

LA DENSIDAD APARENTE Y SUS IMPLICACIONES AGRÍCOLAS EN EL PROCESO EXPANSIÓN/CONTRACCIÓN DEL SUELO

Bulk Density and its Agricultural Implications in the Soil Expansion/Shrinkage Process

Américo J. Hossne G.¹

RESUMEN

En el proceso de expansión/contracción del suelo, ocasionado por los cambios de humedad, el volumen total de una masa considerada de suelo varía, produciendo cambios en la densidad aparente. Los suelos franco arenosos de la sabana de Venezuela, cuya arcilla es la caolinita, presentan tenacidad y tendencia a fragmentarse en condiciones de baja humedad. Los objetivos fueron (a) presentar nuevas expresiones algebraicas para la indexación de los suelos agrícolas en donde se involucren el contenido de humedad, la densidad aparente seca ($\rho_s = M_s/V_T$), la densidad aparente húmeda o *in situ* ($\rho_N = M_T/V_T$), el volumen de poros del suelo y la relación de solidez ($i_s = V_s/V_T$), (b) utilizar un procedimiento experimental para analizar el comportamiento de las funciones $\rho_s = f(w, V_v)$, $\rho_N = f(w, V_v)$ y las variaciones diferenciales de $d\rho_s/dV_v$ y $d\rho_N/dV_v$ y (c) estudiar las relaciones, implicaciones y usos en la agricultura. Se utilizó un procedimiento algebraico con índices de suelo conocidos para definir las expresiones matemáticas introducidas, el método de contracción lineal para encontrar la relación entre las densidades, humedad y volumen de poros, y el análisis de regresión para estudiar las variaciones entre las variables. Como resultados y conclusiones se obtuvieron: (a) nuevas relaciones para las densidades aparentes, seca y húmeda, en función de i_s , w y θ_w , (b) las densidades aparentes varían lineal e inversamente proporcionales con respecto a w y V_v ; con mayor correlación con respecto a V_v , (c) las variaciones diferenciales son inversamente proporcionales a V_v con fuerte correlación lineal, (d) la densidad aparente húmeda debería ser la utilizada para evaluar el estado de expansión/contracción y compactación, de los suelos en la agricultura, y (e) se debe proporcionar la humedad y

el volumen de poros cuando se citan datos de las densidades.

Palabras clave: *contracción lineal del suelo, Ultisol de sabana, suelo caolinítico, volumen de poros, variabilidad $d\rho_s/dV_v$.*

SUMMARY

In the process of soil expansion/shrinkage caused by changes in water content, total volume of a given mass of soil varies due to the variations in void volume, producing changes in bulk density. The sandy loam kaolinitic soil of the Venezuelan savanna exhibits tenacity and fragmentation when moisture content is low. The objectives of this study were (a) to present new algebraic expressions for the indexation of agricultural soil involving water content, dry ($\rho_s = M_s/V_T$) or natural ($\rho_N = M_T/V_T$) density, soil void volume, and solidity relationship ($i_s = V_s/V_T$), (b) to use an experimental procedure to analyze the behavior of the functions $\rho_s = f(w, V_v)$, $\rho_N = f(w, V_v)$ and the differential variations of $d\rho_s/dV_v$, and $d\rho_N/dV_v$, and (c) to study the relationships, implications, and uses in agriculture. An algebraic procedure was used with known indexes to define the introduced mathematical expressions, the method of linear contraction to find the relationship between densities, water content and void volume, and regression analysis to study the variations among the parameters. Results and conclusions obtained were (a) new relationships for the dry and natural bulk densities according to i_s , w , and θ_w , (b) bulk densities vary linearly and are inversely proportional with respect to w and V_v correlate more highly with V_v , (c) the differential variations are inversely proportional to V_v with strong linear correlation, (d) natural bulk density should be used to evaluate the expansion/contraction state and compaction of agricultural soils, and (e) soil water content and void volume should be provided together with density data.

¹Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Ingeniería Agrícola, Campus Guarito. Maturín, Estado Monagas, Venezuela (americohossne@cantv.net)

Index words: soil linear contraction, savanna Ultisol, kaolinitic soil, porous volume, differential variability of $d\rho_s/dV_v$.

INTRODUCCIÓN

La relación $\rho_s = f(w)$, con el contenido de humedad de la muestra determinado en la estufa sin ninguna clase de energía de compactación, es un índice físico común de la compactación del suelo, y como resultado se le considera agrónomicamente afectar tanto el ambiente radical como el movimiento de solutos / gases. Se le acepta como un índice de penetrabilidad radical y es siempre evaluado de acuerdo con su definición (M_s/V_T) sin proporcionar el contenido de humedad del suelo o el volumen de poros. La relación $\rho_s = f(w, Ec)$ con w determinado en la estufa y energía de compactación (Ec), con la metodología Proctor establecida, se utiliza para determinar la humedad óptima de compactación de los suelos; produce $\rho_s = f(w, w^2, w^3)$ o con polinomios hasta de quinto grado. La relación $\rho_N = M_T/V_T$ es poco utilizada en la agricultura. La densidad aparente seca, la textura, el índice cónico, la macro y microporosidad, el contenido de humedad, el volumen de aire y oxígeno de los suelos agrícolas se han estudiado innumerablemente para evaluar el efecto sobre el crecimiento de las plantas; sin embargo, las relaciones con la humedad poco se reseñan. Cuando se evalúan las densidades aparentes no se reporta la humedad del suelo; sólo cuando se evalúa la humedad óptima de compactación. Allbrook (1992) indica que sus datos mostraron que la dependencia de la densidad aparente con respecto al contenido de agua del suelo es un fenómeno general. El objetivo general de este trabajo consistió en estudiar el comportamiento de las densidades aparentes de un suelo franco arenoso de sabana en los procesos de humedecimiento y secamiento. Los objetivos específicos fueron (a) presentar nuevas expresiones algebraicas para la indización de los suelos agrícolas en donde la densidad seca o natural sean función de la humedad y el volumen de poros del suelo, (b) utilizar un procedimiento experimental con muestras de suelo franco arenoso de sabana para analizar el comportamiento de las funciones $\rho_s = f(w, V_v)$, $\rho_N = f(w, V_v)$ y las variaciones diferenciales de $d\rho_s/dV_v$, y $d\rho_N/dV_v$ de un suelo franco arenoso de sabana en condiciones naturales de humedecimiento y secamiento, y (c) estudiar las relaciones, implicaciones y los usos en la agricultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo para el análisis experimental se realizó en un suelo franco arenoso de sabana en el Estado Monagas, situado a una altitud de 147 m y coordenadas geográficas de 9° 41' 33" N y 63° 23' O; con una precipitación anual de 1127 mm y una temperatura media anual de 27.5 °C. La vegetación típica es la de sabana: chaparro (*Curatella americana* (Dilleniaceae)), merey (*Anacardium occidentale*), paja peluda (*Trachypogon y Axonopas* sp.), manteco (*Byrsonima crassifolia* Malpighiaceae, mastranto (*Hyptis suaveolens*) Lamiaceae, Gramíneas, Ciperaceas, etc. El área de trabajo presenta un Ultisol de sabana del grupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertermic. El Cuadro 1 muestra los componentes físicos del suelo estudiado. Estos suelos ocupan una extensa área agrícola venezolana y se utilizan en la explotación de muchos rubros, con labores de encalado y fertilización, como maíz, sorgo, yuca y pastizales.

Se perforaron 20 pozos pedológicos, en un área representativa de alrededor de 3 ha, se formaron muestras compuestas por horizonte. La recolección de las muestras y la ubicación de los pozos se hicieron mediante el muestreo simple aleatorizado. Se realizó un muestreo aleatorio (dos cilindros por horizonte) en cada uno de los cuatro horizontes (0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm) en cada pozo. Se utilizaron siete repeticiones por capa en el análisis experimental para demostrar la relación entre la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo. Se utilizaron los resultados del análisis de contracción lineal del suelo bajo sombra en la demostración experimental por un período de 72 h. Las observaciones se realizaron cada 12 h, evaluándose el volumen de poros, las densidades aparentes, la humedad y la contracción lineal. Se evaluó con datos experimentales la variabilidad diferencial o pendiente $d\rho_s/dV_v = - [M_s/(V_s + V_v)^2]$ y $d\rho_N/dV_v = - [M_T/(V_s + V_v)^2]$ para medir sus comportamientos con respecto a V_v y w . Se determinaron ρ_s y ρ_N estableciéndose sus relaciones con V_v y w .

Para obtener las expresiones algebraicas introducidas en función de w , i_s y V_v , se utilizó:

$$w = M_w/M_s, \rho_s = M_s/V_T, V_w = \theta_w V_T \text{ y } \rho_N = M_T/V_T$$

donde: M_w es la masa de agua, M_s es la masa de los sólidos, el volumen total V_T y el contenido de agua

Cuadro 1. Componentes físicos y el tamaño de las partículas del suelo estudiado.

| Profundidad | Arena muy gruesa | Arena gruesa | Arena media | Arena fina | Arena muy fina | Limo | Arcilla caolinítica | Materia orgánica |
|---------------------------------|------------------|--------------|-------------|------------|----------------|-------|---------------------|------------------|
| cm | ----- % ----- | | | | | | | |
| 0 a 15 | 0.22 | 2.91 | 12.18 | 39.13 | 13.93 | 19.43 | 12.20 | 0.38 |
| 15 a 30 | 0.52 | 2.23 | 11.07 | 41.09 | 10.51 | 18.38 | 16.20 | 0.27 |
| 30 a 45 | 0.30 | 2.46 | 10.30 | 34.56 | 12.58 | 21.60 | 18.20 | 0.20 |
| 45 a 60 | 0.33 | 2.64 | 10.84 | 30.69 | 14.63 | 20.67 | 20.20 | 0.13 |
| Tamaño promedio partículas (mm) | 1.45 | 0.72 | 0.37 | 0.151 | 0.07 | 0.053 | 0.024 | |

volumétrico θ_w y la relación de solidez $i_s = V_s/V_T$ (Hossne, 2002).

Se utilizó el análisis de regresión para interpretar la variación de ρ_s , ρ_N , $d\rho_s/dV_v$ y $d\rho_N/dV_v$ con respecto a V_v y w .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cambios estructurales de un suelo producto del factor expansión/contracción originan variaciones en el volumen, alterando el volumen de agua y el volumen de aire. Esto puede causar compactación si hay disminución del volumen de aire (V_a) y consolidación si se genera disminución de los poros de agua (V_w). La variación natural de V_w produce aumento o disminución de V_v , que es el único parámetro que puede variar la densidad aparente de un suelo. En su estudio, Illston y Basara (2005) concluyeron la existencia de correlaciones moderadas entre la porosidad y el secamiento del suelo.

Las variaciones de V_w y V_a sólo producen cambios en V_v y, por lo tanto, en V_T . Las variaciones en V_v son causadas por las atracciones y repulsiones de las partículas. Las siguientes expresiones algebraicas introducidas muestran que V_T varía con los cambios del contenido de agua del suelo al producirse variaciones en V_v . G es la gravedad específica y S el porcentaje de saturación.

$$\rho_s = M_s \theta_w / V_w \quad (1)$$

$$\rho_s = M_t \theta_w / [V_w(1 + w)] \quad (2)$$

$$\rho_s = M_s(1 - \theta_w)/(V_s + V_a) \quad (3)$$

$$\rho_N = M_t(1 - \theta_w)/(V_s + V_a) \quad (4)$$

$$\rho_N = \rho_s(1 + w) = i_s G + S(1 - i_s) \quad (5)$$

Aplicando límite a las expresiones, cuando θ_w e i_s tienden a 1, las densidades tienden a cero. Los resultados reportados por Allbrook (1992) corroboran que cuando se estime la densidad aparente, se debe especificar el contenido de humedad.

La relación existente entre densidad seca y contenido de humedad para los horizontes estudiados se presenta en la Figura 1. Se observa que la densidad seca decrece con el aumento de la humedad. Se nota una mayor variación en los estratos más profundos, debido al aumento del contenido de caolinita-limo. El suelo estudiado mostró una variación de la densidad seca entre 6.28 y 9.86 kg m⁻³ (0.00628 a 0.00986 g cm⁻³) entre el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC), respectivamente. Desde el punto de vista agrícola se le puede considerar como un proceso de descompactación en el transcurso de expansión del suelo, lo que implicaría la importancia de mantener los suelos a CC.

El análisis de regresión mostró la existencia de una correlación lineal alta negativa de la densidad seca *versus* la humedad del contenido de humedad hasta cierto límite (Cuadro 2). Lugo (1995) y Méndez *et al.* (1998) encontraron que a mayor humedad en el suelo aumenta la densidad aparente. Esto se debió al efecto Proctor producido por la energía de compactación introducida por los aperos agrícolas y la barrena Uhlund. Allbrook (1992) propuso que la densidad aparente puede diferir por 300 kg m⁻³ entre el punto de marchitez y la CC, para los suelos con mezclas de vermiculita y caolinita, que pudo haber hecho una diferencia remarcable en el cálculo del contenido volumétrico de agua. Este autor también estableció que la diferencia entre ambos valores de la contracción residual y normal se puede atribuir a las arcillas, con valores altos para los suelos alofánicos al compararse con los suelos haloisíticos y caoliníticos, y que la diferencia entre horizontes es pequeña pero refleja

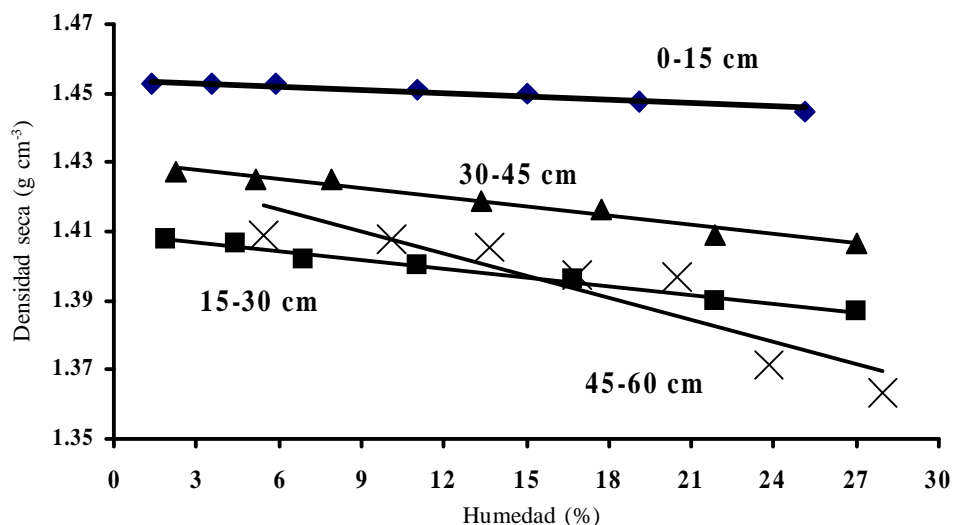


Figura 1. La densidad seca en relación con el contenido de humedad del suelo para los horizontes estudiados.

Cuadro 2. Análisis de regresión para la función $\rho_s = f(w)$ para los horizontes estudiados.

| Horizonte cm | Ecuación | r^2 % | Error típico | Significancia |
|-----------------|-----------------------------------|------------|--------------|---------------|
| 0-15 | $\rho_s = -0.000331 w + 1.453884$ | 94.9 | 0.00073 | 0.0002 |
| 15-30 | $\rho_s = -0.0008363 w + 1.4092$ | 98.7 | 0.001 | < 0.0001 |
| 30-45 | $\rho_s = -0.00088 w + 1.4302$ | 97.2 | 0.0015 | < 0.0001 |
| 45-60 | $\rho_s = -0.002138 w + 1.4291$ | 83.4 | 0.008 | 0.0041 |

la aceptada idea general que las densidades aparentes aumentan con la profundidad. Sin embargo, el pequeño grado de diferencia es que los horizontes más húmedos pueden ser menos densos que los menos húmedos.

La Figura 2 muestra la densidad aparente natural (ρ_N) en relación con el contenido de humedad del suelo para los cuatro horizontes en el proceso de secamiento natural. La relación de $\rho_N = f(w)$ se mantiene con mayor uniformidad y mejor correlación que la $\rho_s = f(w)$.

El análisis de regresión produjo una correlación lineal alta de la densidad natural *versus* la humedad, mayor que con respecto a la densidad aparente seca (Cuadro 3). Allbrook (1992), trabajando con suelos whangaripo (vermiculita más caolinita), encontró contracción normal. Hossne y Salazar (2004) encontraron para estos suelos contracción normal que, al aplicar la regresión paso a paso, la interacción caolinita-limo resultó altamente significativa desde el punto de vista estadístico. La influencia de w sobre ρ_s aumenta en las capas más profundas, posiblemente debido a la combinación

caolinita-limo, que estadísticamente es el causante de la existencia del índice plástico, aunque bajo, de estos suelos (Hossne y Salazar, 2004).

En la Figura 3 se muestra la relación existente entre ρ_s y V_v y w . La variabilidad de ρ_s es más marcada con respecto a V_v que a w . Se observa que la densidad seca disminuye al aumentar el volumen de suelo y aumenta o disminuye con la variación de la humedad. Un pronunciado decrecimiento entre 4 y 7%, y de 13% en adelante. Las crestas de mayor densidad seca se dieron para el menor volumen y a bajas humedades. El PMP y la CC del suelo estudiado se encontraron alrededor del 6 y 12%, respectivamente. La retención de humedad varía de 7.68 a 12.01% para el suelo estudiado, aumentando al profundizar en el perfil del suelo, esto es debido al aumento en el contenido de caolinita.

Se concluye que ρ_s es altamente influenciada por V_v . El modelo matemático analizado con la regresión lineal múltiple (Cuadro 4) mostró que la mayor influencia sobre la densidad seca la causó la variable V_v , con mayor

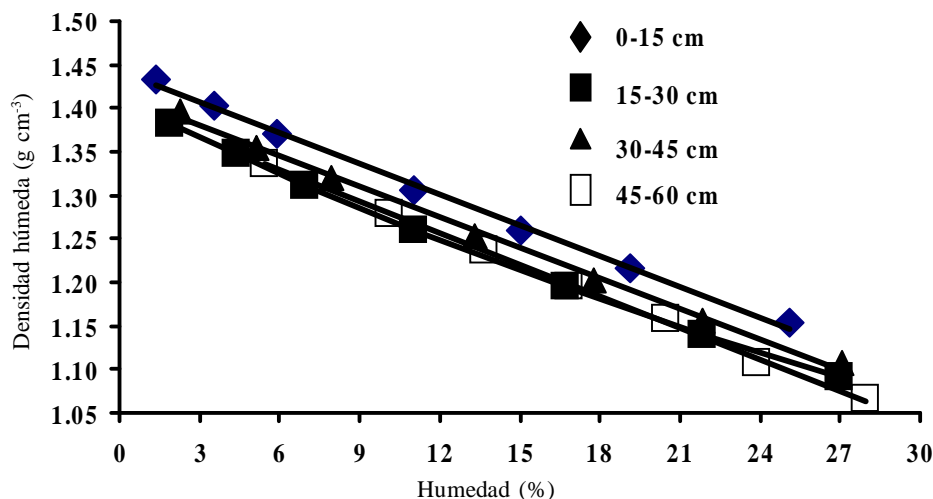


Figura 2. La densidad aparente natural en relación con el contenido de humedad del suelo para los horizontes estudiados.

Cuadro 3. Análisis de regresión para la función $r_N = f(w)$ para los horizontes estudiados.

| Horizonte cm | Ecuación | r^2 % | Error típico | Significancia |
|-----------------|----------------------------------|------------|--------------|---------------|
| 0-15 | $\rho_N = -0.01177 w + 1.44268$ | 99.7 | 0.006 | < 0.0001 |
| 15-30 | $\rho_N = -0.01154 w + 1.3951$ | 99.6 | 0.007 | < 0.0001 |
| 30-45 | $\rho_N = -0.011697 w + 1.41489$ | 99.7 | 0.0065 | < 0.0001 |
| 45-60 | $\rho_N = -0.01211 w + 1.40166$ | 99.8 | 0.0038 | < 0.0001 |

influencia en el horizonte 0-15 cm, tanto la variable V_v como w influyen inversamente proporcional (Figura 3).

La Figura 4 muestra una mayor variabilidad de $d\rho_s/dV_v$ con respecto a V_v para valores del contenido de humedad menores de 6%. El decrecimiento observado ocurre después de alrededor del 12%. La $d\rho_s/dV_v$ es inversamente proporcional a V_v . Esto soporta la proporcionalidad inversa de ρ_s versus V_v . Para todos los horizontes los cambios de V_v con respecto a w se observaron alrededor del PMP entre 4 y 6% w . La mayor variabilidad diferencial con respecto a V_v se obtuvo en el horizonte 30-45 cm, siguiéndole los horizontes 45-60 cm, 15-30 cm y 0-15 cm. Esto se debió a la mezcla de caolinita-limo. A bajas humedades estos suelos son fácilmente fraccionados en las labores con aperos que se fijen al suelo.

El modelo matemático analizado con la regresión lineal múltiple (Cuadro 5) mostró que la mayor influencia sobre $d\rho_s/dV_v$ la causó la variable V_v , con mayor influencia en el horizonte 0-15 cm, tanto la variable V_v y w influyen inversamente proporcional (Figura 4).

El coeficiente de correlación V_v versus w resultó ser: 0.969, 0.938, 0.925 y 0.938 para los horizontes 0-15 cm,

15-30 cm, 30-45 cm y 45-60 cm, respectivamente. En el proceso de contracción de un suelo los poros se hacen más pequeños y la tensión capilar potencial máxima aumenta. Cuando un suelo saturado se seca y se contrae, la relación de vacíos disminuye y, con ella, la máxima tensión capilar y la resistencia a la contracción aumentan, aunque a diferentes proporciones. Si se continúa secando el suelo, no se reducirá más la relación de vacíos porque la resistencia a la compresión es superior a la tensión capilar. Este punto se conoce con el nombre de límite de contracción donde cesa prácticamente la reducción de la relación de vacíos. Gens y Alonso (1992) expusieron que la contracción/expansión está asociada con las arcillas, pero el fenómeno de capilaridad controla en gran escala el arreglo geométrico de las arcillas y de las partículas más gruesas. Gili y Alonso (2002) manifestaron que el comportamiento de las arenas insaturadas está controlado por el efecto de capilaridad. Alonso (2003) declaró que en el comportamiento de las arenas y limo las fuerzas de capilaridad aumentan las fuerzas de contacto entre las partículas, esto sería lo que contribuiría a la tenacidad y resistencia de estos suelos.

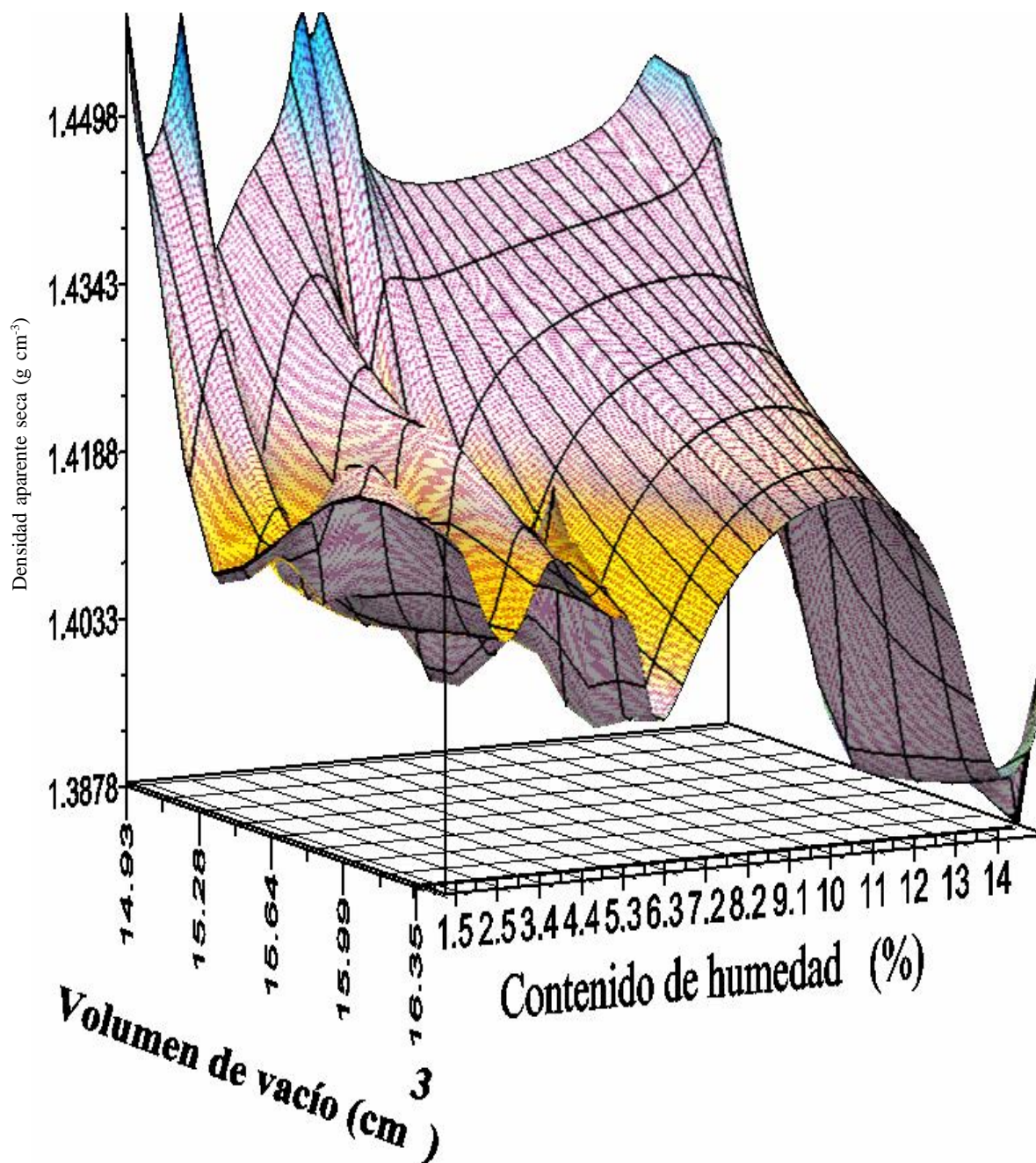


Figura 3. Densidad aparente seca (r_s) versus el volumen de poros y el contenido de humedad.

Cuadro 4. Análisis de regresión para $r_s = f(V_v, w, V_v w)$ para los horizontes estudiados.

| Horizonte | Ecuación | r^2 | Error típico | Significancia |
|-----------|---|-------|--------------|--------------------------------|
| cm | | % | | |
| 0-15 | $\rho_s = 2.083 - 0.042 V_v - 0.0003 w + 2.046E-5 V_v w$ | 99 | < 0.0001 | 0.0001, 0.0004, 0.062 y 0.061 |
| 15-30 | $\rho_s = 2.03 - 0.041 V_v - 0.0006 w + 3.91E-5 V_v w$ | 99 | < 0.0001 | 0.00055, 0.002, 0.20 y 0.19 |
| 30-45 | $\rho_s = 2.041 - 0.039 V_v - 0.00053 w + 3.298E-5 V_v w$ | 99 | < 0.0001 | 0.0002, 0.0007, 0.086 y 0.085 |
| 45-60 | $\rho_s = 2.03 - 0.04 V_v - 0.0006 w + 3.899E-5 V_v w$ | 99 | < 0.0001 | 0.00036, 0.0012, 0.126 y 0.123 |

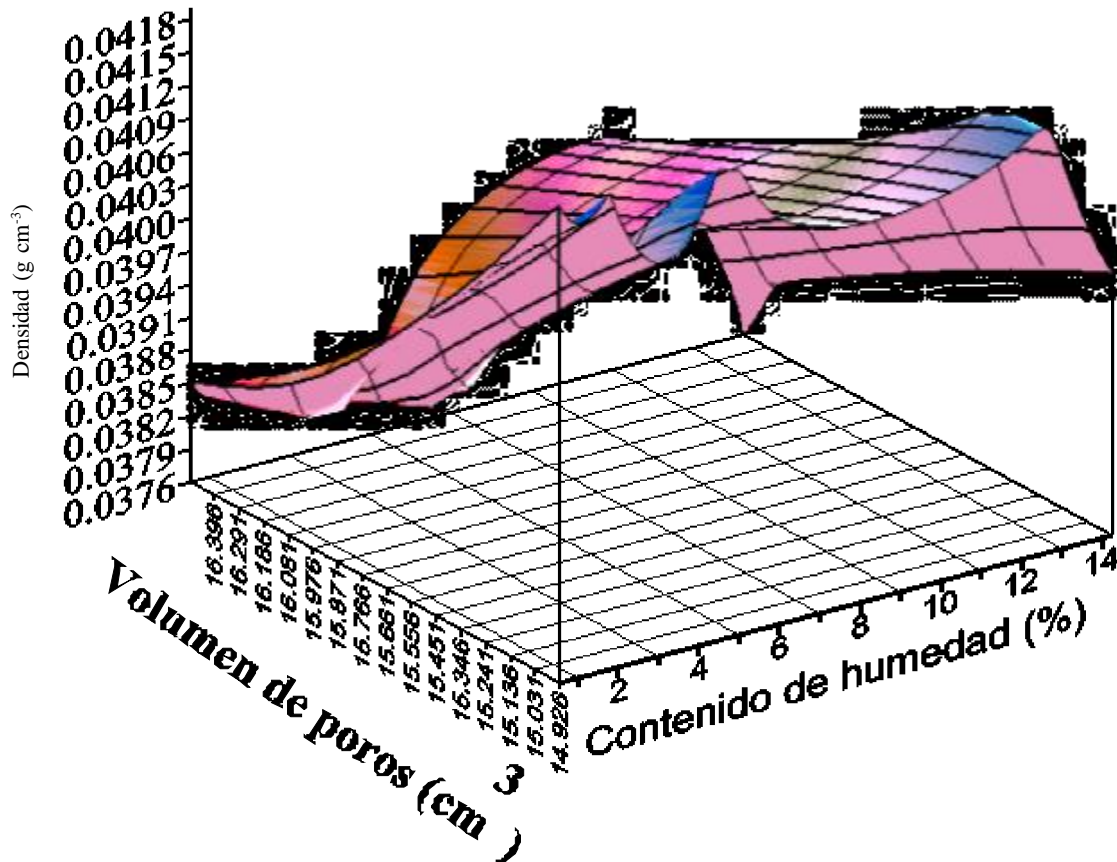


Figura 4. Variabilidad diferencial con respecto el volumen de poros y el contenido de agua del suelo.

Cuadro 5. El análisis de regresión para la relación $d\rho_s/dV_v = f(V_v, w, V_v w)$ para los horizontes estudiados.

| Horizonte | Ecuación | r^2 | Error típico | Significancia |
|-----------|---|-------|---------------------|--------------------------------|
| cm | | % | F | |
| 0-15 | $d\rho_s/dV_v = 0.0078 - 0.0024 V_v - 2.63E-5 w + 1.76E-6 V_v w$ | 99 | < 0.0001 0.00029 | 0.0003, 0.00062, 0.062 y 0.061 |
| 15-30 | $d\rho_s/dV_v = 0.077 - 0.0024 V_v - 5.18E-5 w + 3.39E-6 V_v w$ | 99 | < 0.0001 0.0017 | 0.0013, 0.0027, 0.19 y 0.19 |
| 30-45 | $\rho_s/dV_v = 0.0072 - 0.0021 V_v - 4.281E-5 w + 2.661E-6 V_v w$ | 99 | < 0.0001 0.00069 | 0.00047, 0.001, 0.087 y 0.085 |
| 45-60 | $d\rho_s/dV_v = 0.074 - 0.0022 V_v - 5.18E-5 w + 3.24E-6 V_v w$ | 99 | < 0.0001 0.00114 | 0.00082, 0.0017, 0.127 y 0.124 |

CONCLUSIONES

Las densidades aparentes del suelo estudiado son alteradas y varían en forma inversamente proporcional a la humedad. La densidad seca de estos suelos cambia con los procesos de secamiento natural y en la estufa. Las funciones $\rho_s = f(w)$ y $\rho_N = f(w)$ producen relaciones lineales en función de w y V_v en los humedecimientos y secamientos naturales del suelo estudiado con correlación

fuerte. Cuando se proporcionan los valores numéricos de las densidades aparentes de un suelo, éstos deben ser acompañados por el contenido de humedad y las características texturales de ese suelo. El volumen de poros (V_v) produjo correlación más fuerte con respecto a las densidades ρ_s y ρ_N . La mayor variabilidad diferencial se encontró en los perfiles de 30-45 cm y 45-60 cm, menor en el de 15-30 cm y mucho menor en el de 0-15 cm. La variabilidad diferencial $d\rho_s/dV_v$ mostró

correlación alta con respecto al volumen de poros. La correlación de V_v versus w encontrada fue 0.943 promedio; esto puede implicar que en la variación de V_v entran otros factores, como posiblemente la capilaridad y la atracción entre las partículas. Se debe utilizar la densidad aparente natural (ρ_N) para evaluar la densidad aparente en la agricultura. Los análisis de regresión lineales de ρ_s y ρ_N en el secamiento natural produjeron un valor de r^2 mayor para la variable densidad natural. Se puede considerar que la capilaridad y la atracción entre las partículas contribuyeron al proceso expansión/contracción de estos suelos. El suelo estudiado presenta en estado natural o *in situ* su menor compactación en el intervalo de retención de humedades, el cual se debe mantener. Se recomienda, en la determinación de la densidad aparente de estos suelos, hacer los muestreos con el mismo contenido de humedad o en un intervalo similar, y estudios sobre los factores que influyen en la variabilidad del volumen de poros.

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente de Venezuela por su soporte y financiamiento para esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Allbrook, R. F. 1992. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for soil physics. *Aust. J. Soil Res.* 31: 111-118.
- Alonso, E. 2003. Exploring the limits of unsaturated soil mechanics: the behavior of coarse granular soil and rockfill. The Eleventh Spencer J. Buchanan Lecture. College Station Hilton, TX, USA. <http://ceprofs.edu/briaud/buchanan.htm>. (Consulta: enero 25, 2006).
- Gens, A. and E. E. Alonso. 1992. A framework for the behavior of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.* 29: 1013-1032.
- Gili, J. A. and E. E. Alonso 2002. Microstructural deformation mechanisms of unsaturated granular soils. *Int. J. Numerical Anal. Methods Geomechanics* 26: 433-468.
- Hossne G., A. 2002. Valoración física conformante del ambiente radical. *UDO Agrícola* 2: 84-94.
- Hossne G., A. y J. Salazar. 2004. Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo Ultisol de sabana del Estado Monagas de Venezuela. *Agronomía Costarricense* 28: 69-80.
- Illston, B. G. and J. B. Basara. 2005. A soil moisture analysis of drought conditions using Oklahoma mesonet. Oklahoma Climatological Survey, Oklahoma University. Norman, OK, USA.
- Lugo, J. 1995. Compactación de suelo bajo usos agrícola. pp. 47-49. *In: Primer taller sobre aspectos físicos de los suelos de las sabanas orientales y su efecto sobre la productividad. Publicación especial 30. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Venezuela.*
- Méndez, N. J., O. L. Medina, J. A. Fendel y J. P. Merazo. 1998. Relaciones entre características del suelo y la planta en tres variedades de ajonjolí sometidas a diferentes prácticas de manejo. *Bioagro* 10: 48-56.