concluyeron que la dificultad para realizar labores de mecanización sobre los suelos depende de su capacidad para resistir las cargas aplicadas por equipos tractor-apero, es decir, depende del esfuerzo cortante.

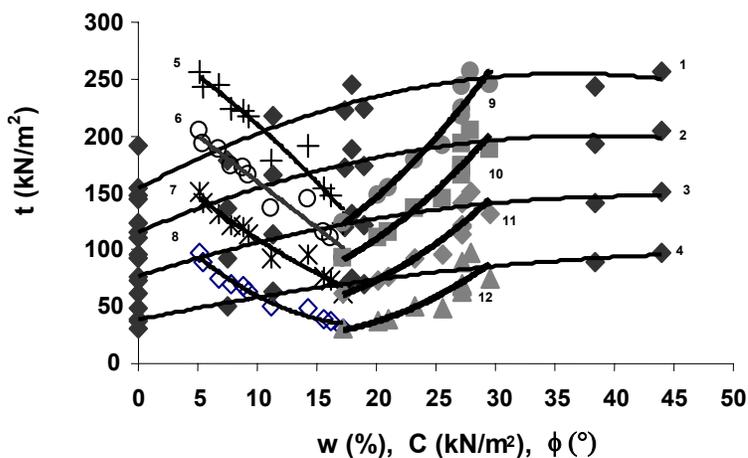


Figura 3. Tensión cortante τ versus w, C y ϕ para un suelo Ultisol de sabana franco arenoso del estado Monagas

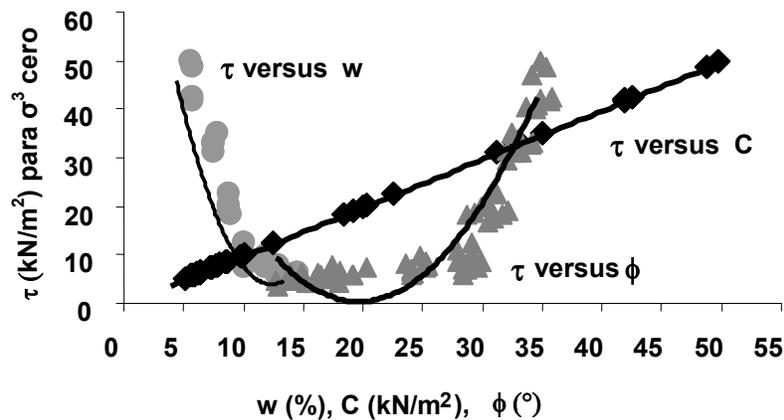


Figura 4. Tensión cortante (tensión de cámara σ_3 igual a cero (0)) versus w , C y ϕ para un suelo Ultisol de sabana franco arenoso del estado Monagas

Este esfuerzo se incrementa a medida que aumenta la compactación y disminuye cuando aumenta el contenido de humedad desde el suelo seco a saturado y hasta el límite inferior de plasticidad. Para estos suelos los usos, trabajabilidad y procesos agrícolas están en las cercanías de la capacidad de campo. Simalenga y Have (1992) concluyeron para un área semiárida como criterio de trabajabilidad, que el suelo puede ser trabajado cuando el contenido de humedad se encuentra por debajo del 95 % de la capacidad de campo.

La Figura 6 muestra como la tensión cortante varió con mayor rapidez versus la humedad que versus el ángulo de fricción, aumentando al incrementar ϕ . La regresión lineal por el método de paso a paso presenta como primera variable de predicción al modelo w más el intercepto. ($R^2 = 0.977^{***}$), y de segundo al modelo w , ϕ más el intercepto ($R^2 = 0.994^{***}$). En la gráfica se observan las líneas de nivel con una tendencia hacia la humedad máxima indicando su influencia sobre la fricción interna (ϕ). Al aumentar la humedad disminuye la fricción ínter partículas.

El análisis estadístico aplicando regresión lineal múltiple a 70 valores produjo para un R^2 ajustado = 1,0 *** y la siguiente expresión:

$$\tau = -0,782 w + 1,180 C + 6,745 \phi - 1,152$$

La influencia por separado de cada término de la expresión se muestra en el Cuadro 3, en donde

se puede observar el orden influencia de w , ϕ , $\phi \cdot C$, C y $w \cdot C$ sobre τ respectivamente. El efecto combinado $w \cdot \phi$ es la de menor influencia sobre τ . La influencia de ϕ más que C sobre τ era de esperarse debido a que el suelo en estudio es un suelo arenoso. Greacen y Sands (1980) señalan que en las arenas la cohesión es insignificante y la resistencia se determina por ϕ , el cual aumenta con la compactación y la carga normal a la dirección de la tensión cortante. Zou et al. (2001) establecieron que la compactación tiene un mayor efecto en el aumento de la resistencia que la disminución de la humedad en los suelos de textura gruesa, pero que la disminución del contenido de agua tenía un mayor efecto en el aumento de resistencia que la compactación en los suelos de textura fina.

Los estadísticos de este trabajo producen cierta contradicción con lo esbozado por Terzaghi y Peck (1967) quienes manifiestan que la ejecución de ensayos triaxiales es la única forma para obtener datos fehacientes respecto a la resistencia al corte, a un contenido de humedad constante en suelos con alta o mediana permeabilidad. Según Towner (1983), es muy difícil determinar las tensiones efectivas de suelos insaturados, excepto en suelos no expansibles como es el caso del suelo en estudio en el cual predominan las arcillas caoliníticas.

En la ecuación de Coulomb ($t = C + s \cdot \text{tg}(f)$) se observa que al aumentar la tensión normal (s) y siendo el ángulo de fricción interna (f) un

parámetro terramecánico con mayor influencia que la cohesión aparente (C) para la resistencia de

estos suelos, la acción tractiva sería influenciada más por el término combinado $s \cdot \text{tg}(f)$.

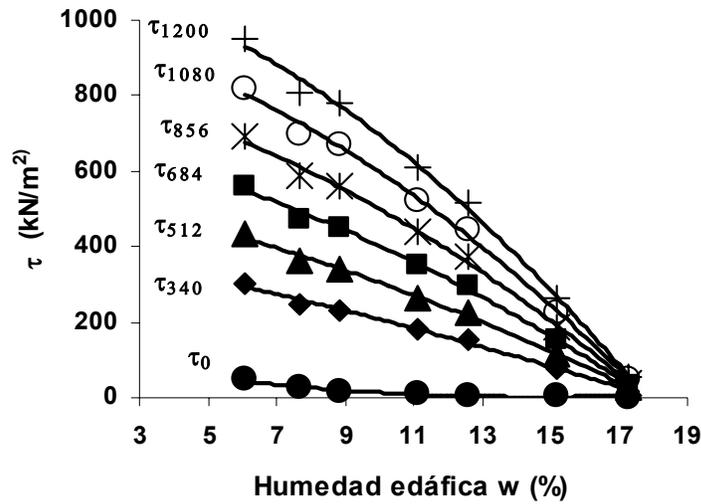


Figura 5. Tensiones cortantes a diferentes presiones de cámara σ_3 (kN/m^2) versus humedad para un suelo Ultisol de sabana franco arenoso del estado Monagas

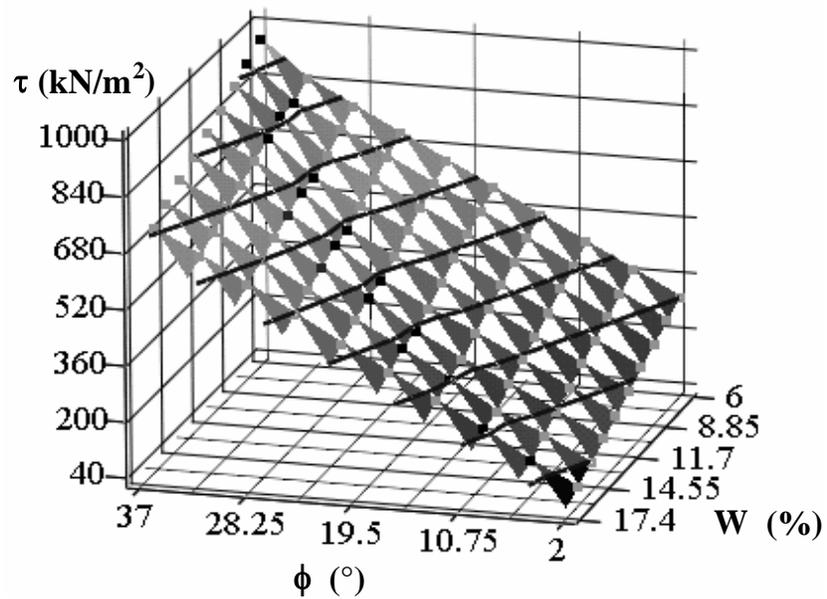


Figura 6. Resistencia al corte versus la humedad y el ángulo de fricción interno para un suelo Ultisol de sabana franco arenoso del estado Monagas

Cuadro 3. Influencia de las correlaciones de Pearson de cada término de la expresión matemática para la resistencia τ

Componentes	Significancia	Correlación
w	0,000	-0,989**
ϕ	0,000	0,986**
$\phi \cdot C$	0,000	0,899**
C	0,000	0,887**
w*C	0,000	0,877**
w*\mathit{\phi}	0,861	-0,021

Esto se destaca mejor en la ecuación de Micklethwait en donde la tracción máxima de determinada maquinaria agrícola está dada por $H = C \cdot A + w \cdot tg(f)$, para la cual A representa el área tractiva de contacto de los neumáticos y W es el peso normal que recibe el área tractiva total. Las estrías o tacos en V son más efectivos para los efectos del término combinado C·A. Por lo tanto, la tracción para estos suelos sería mejorada con la transferencia de peso y el lastrado hacia las ruedas tractivas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La humedad edáfica fue el índice que más influyó sobre la resistencia del suelo al compararla con la fricción interna y la cohesión aparente. El ángulo de fricción interno mostró mayor influencia sobre la tensión cortante que la cohesión aparente.

El suelo ofreció resistencias menores de 100 kN/m² en condiciones de humedad cercanas a su capacidad de campo y mostró cierta cohesión aparente a pesar de su contenido alto de arena y moderado de limo.

Estos suelos son muy susceptibles a la compactación ya que su resistencia se debe principalmente a la fricción interpartículas.

La tracción en estos suelos es producto fundamentalmente del ángulo de fricción, lo que implica que durante su mecanización el peso del tractor es de mayor influencia que el tipo de estrías existentes en las ruedas tractivas.

Se recomienda el uso de implementos agrícolas en un rango cercano inferiormente a la capacidad de campo y por debajo del límite plástico; si hay requerimiento tractivo, lastrar el tractor y usar implementos montados. No se deben labrar estos suelos con humedad menor del 8 % ya que se facilitaría la pulverización de la estructura ni por

encima de la capacidad de campo, la cual representa la humedad con mayor susceptibilidad a la compactación.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente por el financiamiento de esta investigación.

LITERATURA CITADA

1. Crespo, C. V. 1998. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Editorial Limusa, México.
2. 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. Maturín, Venezuela. 42 p.
3. Godwin, R. J. y G. Spoor. 1977. Soil factors influencing work days. Agriculture Engineer 32(4): 87-90.
4. Greacen, E. L. y R. Sands. 1980. Compaction of forest soils. A Review. Aust. J. Res. 18: 163-169.
5. Larson, W. E. y R. R. Allmaras. 1971. Management factors and natural forces as related to compaction. ASAE Monograph: Compaction of Agricultural Soils. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. pp. 367-427.
6. Lloyd, J. E. y N. C. Collis-George. 1982. A torsional shear box for determining the shear strength of agricultural soils. Aust J. Res. 20: 203-211.
7. Martino, D. L. y C. F. Shaykewich. 1994. Root penetration profiles of wheat and barleys as affected by soil penetration resistance in field conditions. Canadian Journal of Soil Science 74(2): 193-200.
8. McKyes, E. 1989. Agricultural Engineering Soil Mechanics. Elsevier, New York.
9. Salazar, F. J. 1999. Interrelación entre la

- capacidad de campo y los límites de consistencia de un suelo agrícola de sabana del estado Monagas. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica. Maturín, Venezuela. 150 p.
10. Simalenga, T. E. y H. Have. 1992. Estimation of soil tillage workdays in a semi-arid area. *Journal of Agric. Eng. Res.* 51: 81-89.
 11. Terzaghi, K. y R. B. Peck. 1967. *Mecánica de los Suelos en la Ingeniería Práctica*. Ateneo. Buenos Aires.
 12. Towner, G. D. 1983. Effective stresses in unsaturated soils and their applicability in the theory of critical state soil mechanics. *Journal of Soil Science* 34: 429-435.
 13. Zou, C., C. Penfold, R. Sand, R. Misra y I. Hudson. 2001. Effect of soil air-filled porosity, soil matrix potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil* 236: 105-115.