

ELASTOPLASTICIDAD DE UN SUELO FRANCO ARENOSO DE SABANA

SANDY LOAM SAVANNA SOIL ELASTOPLASTICITY

AMÉRICO HOSSNE GARCÍA

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento Ingeniería Agrícola, Maturín, Venezuela. E-mail: americohossnegarcia@gmail.com / americohossne@cantv.net

RESUMEN

El conocimiento de las propiedades elastoplásticas es importante para calcular las deformaciones elásticas y plásticas de un suelo experimentadas por las cargas estáticas o dinámicas generadas, por ejemplo, por los implementos agrícolas y el crecimiento radical. El objetivo de este trabajo fue determinar los parámetros elastoplásticos: el módulo de Young (E), el módulo de corte (G), el módulo volumétrico o compresibilidad (K) y la relación de Poisson (ν) de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas en Venezuela. Se utilizaron los ensayos triaxiales y el análisis de regresión para determinar la varianza entre ellos. Los resultados muestran que E varió de 4.693,39 a 36.669,35 kPa; G de 700 a 5000 kPa; K de 500 a 2000 kPa y ν tuvo un valor de 0,50. Se concluye que estos suelos son incompresibles bajo condiciones plásticas; es decir, fácilmente deformables. La relación de Poisson varió significativamente con respecto a la humedad del suelo. El módulo de Young, el volumétrico y el torsional mostraron altas variaciones con la humedad. Tanto el módulo de Young como la relación de Poisson aumentaron, a bajas humedades, al acrecentar la presión de cámara.

PALABRAS CLAVE: Ensayo triaxial, módulo de Young, módulo torsional, módulo volumétrico, relación de Poisson, humedad.

ABSTRACT

The knowledge of elastoplastic properties is important for calculating soil elastic and plastic deformations experienced by static or dynamic loads generated, for example, by farm implements and root growth. The objective of this study was to determine the soil elastoplastic parameters: Young's modulus (E), the shear modulus (G), bulk modulus (K) and Poisson's ratio (ν) of a sandy-loam soil from a savanna in Monagas State, Venezuela. Triaxial tests and regression analyses were used to interpret the variance between them. The results show that E varied from 4693.39 to 36669.35 kPa; G from 700 to 5000 kPa; K from 500 to 2000 kPa and ν had a value of 0.50. It is concluded that these soils are incompressible under plastic conditions, i.e. easily deformable. The Poisson's ratio varied significantly with soil water content. The Young modulus, bulk modulus and the shear modulus showed high variation with respect to water content. Both the Young's modulus and Poisson's ratio increased, at low soil water content, with the rise in chamber pressure.

KEY WORDS: Triaxial test, Young modulus, shear modulus, bulk modulus, Poisson ratio, water content.

INTRODUCCIÓN

Aunque el comportamiento de los parámetros elastoplásticos del suelo se han analizado con precedencia en múltiples trabajos, en su mayoría, desarrollados para suelos de zonas templadas; sin embargo, hay poco conocimiento de estos en las condiciones del trópico y ningún trabajo se ha realizado que describan el comportamiento para las condiciones de los suelos agrícolas franco arenosos de sabana venezolanos. Las sabanas ocupan unas 29×10^6 ha del total de tierras en Venezuela, de éstas 52% corresponden a las sabanas bien drenadas (Ramia 1967). Esta región se caracteriza por su uso agropecuario con pastos nativos de baja calidad y bajo valor nutritivo; por ello, se han desarrollado sistemas de producción de cultivos utilizando los restos de cosecha para la alimentación animal en la época seca y sistemas de producción ganadera de doble propósito, representando el ganado de la zona el 11,1% del rebaño bovino nacional (Briceño 2002).

Para el estudio de la respuesta mecánica del suelo al

tránsito de las máquinas agrícolas, es necesario conocer su estado tenso-deformacional, el cual viene expresado por la relación entre los esfuerzos que inciden sobre el suelo y las deformaciones que en este provocan (Medina y Maynar 2004). Esta relación se conoce como ley constitutiva, la cual define la respuesta del material frente a un conjunto de acciones, formada por fuerzas externas u otro agente: debiendo tener valor universal; es decir, seguir siendo válidas en cualquier circunstancia interna o externa al material. Siempre se refieren a un modelo matemático con carácter ideal, sin embargo, no es posible describir completamente todos los aspectos del comportamiento de un material tan complejo como el suelo, siendo necesario incluir en el modelo solo sus características principales, mientras los aspectos considerados de menor importancia son excluidos (Wulfsohn y Adams 2002).

Los suelos arenosos son a menudo considerados estructuralmente como inertes debido a su estructura débil y a la ausencia de propiedades de expansión-contracción; pero, la compactación frecuente y severa, observada

en los campos agrícolas, amplía la interrogación sobre los procesos y factores que controlan la compactación y su irreversibilidad (Bruand *et al.* 2004). Debido a que el suelo agrícola no es homogéneo, isotrópico y un material elástico ideal; el modelaje matemático del fenómeno de la propagación de tensiones es muy difícil. Muchos modelos matemáticos de la propagación de tensiones en el suelo sometido a tracción de diferentes equipos agrícolas son basados en la ecuación de Boussinesq que describe la distribución de tensiones en un punto bajo carga que actúa en un medio elástico ideal homogéneo, isotrópico y seme-infinito (Hammel 1994). Diversos investigadores han llevado a cabo estudios sobre las características no lineales del suelo mediante pruebas presiométricas y un elemento doblador en conjunto con el aparato triaxial (Jovičić y Coop 1998, Kawaguchi *et al.* 2001). Los modelos hiperbólicos describen el comportamiento no lineal, la arena por lo general se comporta como un material elástico lineal con módulo de corte G para deformaciones angulares hasta $\approx 10^{-5}$, y después la relación de tensión-deformación es fuertemente no lineal (Lee y Salgado 1999). Romaña (2012) considera al suelo como un material isotrópico, lo que significa básicamente, que el suelo es homogéneo y el flujo laminar de agua o gas no es inhibido en cualquier dirección. La isotropía del suelo puede ser estimada para un amplio rango de deformación: Hurtado (2012) trabajando en un material típico de balasto, con ensayos estáticos en condiciones drenadas, después de una consolidación isotrópica a presiones efectivas de confinamiento bajas, determinó los parámetros de Mohr-Coulomb y los hiperbólicos de esfuerzo-deformación-cambio volumétrico, Wilson *et al.* (1989) recomendaron utilizar cargas hidráulicas más pequeñas para poder cumplir mejor la hipótesis de que el suelo tiene un comportamiento uniforme e isotrópico, Raper y Erbach (1990a), Recarey (2000) e ISA (2008) determinaron el módulo de Young, el módulo de corte (G), el módulo de volumen y la relación de Poisson para expresar el comportamiento elástico lineal de un suelo isotrópico; también, Wetlands Research Program Technical Report (1994) y Davison y Springman (2000) reportaron que el módulo elástico de Young normalmente se usa para la estimación del acomodo debido a cargas estáticas y G para determinar la deformación o asentamiento producto de cargas dinámicas o vibratorias. La tensión del suelo depende de la relación de Poisson, y la deformación depende tanto del módulo de Young como de la relación de Poisson. Tanto el módulo de Young como la relación de Poisson se deben considerar cambiar de valor cuando el volumen total del suelo es modelado, para justamente proporcionar la mejor solución. Shoop

(2001), Fervers (2004), Herrera (2006) y Viktória *et al.* (2011) consideraron que la ley físico constitutiva elastoplástica es una de las más usadas para describir el comportamiento del suelo agrícola. Las teorías constitutivas como las características elastoplásticas de un suelo tienen muchas aplicaciones; por ejemplo, Rickman *et al.* (1992) utilizaron la teoría de elasticidad para predecir el crecimiento radical, Scholander (1973) usó las aplicaciones de teoría de la elasticidad para desarrollar los modelos para la interacción neumático-suelo, Alvarez *et al.* (2003) reportaron que el módulo de rigidez y el módulo oedométrico se relacionan con el de Young y la relación de Poisson. Diversos modelos dinámicos del comportamiento del suelo usan sus propiedades elásticas; y cuando el suelo se representa rectilíneo, homogéneo, isotrópico y sin tomar en cuenta su masa, las propiedades elásticas requeridas para responder totalmente por los materiales son: el módulo Young (E), módulo de corte (G), y la relación de Poisson (ν) (Sorin *et al.* 2009).

El módulo de Young puede usarse para predecir el estiramiento o la compresión de un objeto, siempre que la fuerza no sobrepase el límite elástico del material; es la tendencia del suelo a deformarse axialmente bajo cargas (Curd 2013). El módulo de Young de un suelo es el parámetro elástico más comúnmente utilizado en la estimación del asentamiento, estiramiento y deformaciones elásticas por cargas estáticas (Putri *et al.* 2010, Obrzud y Truty 2012). Veseth (1988) reveló que en mecánica de los sólidos, el módulo de Young es una medida de la tenacidad de un material y que permite determinar la conducta de un material bajo carga. Raper y Erbach (1990a, 1990b) y Pettersen (2007) reportaron que el módulo de Young es importante en los análisis exploratorios de compactación del suelo.

El módulo de corte G, también denominado módulo de rigidez, es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. Describe el cizallamiento o cambio de fuerza del suelo (Curd 2013). Para materiales que tienen un comportamiento isótropo, el módulo de Young y el módulo corte G están relacionados por la relación de Poisson (Veseth 1988). No implica cambios de volumen, tan solo de forma. Los módulos de corte y secante son iguales, hasta el límite proporcional de un material. El módulo de corte describe la respuesta al cizallamiento del suelo cambiando de forma. El cizallamiento se refiere a una tendencia a separarse de repente, como en un deslizamiento de tierra.

El módulo volumétrico o de compresibilidad (K) describe la tendencia del suelo, bajo cargas, a deformarse en todas las direcciones está asociado con los cambios de volumen que experimenta un material bajo la acción de esfuerzos (generalmente compresores) que actúan perpendicularmente a su superficie (Curd 2013). Pettersen (2007) manifestó que la inversa del módulo volumétrico ($1/K$) es una medida de la compresión volumétrica, y para un material poroso se debe distinguir entre el módulo volumétrico y el volumen volumétrico (sólidos y espacio poroso).

La relación de Poisson (ν), define la relación entre la deformación transversal y la axial. La relación de Poisson es un parámetro dinámico pero considerado con menor influencia sobre el comportamiento estructural del suelo. En condiciones drenadas el valor típico de este parámetro es 0,3 y en condiciones no drenadas toma el valor de 0,5 Briaud (2001). Raper *et al.* (1994) reportaron que en los suelos blandos debería tener un valor de la relación de Poisson cerca de cero (0), mientras que en los más estructurados, suelos densos, arcillosos puede tener valores alrededor de 0,5 (Mullins *et al.* 1990, Gazetas 1991, Raper *et al.* 1994, Nelson *et al.* 1997, Luna y Jardi 2000, Recarey 2000, Briaud 2001, McKenzie *et al.* 2001, Yuliang y Lingjing 2009). Los valores bajos de la relación de Poisson indican que una fuerza no se transfiere muy lejos lateralmente en el suelo y se absorbe cerca del punto de aplicación (Raper *et al.* 1994). Los valores elevados de la relación de Poisson significarían que las fuerzas se transfieren efectivamente de forma lateral e influirían más en el volumen del suelo. En suelos muy sueltos donde las tensiones cortantes o de cizallamiento son pequeñas (tensiones < 100 kPa), la presencia de la tensión de cizallamiento tiende a disminuir la relación de Poisson, mientras que en los suelos más compactados donde las tensiones son mayores, la presencia de la tensión de cizallamiento tiende a aumentar la relación de Poisson (Raper *et al.* 1994). La relación de Poisson indica la maleabilidad de los materiales geológicos a deformarse (Smith 1979). Generalmente, los materiales más rígidos tendrán la relación de Poisson más baja que los materiales más suaves. La relación de Poisson es importantes en el modelaje de la compactación del suelo (Raper y Erbach 1990a,b, Pettersen 2007). Mullins *et al.* (1990) y McKenzie *et al.* (2001) declararon que la relación de Poisson se limita por dos límites teóricos: debe ser mayor de -1, y menor o igual a 0,5, y que la prueba para esto proviene del hecho que E, y G son positivos y mutuamente dependientes y que la segunda ley de la termodinámica indica que un material bajo tensión uniaxial debe alargar su longitud, afinando que

el módulo de Young exige ser positivo para todos los materiales.

El objetivo general de este trabajo fue la caracterización elastoplásticas de los suelos de sabana franco arenosos caoliníticos en el estado Monagas de Venezuela. Los objetivos específicos consistieron en determinar para estos suelos el módulo de elasticidad o módulo de Young (E), el módulo de corte (G), el módulo volumétrico o compresibilidad (K) y la relación de Poisson (ν), todos en función de la deformación, la humedad del suelo, profundidad y presión.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo para el análisis experimental se realizó en un suelo franco arenoso de sabana en Jusepín del estado Monagas (Fig. 1), situado a 147 msnm 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 temperatura media anual de $27,5^{\circ}\text{C}$. Bajo 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 y Ciperáceas. El área de trabajo seleccionado del suelo en estudio, pertenece a las condiciones de un Ultisol de sabana del grupo de los Oxyc Paleustults familia de temperatura Isohipertérmica. La Tabla 1 muestra las características físicas y químicas respectivamente del suelo estudiado. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango establecido por Rucks *et al.* (2004) y CIVIL2121 (2012). Estos suelos ocupan una extensa área agrícola venezolana y son utilizados en la explotación de muchos rubros, con labores de encalado y fertilización, como maíz, sorgo, yuca y pastizales.

Estos suelos han sido caracterizados física y mecánica por muchos autores: Hossne y Salazar (2004) demostraron que la contracción de estos suelos es debida al efecto combinado limo-caolinita y que en los análisis de laboratorio según Smith (1990), el suelo estudiado carece de arcillas expandibles; y que a pesar de ello mostró cohesión capilar de acuerdo a Hossne *et al.* (2011). Kemper y Rosenau (1984) manifestaron que la fuerza cohesiva debida al agua provee una porción muy grande de la cohesión de los suelos. Esto es aplicable al suelo estudiado que también contiene arcilla caolinítica (consideradas inexpandibles), limo y arena muy fina. Hossne (2008b) estableció que la zona friable para estos suelos estuvo entre 7,63 y 9,52% de humedad. Espinoza

(1970) determinó la capacidad de campo para el suelo de sabana Ultisol de Monagas, encontrando: 11,70% (0-0,2 m), 13,49% (0,2-0,5 m), 16,89% (0,5-1,0 m) y 19,48% (1,0-3,50 m), con un promedio total de 15,39% y entre 0,0 m a 0,5 m de 12,6%. Hossne (2008a) reportó para la capacidad de campo aproximadamente entre 10,3 y 12,8%. Hossne y Salazar (2004) determinaron:

el límite de contracción 4,22-5,20%, el límite plástico 12,92-14,04%, el límite líquido 16,94-19,43%, el índice de plasticidad de 3,59-5,78% y el índice de friabilidad de 8,63-8,84%. El punto de marchitez encontrado por Gaspar (1983) fue de 6,19% y para Fermín (1971) de 5,53% para estos suelos.



Figura 1. Área de muestreo, coordenadas con GPS, en los puntos NORTE: 1078422,0; 1078979,0; 1079445,0; 1079698,0; 1079821,0; 1079772,0; ESTE: 451257,0; 451018,0; 451394,0; 451555; 451486,0; 451276,0 respectivamente. La flecha indica el área en la zona de Josepín.

Tabla 1. Componentes físicos del suelo de sabana del estado Monagas, Venezuela, Hossne (2008b).

Profundidad	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla
cm	%	%	%	%	%	%	%
0 - 15	0,22	2,91	12,18	39,13	13,93	19,43	12,20
15 - 30	0,52	2,23	11,07	41,09	10,51	18,38	16,20
30 - 45	0,30	2,46	10,30	34,56	12,58	21,60	18,20
45 - 60	0,33	2,64	10,84	30,69	14,63	20,67	20,20
Tamaño Partículas (mm)	2,0 a 1,0	1,0 a 0,5	0,5 a 0,25	0,25 a 0,1	0,1 a 0,05	0,05 a 0,002	< de 0,002

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 a las profundidades de 0-0,15 m, 0,15-0,30 m, 0,30-0,45 m y 0,45-0,60 m y se conformaron como dos muestras compuestas del suelo recolectado entre 0-0,30 m y 0,30-0,60 m respectivamente. La recolección de las muestras y ubicación de los pozos se realizó apoyado en el método de muestreo aleatorio simple. Para el humedecimiento de las muestras para ser utilizadas en el triaxial, se tomó una porción de 4 kg de suelo, tamizado por un tamiz de 4,69 mm y secado al

aire, el cual se depositó en una bandeja para aplicarle un volumen determinado de agua. El establecimiento de los niveles de humedad (5-7, 7-9, 9-11, 11-13 y 13-15%) se logró aplicando volúmenes de agua en forma creciente usando la siguiente relación: $V_w = M_s * \%w * 100 / r_w$. Una vez pasada las 24 h; se utilizó el equipo de compactación Mini Hardware para confeccionar los especímenes de suelo, los cuales tuvieron una altura y diámetro inicial iguales a las del cilindro moldeador. Se confeccionaron 10 especímenes por cada nivel de humedad; los cuales fueron tapados con cápsulas de vidrio para conservar su humedad. Luego de confeccionados los especímenes se procedió a montarlos en la base de la cámara triaxial;

para eso, se colocó en la parte superior una placa porosa. Con el expansor de membrana se ensanchó la funda de hule (condón) y se recubrió tanto el espécimen de suelo como la placa porosa superior. Luego se colocaron las bandas de hule, para evitar el remojo del espécimen. Se verificó la centralidad de la probeta y se colocó el cilindro de lucita sobre el empaque de la base de bronce de la cámara, colocándose la tapa teniendo la precaución de levantar el vástago para no tocar el espécimen. La cámara se cerró herméticamente, procurando que las dos bases quedaran paralelas y pudiese coincidir el centro del balero que está alojado en el cabezal con la espiga del vástago que transmite la carga axial. Una vez dada la presión de confinamiento, se cerraron los deformímetros y se encendió la máquina. La velocidad del ensayo estaba calibrada para el tipo de prueba. En el procedimiento de prueba se introdujo el agua dentro de la cámara y se aplicó una presión lateral de cámara (60, 120, 180, 240) para todos los especímenes ensayados. Las lecturas del deformímetro lineal y del deformímetro de carga se anotaron cada 10 divisiones del deformímetro lineal en la planilla utilizada para realizar estas anotaciones (Tabla 2). 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 cuatro veces. Se procedió a desmontar el espécimen pero antes se leyó nuevamente la presión lateral, luego se desalojó el agua y se procedió a desarmar la cámara. Se desligó el espécimen de las bases, se quitó la funda y se colocó en una tara para determinar la masa húmeda más la masa de la tara. Después de esto se llevó a la estufa y con la masa de suelo seco más la masa de la tara se determinó el contenido de humedad al cual fue ensayado. En las

dos primeras columnas de la planilla se registraron los datos de las lecturas del deformímetro lineal en $\times 10^{-3}$ pulgadas y los datos de las lecturas del deformímetro de carga en $\times 10^{-4}$ pulgadas. Los datos fueron anotados en su mayoría en la siguiente progresión aritmética de la lectura del deformímetro lineal en $\times 10^{-3}$ pulgadas; cada 10, 20, 30 y 50 divisiones. La tercera columna del deformímetro de carga en kN, se obtuvo multiplicando la lectura del deformímetro de carga en $\times 10^{-4}$ pulgadas por la constante del anillo de carga en $\text{kN} / 10^{-4}$ pulgadas. La cuarta columna de la deformación lineal, se obtuvo transformando la lectura del deformímetro lineal en mm. La quinta columna de la deformación unitaria en %, se obtuvo de la fórmula $e = DL * 100 / L_0$ (DL es la deformación lineal del espécimen ensayado y L_0 es su longitud inicial). La séptima columna de la planilla del área corregida, se obtuvo dividiendo el área inicial del espécimen ensayado entre el factor de corrección, tal como lo muestra la fórmula Área corregida = Área inicial / Factor de Corrección. La octava columna de la planilla del esfuerzo desviador, se obtuvo dividiendo la lectura del deformímetro de carga en kN entre el área corregida en m^2 : esfuerzo desviador $\sigma = \text{Carga en kN} / \text{Área corregida en m}^2$. La tensión principal mayor (σ_1) se obtuvo sumando la presión lateral (σ_3) al esfuerzo desviador máximo ($\sigma_{\text{máx}}$) $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{\text{máx}}$ (Crespo 2007, Hossne 2008c). El arreglo experimental consistió en un factorial simple con dos niveles de profundidad (0-0,30 m y 0,30-0,60 m), cuatro presiones de cámara (60, 120, 180 y 240 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$) y cinco rangos de humedad (5-7, 7-9, 9-11, 11-13 y 13-15% en base seca) con diez repeticiones cada uno; obteniéndose ($2 \times 4 \times 5 \times 10$) para un total de cuatrocientas muestras (400) analizadas en el triaxial.

Tabla 2. Contenido de la planilla para la toma de datos del triaxial.

Lectura del Deformímetro	Deformímetro de Carga	Deformímetro de Carga	ΔL	Deformación Unitaria	Factor de Corrección de Área	Área Corregida	Esfuerzo Desviador
$* 10^{-3}$ (")	$* 10^{-4}$ (")	kN	mm	ϵ %	$1 - \epsilon$	m^2	$\sigma \text{ kN/m}^2$

La Figura 2 muestra un dibujo esquemático en corte del aparato triaxial utilizado. La razón entre la extensión y contracción (ϵ_a/ϵ_l), fue establecida por Siméon Denis Poisson, como relación de Poisson, (ν). En 1678 Robert Hooke publicó su ley, basado en un estudio de deformación en resortes, así se estableció que la relación lineal entre la componente del esfuerzo y la componente de la deformación sin diferenciar claramente fuerza de

esfuerzo; entonces, $\sigma = E \cdot e$. Siendo σ la tensión normal, ϵ la elongación y E el coeficiente de proporcionalidad denominado Módulo de Young. Para materiales que tienen un comportamiento isotrópico, el módulo de Young, el módulo de cizalladura o corte G y el módulo volumétrico o compresibilidad (K) están relacionados por la relación de Poisson (Veseth 1988).

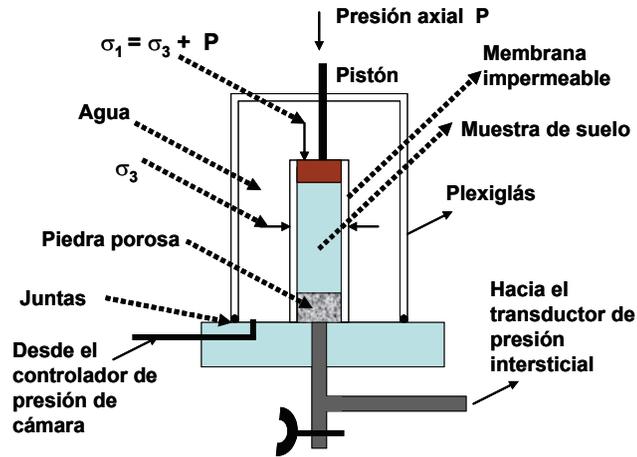


Figura 2. Imagen esquemática del aparato triaxial

La Figura 3 presenta las relaciones utilizadas en los cálculos, en donde ϵ_a y ϵ_l simbolizan la deformación axial y lateral respectivamente, d el diámetro original del espécimen, d_1 diámetro del espécimen deformado, L la altura original del espécimen y ΔL deformación de la altura del espécimen. Se utilizó el análisis de regresión

para interpretar la proporción de la variación entre los parámetros de las curvas de regresión. Desde el punto de vista de la significación, para determinar la diferencia entre las medias de los resultados, se utilizó el análisis de varianza y la prueba de la mínima diferencia significativa (MDS) ($p \leq 0,05$).

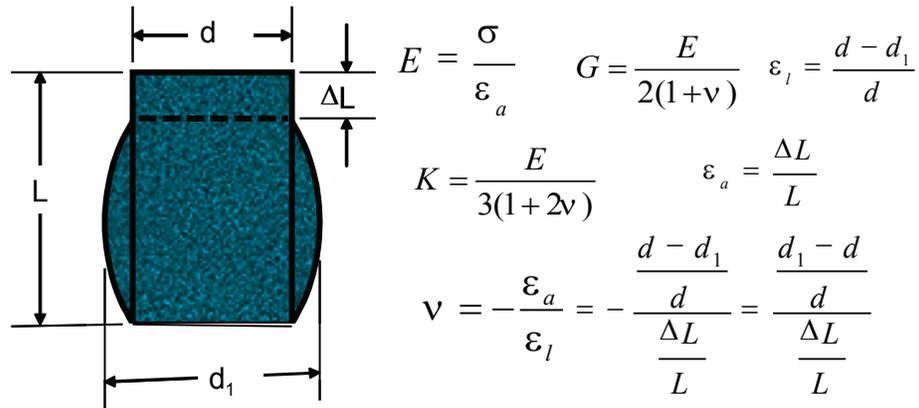


Figura 3. Elemento de suelo en corte deformado en el triaxial y las relaciones formadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra las características físicas del suelo franco arenoso de sabana estudiado, con amplio uso agrícola, en donde el contenido de arena fina predomina y la arcilla existente es del tipo caolinitico; considerada geotécnicamente inexpandible; no obstante, Ydrogo (2006) reportó tener contracción. Este suelo es inestable ya que presenta poca resistencia a la deformación y es sensible a la presencia de agua. Generalmente es conocido que un suelo arcilloso al agregarle arena se reduce la plasticidad. Skempton (1953) expresó que la plasticidad de los suelos es función del contenido de arcilla. La actividad de la caolinita es igual a 0,38,

la montmorillonita es de 7,20 y de la illita de 0,90. La relación de Poisson de 0,2 a 0,40 para una arcilla arenosa y una arena densa fue reportada por CivilGeek (2011).

La Figura 4 presenta el esfuerzo desviador en función de la deformación producida para la profundidad 0-0,30 m, una presión de cámara de 60 kN*m⁻² y una humedad media de 5,9%, en donde se percibe que la curva resultante es similar al comportamiento de cualquier material sometido a este proceso: estado elástico, plástico y rotura. Con respecto a esto Velásquez *et al.* (2005) trabajando con plátanos encontraron que las curvas esfuerzo deformación obtenidas tuvieron las mismas tendencia. La curva tensión-deformación para humedades

superiores mostró continuidad sin picos. En el proceso inicial de carga se obtuvieron valores de la deformación en el rango lineal con $s = 182,1 * e + 40,28$ con un r^2 de 0,86; significando esto, que no hubo reversibilidad, y que la respuesta fue más plástica que elástica. La ley físico constitutiva elastoplástica es una de las más usadas para describir el comportamiento del suelo agrícola, la cual explica la respuesta del suelo durante la compresión isotrópica o la compresión triaxial en dos fases (Shoop 2001, Fervers 2004, Herrera 2006). Durante el inicio de la carga exhibe comportamiento elástico lineal hasta el punto de resistencia lineal, de forma tal que si la carga es retirada el suelo regresa completamente a su estado inicial (Davison y Sprigman 2000). Si la carga se incrementa, a partir de ese punto y hasta el punto de comienzo de la falla, al disminuir esta la deformación aun es reversible aunque ya de forma no lineal. A partir del punto de comienzo de la falla, el incremento de tensiones provoca que durante la descarga las deformaciones no sean completamente reversibles (Shoop 2001, Fervers 2004, Herrera 2006). Jamaludin (2012) reportó que un material cede cuando su comportamiento tensión-deformación cambia de ser puramente elástico a parcialmente plástico o cuando la deformación deja de ser recuperable en la descarga. Esto a menudo se caracteriza por un cambio brusco en la pendiente (rigidez) de la curva tensión-deformación. Ceder no significa necesariamente falla. De acuerdo a Jamaludin (2012) el suelo se asume como un cuerpo elástico mientras que sólo se comporta elástico cuando

el estado de tensión está dentro de la máxima presión en el momento de máxima resistencia al corte; más allá, el suelo se comporta como un material elastoplástico. Según Davison y Sprigman (2000) los parámetros elásticos son los gradientes de la curva tensión-deformación y son constantes y si el material es incompresible $\epsilon_v = 0$ y $\nu = 0,5$. A veces se asume que el suelo se comporta elástico linealmente bajo cargas relativamente pequeñas. Un material parcialmente elástico obedece la ley de Hooke durante cargas, pero este material no obtendrá sus dimensiones iniciales al suspender las cargas de tensión aplicada. Estos materiales son no lineales e incluyen la mayoría de los suelos (Veseth 1988, Davison y Sprigman 2000). Kushwaha y Shen (1994) reportaron que substancial deformación del suelo está asociada con la generación de no linealidad en la relación tensión-deformación, falla de suelos agrícolas e interacción de implementos de labranza. Esto produjo una gran cantidad de deformación irreversible al suspender la carga, indicando que la deformación plástica domina en las operaciones agrícolas. Karmakar *et al.* (2004) intentaron revisar varios modelos elastoplásticos del suelo para posibles usos en el análisis de la interacción implemento-suelo durante la labranza; lograron una curva tensión-deformación de respuesta similar a la obtenida en este análisis. Capdevila (2008) en el análisis de los loes, suelo franco arcilloso limoso, del centro de Argentina obtuvo curvas con comportamiento similar a bajas humedades (8,6%).

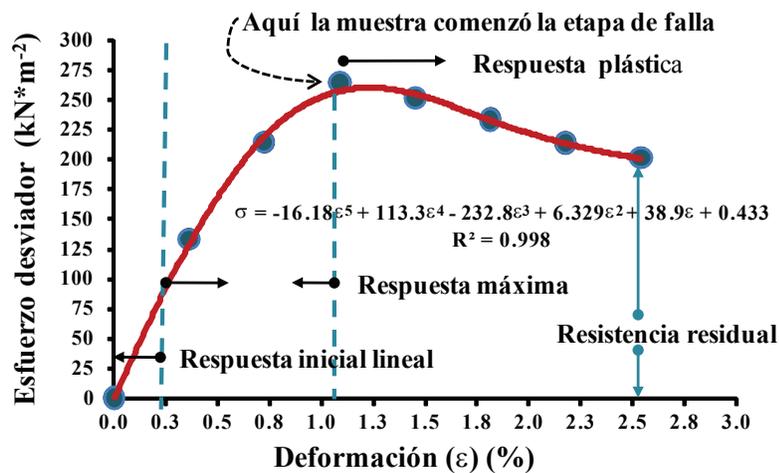


Figura 4. Curva tensión-deformación del suelo

La Figura 5 presenta el comportamiento del módulo de Young en función de la humedad, en donde se observa que varió exponencialmente inversamente proporcional. Capdevila (2008) y González *et al.* (2009a) reportaron comportamientos análogos. Se observa que los mayores valores de E se obtuvieron a bajas humedades entre

6 y 8%. Raper y Erbach (1990a) y González *et al.* (2009a) expresaron que mientras mayor sea el módulo de elasticidad, mayor es la resistencia del suelo a la deformación. Los resultados obtenidos analizados estadísticamente con el análisis de varianza y la mínima diferencia significativa, mostrados en las tablas 4 y 5,

presentan una media de $14.492 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ y el máximo valor de $17.442 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ fue para el horizonte 30-60 cm, y para las presiones de cámara (σ_3) de $120 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ y $180 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, sin diferencia significativa, fueron $15.942 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ y $15.499 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ respectivamente. Estos resultados se esperaron, ya que la cohesión capilar aumenta con la profundidad producto del aumento del contenido de arcilla (Tabla 1) y el módulo de Young es una característica intrínseca de un material. De acuerdo a González *et al.* (2009a) los suelos más sueltos manifiestan poca capacidad de recuperación pero aumenta para el suelo más compacto debido a que éstos soportan mayores cargas en el tramo elástico de deformación por tener mayor módulo de Young. El

módulo de Young mostró una estrecha dependencia con respecto al estado de humedad y aumento de la densidad aparente del suelo producto del incremento de las presiones de cámara, tendiendo a disminuir de forma no lineal con el aumento del contenido de humedad del suelo, ocurriendo lo contrario cuando se incrementó la densidad del suelo; es decir, su magnitud aumentó no linealmente con el consiguiente aumento de la densidad aparente; las tendencias mostradas coincidieron con las encontradas por Chancellor (1994), Mouazen y Neményi (1999), Mouazen (2002), Mouazen *et al.* (2002), Hossne *et al.* (2003), Herrera (2006), Herrera *et al.* (2008) y González (2011) para suelos de diferentes ecosistemas.

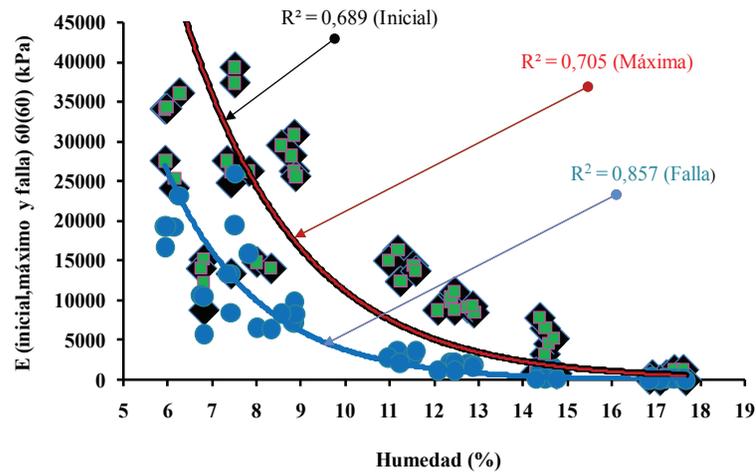


Figura 5. Módulo de Young (E) en el proceso de deformación versus la humedad

Tabla 3. Resultados iniciales (ini), máximos (max) y en falla (fall) para el módulo de Young (E), relación de Poisson (ν) y módulo de corte (G), todos en función de la humedad gravimétrica (w), la profundidad (Pro) y presión de cámara (Pre).

PROPIEDADES ELASTOPLÁSTICAS										
(Pre)(Pro)	ν_{ini}	ν_{max}	ν_{falla}	E_{ini} kN/m ²	E_{max} kN/m ²	E_{falla} kN/m ²	G_{ini} kN/m ²	G_{max} kN/m ²	G_{falla} kN/m ²	w %
60(30)	0,50	0,51	0,54	28774,90	28774,90	14982,75	9581,71	9581,71	4966,73	5,42
60(30)	0,50	0,50	0,51	1475,02	2802,55	788,15	491,17	933,22	255,65	13,6
120(30)	0,50	0,52	0,56	39892,48	39892,48	10409,47	13283,74	13283,74	3411,15	6,00
120(30)	0,00	0,00	0,52	3245,05	3392,56	742,09	1080,57	1129,68	238,13	13,60
180(30)	0,50	0,53	0,58	53625,95	53625,95	8874,31	17856,83	17856,83	2893,48	6,14
180(30)	0,50	0,50	0,52	2615,90	2615,90	797,22	871,06	871,06	252,90	14,27
240(30)	0,51	0,53	0,59	34006,70	34006,70	11085,51	11323,84	11323,84	3614,45	6,03
240(30)	0,50	0,50	0,53	2065,03	2065,03	1049,81	687,63	687,63	331,52	14,08
60(60)	0,51	0,52	0,59	39238,50	39238,50	25969,29	13065,97	13065,97	8632,45	7,51
60(60)	0,50	0,50	0,50	36,45	48,23	38,41	12,11	15,99	12,59	16,87
120(60)	0,50	0,51	0,60	49048,13	49048,13	11563,63	16332,47	16332,47	3811,63	5,75
120(60)	0,50	0,50	0,51	147,50	147,50	35,38	49,12	49,12	11,54	16,18
180(60)	0,50	0,51	0,59	49048,13	49048,13	10102,36	16332,47	16332,47	3307,22	6,05
180(60)	0,50	0,50	0,52	147,50	147,50	36,94	49,12	49,12	11,85	16,11
240(60)	0,50	0,51	0,60	62781,60	62781,60	8891,33	20905,56	20905,56	2884,07	6,35
240(60)	0,50	0,50	0,54	73,38	107,74	31,59	24,41	35,65	9,96	16,32

La Figura 6 muestra que la relación de Poisson sostuvo una reciprocidad directa con la deformación del suelo, manteniendo un valor de aumento constante en la trayectoria del proceso, y presentó en las condiciones

iniciales una variación lineal con respecto a la humedad en un intervalo pequeño, como lo muestra la Tabla 3, y aumentó linealmente, con un r^2 de 0,34, su valor en las condiciones de falla al aumentar la humedad.

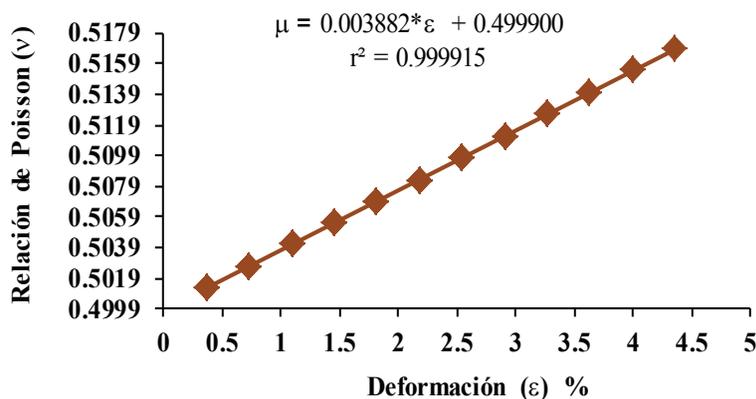


Figura 6. La relación de Poisson versus la deformación de un suelo franco arenoso de sabana.

Luna y Jadi (2000) declararon que la relación de Poisson es un parámetro fundamental que es difícil de medir. La relación de deformación horizontal a vertical se requiere para relacionar los módulos y las tensiones de un cuerpo sólido. Una gama sugerida de valores para la relación de Poisson para suelos es de 0,2 a 0,5, valores menos comunes pueden ser tan bajos como 0,1 para los depósitos de loess. La relación de Poisson se asume con un valor entre 0,3 y 0,45, basado en el contenido de arcilla del suelo (Raper y Erbach 1990b), y puede alcanzar un valor de hasta 0,49 en suelos saturados (Recarey 2000, PISA 2008). Nelson *et al.* (1997) concluyeron que el contenido de humedad del suelo no afectó significativamente la deformación del suelo (ϵ) y la relación de Poisson varió por la anisotropía del suelo. Briaud (2001) informó que la relación de Poisson es sensible si el drenaje tiene lugar. Si el drenaje ocurre durante la carga en una arcilla, es común suponer una relación de Poisson igual a 0,5 y que puede ser mayor que 0,5 si el suelo se dilata durante la cizalladura asociada con la compresión. Mouazen *et al.* (2002) con pruebas estándar de compresión triaxial llevadas a cabo en un suelo agrícola franco arenoso para evaluar el efecto de la densidad aparente del suelo seco y contenido de humedad en las propiedades mecánicas del suelo, reportaron que el módulo de Young y la relación de Poisson disminuyeron con respecto al contenido de humedad, excepto que la relación de Poisson aumentó después que el contenido de humedad supera el 17% en base seca. Inci *et al.* (2003) condujeron pruebas en tres suelos arcillosos con baja a alta plasticidad compactados empleando el método Proctor estándar y modificados en un rango de contenidos de humedad; las muestras se dejaron secar

después de la compactación, encontraron que la relación de Poisson disminuyó con la disminución del grado de saturación debido al secado. Yuliang y Lingjing (2009) trabajando con suelos expansivos, encontraron que al variar la humedad desde 5,27% a 54,40% se produjo una relación de Poisson variando desde 0,20 a 0,50. La Tabla 6 de análisis de varianza para la fase inicial, la relación de Poisson sólo mostró significancia con la humedad gravimétrica con una media de 0,5021; en cambio, en las fases de carga máxima y falla si presentó significancia con respecto al efecto combinado profundidad*presión de cámara ($PRO * \sigma_3$). La Tabla 7 demuestra que el mayor valor de la relación de Poisson máxima (ν_{max}) de 0,5064 se obtuvo en el horizonte 0-30 cm y la presión de cámara de 240 kN/m². Los mayores valores de la relación de Poisson en falla (ν_{falla}) de 0,5676 y 0,5689 se obtuvieron a las profundidades 0-30 cm y 30-60 respectivamente con la presión de cámara de 240 kN/m² para ambas con promedios estadísticamente iguales. Esto indica que los suelos caoliníticos de sabana son incompresibles. Valores típicos de la relación de Poisson encontrados por Mullins *et al.* (1990) y McKenzie *et al.* (2001) fueron: para suelos arcillosos limosos en pruebas no drenadas 0,5, para suelos duros o arcilloso limoso entre 0,2 y 0,4, para arenas medias sueltas 0,4 y para arenas densas entre 0,2 y 0,45. Los valores obtenidos están apoyados por la bibliografía, y los mayores de 0,5 sólo se obtuvieron en condiciones de falla en donde ya el suelo había estado en la etapa plástica.

En la Tabla 3 se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos para el módulo de Young, relación de Poisson y el módulo de corte para las etapas: inicial,

máxima y en falla en el proceso de deformación producido por el esfuerzo desviador con referencia a la presión de cámara, profundidad y humedad. El análisis estadístico se realizó para los diferentes resultados del módulo de Young (E_{max} , E_{min} y E_{ini}), la relación de Poisson (ν_{max} , ν_{min} y ν_{ini}) y el esfuerzo desviador (σ_{max} , σ_{min} y σ_{ini}). Los subíndices max, min e ini simbolizaron valores máximos, mínimos e iniciales respectivamente. A los módulos G y K no se les efectuó por ser función de E; es decir, se obtendrían las mismas tendencias estadísticas ya que para este suelo se mostró que $E = 3 * G$ con gran aproximación. Se observa que a bajas humedades hay tendencia del módulo de Young aumentar al acrecentar la presión de cámara, las presiones de cámara podrían ser consideradas como una simulación de la carga vertical que recibe el suelo o compactación. Scholander (1973), Raper y Erbach (1990b) y Bravo *et al.* (2012) encontraron que el módulo de Young es altamente dependiente de la densidad aparente seca a bajas humedades; la Tabla 4 muestra significancia con respecto a la presión de cámara. González *et al.* (2009b) reportaron que mientras mayor

sea el módulo de Young mayor la resistencia del suelo a la deformación, la cual muestra que aumenta el esfuerzo desviador máximo que soporta el suelo a medida que incrementa la densidad de volumen.

La Tabla 4 muestra que estadísticamente el módulo de Young fue función altamente significativo con la humedad, la profundidad y la presión de cámara. No hubo significancia con respecto al efecto combinado profundidad-presión de cámara (PRO* σ_3). La Tabla 5 presenta el MDS para el módulo de Young mostrando que su mayor valor fue a la profundidad de 60 cm y las presiones de cámara de 120 y 180 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ sin diferencia significativa.

La Tabla 6 prueba que la única variable que afectó a la relación de Poisson fue la humedad y la Tabla 7 presenta el MDS con respecto a las variables estudiadas, el mayor valor fue a la profundidad de 30 cm y presión de cámara de 240 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tabla 4. Análisis de varianza para el Módulo de Young máximo (E_{max}) ajustada por covarianza con la humedad gravimétrica (w) de un suelo de sabana del estado Monagas.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Profundidad (PRO)	1	3,351E+09	3,351E+09	58,04	0,0000
Presión de cámara (σ_3)	3	6,043E+08	2,014E+08	3,49	0,0159
PRO* σ_3	3	2,429E+07	8095640	0,14	0,9359
Covariable w	1	2,627E+10	2,627E+10	454,95	0,0000
Error	391				
Media	14492				
CV	52,44				
Coeficiente de covarianza (w)			Error estándar	T	P
-2454,40			115,070	-21,33	0,0000

Tabla 5. Promedios para el Módulo de Young máximo (E_{max}) de un suelo de sabana del estado Monagas. Prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) ($p \leq 0,05$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes.

Horizonte	Profundidades (cm)		Presión de cámara (σ_3) (kN/m^2)		
	Media	Grupos homogéneos	† σ_3	Media	Grupos homogéneos
30	11542	B	60	13241	B
60	17442	A	120	15942	A
			180	15499	A
			240	13303	B

Tabla 6. Análisis de varianza para la relación de Poisson inicial (v_{mi}) ajustada por covarianza con la humedad gravimétrica (w) de un suelo de sabana del estado Monagas.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Profundidad (PRO)	1	7,566E-08	7,566E-08	0,40	0,5250
Presión de cámara (σ_3)	3	1,046E-06	3,489E-07	1,87	0,1348
PRO* σ_3	3	1,373E-06	4,577E-07	2,45	0,0633
Covariable w	1	1,883E-06	1,883E-06	10,07	0,0016
Error	391	7,310E-05	1,869E-07		
Media	0,5021				
CV	0,09				
Coeficiente de covarianza (w)			Error estándar	T	P
2,078E-05			6,547E-06	3,17	0,0016

Tabla 7. Promedios para la relación de Poisson máxima (v_{max}) de un suelo de sabana del estado Monagas. Prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) ($p \leq 0,05$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes. †Presión de cámara (σ_3).

† σ_3 kN·m ⁻²	Horizonte de 0-30 cm		Horizonte de 30-60 cm	
	Media	Grupos homogéneos	Media	Grupos homogéneos
60	0,5002	D	0,5012	CD
120	0,5018	BCD	0,5008	CD
180	0,5034	B	0,5008	CD
240	0,5064	A	0,5022	BC

CONCLUSIONES

El valor promedio de la relación de Poisson de 0,50 (mayores valores en la etapa plástica), indica que estos suelos son incompresibles bajo condiciones plásticas; es decir fácilmente deformables. De las variables estadísticas profundidad, presión de cámara, efecto combinado profundidad-presión de cámara y humedad del suelo; la humedad fue la que afectó significativamente la relación de Poisson. El módulo de Young fue afectado significativamente por las variables profundidad, presión de cámara y humedad del suelo, con la cual varió exponencialmente. Tanto el módulo de Young como la relación de Poisson aumentaron, a bajas humedades, al acrecentar la presión de cámara. El módulo de corte produjo comportamiento similar. Resultó en estos suelos que el módulo de corte es aproximadamente tres veces menor que el módulo de Young.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ AM, GARNICA PA, PÉREZ SALAZAR A. 2003. Evaluación indirecta de los módulos elásticos

de rigidez *in situ* y la relación entre v_p/v_s y el ángulo de fricción interna. Publicación Técnica No. 225. Sanfandila, Qro, 2003. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, pp. 39.

BRAVO EL, SUÁREZ MH, CUETO OG, TIJSEKENS E, RAMON H. 2012. Determination of basics mechanical properties in a tropical clay soil as a function of dry bulk density and moisture. RCTA. 21(3):5-11.

BRIAUD JL. 2001. Introduction to soil moduli. Department of Civil Engineering (briaud@tamu.edu), Texas A & M University, College Station, Texas, 77843-3136, USA. *Geotechnical News*, June 2001, BiTech. Publishers, Richmond, B.C., Canada, pp. 8. Disponible en línea en: briaud@tamu.edu. (Acceso 02.09.2012).

BRICEÑO O. 2002. Evaluación de diferentes coberturas vivas como barbechos mejorados en un sistema de labranza conservacionista y su relación con las propiedades químicas de dos suelos de textura

- contrastantes del estado Guárico. Maracay: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Ingeniería Agrícola [Disertación Grado Ingeniero Agrónomo], pp. 71.
- BRUAND A, HARTMANN C, RATANA-ANUPAP S, SINDHUSEN P, POSS R, HARDY M. 2004. Composition, fabric, and porosity of an Arenic Haplustalf in Northeast Thailand: Relation to penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(1):185-193.
- CAPDEVILA JA. 2008. Comportamiento tensión-deformación del Loess del centro de Argentina en campo y laboratorio. Influencia de los Parámetros Estructurales. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [Disertación Grado de Doctor], pp. 369.
- CHANCELLOR WJ. 1994. Soil physical properties. In: *Advances in Soil Dynamics*. Hansen PD (Ed). ASAE Monograph. 12(1):21-254.
- CIVILGEEK. 2011. Valores referenciales sobre diferentes propiedades de los suelos. Creative Commons. <http://CivilGeeks.com>. Con tecnología de WordPress. www.aig-instrumentos.com.
- 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, pp. 12. Disponible en línea en: [Http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve](http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve) (Acceso 04.02./2012).
- CRESPO VC. 2007. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. 6ta Edición. Limusa, México, pp. 646.
- CURD JM. 2013. *Unsaturated Soil Parameters From Field Stiffness Measurements*. Theses and Dissertations. Civil Engineering. Kentucky University. Paper 11. Disponible en línea en: http://uknowledge.uky.edu/ce_etds/11. 151 p, 3,03 MB. (Acceso 04.02./2012).
- DAVISON L, SPRINGMAN S. 2000. Shear strength. Swiss Federal Technical Institute, Zurich. Technical Paper. University of the West of England, Bristol, pp. 10.
- ESPINOZA J. 1970. Estudio de las Series de Suelo y Levantamiento Agrológico del Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepín. Universidad de Oriente. Maturín: Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería Agronómica [Ascenso a Profesor Asociado], pp. 42.
- FERMÍN A. 1971. Algunas relaciones suelo-agua de la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente. Maturín: Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería Agronómica [Disertación Grado Ingeniero Agrónomo], pp. 78.
- FERVERS CW. 2004. Improved FEM simulation model for tire-soil interaction. *J. Terramech.* 41(1):87-100.
- 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. Maturín: Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería Agronómica [Disertación Grado Ingeniero Agrónomo], pp. 75.
- GAZETAS G. 1991. *Foundation Vibrations*. *Foundation Engineering Handbook*, Chapter 15, H. Y. Fang, Ed., Van Nostrand Rein-hold, New York, NY, pp. 553-593.
- GONZÁLEZ CO. 2011. Modelación de la compactación provocada por el tráfico de neumáticos, de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio. Departamento de Ingeniería Agrícola. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, pp. 124.
- GONZÁLEZ CO, IGLESIAS-CORONEL CE, HERRERA-SUÁREZ M, URRIOLAGOITIA-SOSA G, URRIOLAGOITIA-CALDERÓN G, HERNÁNDEZ-GÓMEZ LH. 2009a. Parámetros de estado crítico empleados para la simulación de la respuesta mecánica de un suelo rhodic ferralsol (mediante el MEF). *Científica*. 13(4):199-204.
- GONZÁLEZ CO, IGLESIAS CC, HERRERA SM, BRAVO EL, IZNAGA AS. 2009b. Influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo. *Rev. Cien. Téc. Agropec.* 18(1):69-75.
- HAMMEL K. 1994. Soil stress distribution under lugged

- tires. *Soil Tillage Res.* 32(1):163-181.
- HERRERA M. 2006. Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos. La Habana: Universidad Agraria de La Habana [Disertación Doctor en Ciencias Técnicas], pp. 173.
- HERRERA M, IGLESIAS C, GONZALEZ O, LÓPEZ E, SÁNCHEZ AL. 2008. Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I. *Rev. Cien. Téc. Agropec.* 17(3):31-37.
- HOSSNE GA. 2008a. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana.* 26(1):195-202.
- HOSSNE GA. 2008b. Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas. Venezuela. *Rev. Cien. UDO Agrícola.* 8(1):107-117.
- HOSSNE GA. 2008c. Fisicomecánica y las Implicaciones Agrícolas de los Suelos de Sabana del Estado Monagas, Venezuela. Marturín: Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola [Ascenso Profesor Titular], Dos (2) Tomos, pp. 442.
- HOSSNE GA, SALAZAR J. 2004. Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo Ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Agronomía Costarricense.* 28(1):69-80.
- HOSSNE A, CRISTOPHER J, PAREDES G, CARVAJAL E, SANTAELLA J, MALAVER J, COVA A. 2003. Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Biagro.* 15(3):173-182.
- HOSSNE AJ, PAREDES G, CARVAJAL R, SANTAELLA E, MALAVER J. 2011. Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana. *Acta Universitaria.* 21(3):5-13.
- HURTADO JEA. 2012. Aparatos y técnicas para realizar ensayos triaxiales estáticos en balasto. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru, Rimac, Lima, Perú. Disponible en línea en: Web Master: jcc@uni.edu.pe. (Acceso 02.12.2012).
- INCI G, YESILLER N, KAGAWA T. 2003. Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils. *Geotech. Test. J.* 26(2):125-141.
- ISA. 2008. Elastic models. Disponible en línea en: <http://www.pisa.ab.ca/program/model/elastic/elastic.htm> (Acceso 05.10.2012).
- JAMALUDIN MD. 2012. Elastic-plastic soil model. Geotechnical, Highway and Survey Eng. Division. Faculty of Civil Engineering (mohdjamaludinmdnoor@yahoo.com). Universiti Teknologi Mara, Shah Alam, Malaysia.
- JOVIČIĆ V, COOP MP. 1998. The measurement of stiffness anisotropy in clays with bender element tests in the triaxial apparatus. *Geotech. Test. J.* 21(1):3-8.
- KARMAKAR S, SHARMA J, KUSHWAHA RL. 2004. Critical state elasto-plastic constitutive models for soil failure in tillage – A review. *Canadian Biosyst. Eng.* 46(1):2.19-2.23.
- KAWAGUCHI T, MITACHI T, SHIBUYA S. 2001. Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test. *Proc. Of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul (Turkey)*, pp. 155-158.
- KEMPER WD, ROSENAU RC. 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(5):1000-1006.
- KUSHWAHA RL, SHEN J. 1994. The application of plasticity in soil constitutive modeling. ASAE paper N° 941072. St Joseph, MI.
- LEE J, SALGADO R. 1999. Pre-failure loading response of foundations on sand. *Second International Symposium on Pre-Failure Deformation Characterization of Geomaterials, Turin, Italy, September 28-30, Vol. 1*, pp. 667-674.
- LUNA R, JADI H. (2000). Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities*

- and Infrastructure, St. Louis, MO. Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, Rolla MO, 65409. Disponible en línea en: rluna@umr.edu and hjadi@umr.edu. (Acceso 02.11.2013).
- McKENZIE DC, GREENHALGH SE, KOPPI AJ, MACLEOD DA, McBRATNEY AB. 2001. Cotton root growth in a compacted Vertisol (Grey Vertisol) II. Correlation with image analysis parameters. *Aust. J. Soil Res.* 39(1):1169-1181.
- MEDINA L, MAYNAR MM. 2003. Determinación de los parámetros del modelo de estado crítico Cam Clay para los suelos de Madrid. *Rev. Obras Públicas.* 3.432:29-45.
- MOUAZEN AM. 2002. Mechanical behaviour of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading, *J. Terramech.* 39:115-126.
- MOUAZEN AM, NEMÉNYI M. 1999. Finite elements of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil Till. Res. (UK).* 39(3):115-126.
- MOUAZEN AM, HERMAN R, DE BAERDEMAEKER J. 2002. Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties of sandy loam soil. *Biosyst. Eng.* 83(2):217-224.
- MULLINS CE, MACLEOD DA, NORTHCOTE KH, TISDALL JM, YOUNG IM. 1990. Hardsetting soils: Behaviour. Occurrence and management. *Adv. Soil Sci.* 11:37-108.
- NELSON RG, SUMMERS JD, BOLIE JB. 1997. Frequency and moisture content effects on the visco-elastic characteristics of soil. *Soil Technol.* 10:21-33.
- OBRZUD R, TRUTY A. 2012. The hardening soil model - a practical guidebook z soil. PC 100701 report (Revised 31.01.2012).
- PETTERSEN O. 2007. Sandstone compaction, grain packing and critical state theory. *Petroleum Geoscience*, 13: 63-67. Centre for Integrated Petroleum Research, Allégt. 41, 5007 Bergen, Norway (e-mail: oystein.pettersen@cipr.uib.no).
- PISA. 2008. Elastic models. Disponible en línea en: <http://www.pisa.ab.ca/program/model/elastic/elastic.htm> (Acceso 18.04.2011).
- PUTRI EE, KAMESWARA RAO NSV, MANNAN MA. 2010. Evaluation of the Modulus of Elasticity and Resilient Modulus for Highway Subgrades. *Electron. J. Geotechn. Engin.* 15(1):1285-1293.
- RAMIA M. 1967. Tipos de sabanas en los llanos de Venezuela. *Bol. Soc. Venez. Cienc. Nat.* 112:264-288.
- RAPER RL, ERBACH DC. 1990a. Effect of variable linear elastic parameters finite element prediction of soil compaction. *Trans. ASAE.* 33(3):731-736.
- RAPER RL, ERBACH DC. 1990b. Prediction of soil stress using the finite element method. *Trans. ASAE.* 33(3):725-730.
- RAPER RL, JOHNSON CE, BAILEY AC. 1994. Coupling normal and shearing stresses to use in finite element analysis of soil compaction. *Trans. ASAE.* 37(5):1417-1422.
- RECAREY C. 2000. Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas [Disertación Doctoral].
- RICKMAN RW, WALDMAN SE, KLEPPER BL. 1992. Calculating daily root length density profiles by applying elastic theory to agricultural soils. *J. Plant Nutr.* 15(6 and 7):661-675.
- ROMAÑA GJF. 2012. Los límites de la ley de Darcy. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas [Disertación Magister en Ingeniería-Geotecnia], pp. 95.
- RUCKS L, GARCÍA F, KAPLÁN A, PONCE DE LEÓN J, HILL M. 2004. Propiedades Físicas del Suelo. Universidad de La República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay, pp. 68.
- SCHOLANDER J. 1973. The bearing capacity of some forest soils for wheeled vehicles. Some technical aspects and consequences. Royal College of Forestry, Department of Operational Efficiency. Stockholm. *Research Notes № 64*, pp. 120.
- SHOOP SA. 2001. Finite element modeling of tire-terrain interaction. Technical report ERDC/CRREL TR-01-16. Michigan, EEUU. 69 pp. 7.23 Mb.

- SKEMPTON AW. 1953. The colloidal activity of clays. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3. Zürich. Proceedings. 1:57-6.
- SMITH CYA. 1990. Caracterización del estado del potasio en 10 estratos subsuperficiales de suelos de la región Nororiental. Maturín: Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica [Disertación Grado Ingeniero Agrónomo], pp. 83.
- SMITH GN. 1979. Elements of soil mechanics for civil and mining engineering. Fourth edition. Granada Publishing, pp. 424.
- SORIN Ș, VLĂDUȚ V, UNGUREANU N, PARASCHIV G, VOICU G. 2009. Development and experimental testing of a FEM model for the stress distribution analysis in agricultural soil due to artificial compaction. *Agriculturae Conspectus Scientifici*. 74(1):21-29.
- VELÁSQUEZ CHJ, MONTOYA L, MARY L, CARDONA ML. 2005. Characterization of mechanical properties of banana (Cavendish Valery). *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*. 58(2):2975-2988.
- VESETH R. 1988. Traffic Compaction Affects Productivity. Conservation Tillage Handbook Series. Chapter 2 - Systems and Equipment, No. 9.
- VIKTÓRIA M, BALÁZS K, LÁSZLÓ S. 2011. The moisture content dependency of some soil-physical properties of agricultural soils. *A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat*. 81:363-368.
- WETLANDS RESEARCH PROGRAM TECHNICAL REPORT. 1994. Engineering properties of wetland soils. Technical Note. WRP TN SG-RS-1. 2. Disponible en línea en: _EL-Inquiry@erdc.usace.army.mil. virginia.l.dickerson@usace.army.mil (Acceso 05.11.2012).
- WILSON GV, ALFONSI JM, JARDINE PM. 1989. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of two forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53(1):679-685.
- WULFSOHN D, ADAMS BA. 2002. Elastoplastic soil mechanics. *In: Advances in Soil Dynamics, ASABE*. 2(1):1-116.
- YDROGO BJC. 2006. Contracción lineal de un suelo ultisol de sabana en el horizonte 15-30 mm y sus implicaciones agrícolas del estado Monagas. VI Congreso Científico de la Universidad de Oriente, Ingeniería y Tecnología, IT093. Puerto La Cruz, estado Anzoátegui, Venezuela.
- YULIANG L, LINGJING W. 2009. The application of discontinuous deformation analysis in the slope stability of the expansive soil. Edited by Guowei MA and Yingxin ZHOU. Published by Research Publishing Services. Copyright _c 2009 by Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore). ISBN: 978-981-08-4455-4. College of Civil & Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China. Disponible en línea en: E-mail: lxl@gxu.edu.cn. (Acceso 02.11.2012).