

Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela

Terramechanic evaluation of the root growth in an ultisol soil of savanna of the Monagas State of Venezuela

Américo J. Hossne G.

Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica, Universidad de Oriente. Dirección de correos: Américo Hossne, Apartado Postal 414, Maturín, Monagas, Venezuela 6201-A.
Email: americohossne@cantv.net

RESUMEN

Es un concepto generalizado que las densidades aparentes (ρ_N , ρ_S) del suelo son índices del crecimiento radical al considerar que las raíces crecen a través de los espacios interpartículas y que los suelos compactados, sin referencia comparativa con la humedad, ofrecen resistencia. Esto ha conllevado a considerar que el impedimento primordial en el desarrollo radicular es la compactación. Los índices mecánicos del suelo son pocos o casi nunca nombrados para los suelos agrícolas, a menos que se trate de tracción. El objetivo general se basa en evaluar las condiciones mecánicas y físicas de los suelos de sabana con el fin de producir informaciones contribuyentes a esclarecer el proceso del crecimiento radical. Los objetivos específicos consistieron en: (a) relacionar los esfuerzos ejercidos por las raíces desarrollados en su crecimiento y la resistencia mecánica del suelo estudiado y (b) evaluar las condiciones físicas y mecánicas del suelo y su influencia en el desarrollo radical. La metodología se basó en los métodos de Mecánica y Física de Suelo para evaluar algunos índices físicos, el Aparato Triaxial para evaluar la tensión cortante τ y la evaluación de los esfuerzos radicales versus resistencia edáfica en el proceso de crecimiento radical por análisis bibliográfico. El análisis de regresión fue utilizado para interpretar la variancia entre los parámetros. Entre los resultados: (1) se estableció la tensión cortante del suelo, (2) se registraron valores comparativos de las cargas axiales de las raíces y las resistencias del suelo que inhiben su crecimiento con los valores de la tensión cortante τ en función de la humedad (w), los límites de consistencia y la capacidad de campo, y (3) la importancia de algunos componentes texturales y materia orgánica. Se concluye: (a) la humedad edáfica influye en la penetrabilidad radical, el cual disminuye las acciones de resistencia de los parámetros físicos y terramecánicos; (b) la raíz crece, de acuerdo a la sección de área, a través del suelo por donde haya menor resistencia, o cizallando el suelo en donde la tensión axial radical sea al menos mayor a la resistencia del suelo, en donde las masas de suelos posiblemente colapsan una frente a la otra o que el crecimiento radial produce apertura lateral favoreciendo el crecimiento radial, y (c) la acción de crecimiento de las raíces aumentan su tensión axial al aumentar la resistencia del suelo con un valor crítico de 2.343,2 kPa para un 20,78 % de crecimiento. Estos suelos ejercen una resistencia menores a los 0,5 MPa en el rango de la capacidad de campo.

Palabras clave: Resistencia mecánica del suelo, tensión axial, límites de consistencia, humedad edáfica.

ABSTRACT

It is a widespread concept that the apparent densities (ρ_N , ρ_S) of the soil are index of radical growth when considering that the roots grow through the interparticle spaces and that the compacted soil, without comparative reference of the soil humidity, offer resistance. This has borne to consider that the primordial impediment in the radical development is soil compaction. The mechanical soil indexes are few or hardly ever mentioned for the agricultural soils, unless it is a question of soil traction. The general objective is based on evaluating the mechanical and physical conditions of the savanna soils with the purpose of producing contributing information to clarify the process of the radical growth. The specific objectives consisted in: (a) to relate the efforts exercised by the roots developed in their growth and the mechanical resistance of the studied soil and (b) to evaluate the physical and mechanical conditions of the soil and their influence in the radical development. The methodology was based on the methods of Soil Mechanics and Soil Physics to evaluate some physical indexes, the Apparatus Triaxial to evaluate the shear tension τ and the evaluation of the efforts versus soil resistance in the process of radical growth obtained bibliographically. The regression analysis was used to interpret the variance among the parameters. Among the results: (1) the soil shear tension was established, (2) comparative values of the axial loads of the roots and soil resistances that inhibit its growth with the values of the shear tension τ as a function of the soil humidity (w), the limits of consistency and the field capacity, and (3) the importance of some textural components and organic matter. It is concluded: (a) the soil humidity influences radical penetrability, which diminishes the actions of the physical and terramechanic parameters resistance; (b) the root grows, according to the area section, through the soil where there is

smaller resistance, or shearing the soil where the radial axial tension is at least bigger to the soil resistance where the soil masses possibly collapse one in front of the other or that the radial growth produces lateral opening favoring the radial growth, and (c) the root growth action increases its axial tension when increasing the soil resistance with a critical value of 2,343.2 kPa for 20.78% of growth. These soils exercised a resistance minor to the 0.5 MPa in the range of the field capacity.

Key words: Soil mechanic resistance, axial tension, consistency limits, soil moisture.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento del proceso fisiológico y biofísico del crecimiento radicular de las plantas en los suelos, podría proveer resultados para evaluar la selección de plantas con sistemas radicales que mejor se adapten a condiciones particulares (Bengough *et al* 2004b). Es muy creído que en las áreas de sabana, el desarrollo radicular es impedido por la compactación de estos suelos que pueden comprimirse hasta por sí mismo debido a los cambios de humedad, la influencia de la temperatura y el abandono del suelo después de la cosecha a la inclemencia del medio sin cobertura viva. La densidad aparente seca (ρ_s) es un índice de compactación o porosidad aerífera. Se le ha considerado como un índice de penetrabilidad radical. Un axioma generalizado es que las raíces crecen a través de los espacios interpartículas y que por lo tanto los suelos compactados ofrecen resistencia. Lutz (1952) enfatizó que existía un gran vacío en el conocimiento sobre impedimentos mecánicos y el crecimiento de las plantas.

Los estudios de la resistencia al cizalleo de los suelos agrícolas por efecto de la presión radical han sido poco incursionados, posiblemente debido a la aceptación generalizada que el crecimiento de las raíces es contrarrestado por la compactación y que crecen al través de los intersticios edáficos. Al respecto, Martino y Shaykewich (1994) establecieron que la resistencia de 2000 kPa 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 2000 kPa, 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 y los poros aeríferos son mayores de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, y que esta relación era independiente de la textura del suelo y para una resistencia de 1300 kPa la elongación máxima se redujo a la mitad. Como comparación con las cargas ejercidas por las raíces según Pfeffer (1893), compilado por Gill y Bolt (1955) y Misra *et al* (1986), citado por Martino y Shaykewich (1994), la presión máxima que una raíz

puede ejercer está restringida alrededor de 700 a 1300 kPa en la dirección axial y de 400 a 600 kPa en la dirección radial. Bengough *et al* (2004b) encontraron que las raíces pueden ejercer presiones de 1 MPa lo cual es alrededor de cinco veces más que la presión en los neumáticos de vehículos y que la tensión en las paredes de las células en expansión excede los 100 MPa, dos veces mayor que la tensión en las paredes del neumático. Nadian (2002) trabajando con *T. alexanderium* mostró que el tamaño de los agregados afecta el crecimiento de las raíces y plántulas. Poco se referencia la importancia de la humedad del suelo para el desarrollo radicular con respecto a la resistencia del suelo, al respecto Coder (2000) establece que el requerimiento de agua para el desarrollo radical debe tener un mínimo del 12 % y un máximo del 40 %. El objetivo consistió en analizar la influencia de la humedad, la densidad aparente, la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna en la resistencia del suelo al crecimiento radical. Los objetivos específicos consistieron en: (a) relacionar los esfuerzos ejercidos por las raíces desarrollados en su crecimiento y la resistencia mecánica del suelo estudiado y (b) evaluar las condiciones físicas y mecánicas del suelo y su influencia en el desarrollo radical.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo para realizar las pruebas en el triaxial se realizó en suelos de sabanas de Jusepín, estado Monagas, situada a 147 m.s.n.m. con coordenadas geográficas de $9^{\circ} 41' 33''$ de latitud Norte y $63^{\circ} 23'$ de longitud Oeste; con una precipitación media anual de 1127 mm. En el área predomina una vegetación típica de sabana: Chaparro (*Curatella americana* (Dilleniaceae)), Manteco (*Byrsonima crassifolia* (Malpighiaceae)), Mastranto (*Hyptis suaveolens* (Lamiaceae)), Gramíneas, Ciperáceas, etc.). El área de trabajo seleccionado dentro de la Unidad II de suelo en estudio, pertenece a las condiciones de un Ultisol de sabana y al grupo de los Oxíc Paleustult Isohipertérmic, en condiciones de suelo virgen. Los componentes físicos se muestran respectivamente en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución del tamaño de partículas en el perfil del suelo estudiado. Suelo de sabana Ultisol del Estado Monagas, Venezuela

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 promedio de las Partículas (mm)	1,41	0,72	0,37	0,15	0,07	0,02 a 0,002	Menor a 0,0002

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 de sabana de la Universidad de Oriente, en Jusepín, 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 abrieron 20 calicatas para la recolección de las muestras y se conformó como una muestra compuesta. La recolección de las muestras y ubicación del sitio para el estratificado se realizó apoyado en el método de muestreo aleatorio simple. En cada uno de las áreas de muestreo se realizó un muestreo en los horizontes comprendidos entre 0,0 – 0,15, 0,15 – 0,30, 0,30 – 0,45 y 0,45 – 0,60 m de profundidad, tomando muestras al azar del mismo. Para el análisis en el triaxial, las muestras se conformaron como una muestra combinada.

Estadísticamente el análisis de regresión es utilizado para interpretar la variancia entre los parámetros evaluados. Las pruebas triaxiales se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

La información sobre la resistencia del suelo al crecimiento de la raíz, la penetración radical y la tensión radical axial, fueron obtenidas de una amplia revisión bibliográfica relacionadas con los impedimentos para el desarrollo radical.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra la penetración radical (%) y la tensión axial (kPa) de las raíces con respecto

a la resistencia del suelo. Se observa que al aumentar la resistencia del suelo, la tensión axial compresiva σ ejercida por la raíz, aumenta de tal forma que produce un crecimiento radical semi constante hasta tender a cero en donde la resistencia del suelo está entre los 2000 y 3000 kPa. El crecimiento cae rápidamente un 50 % hasta alrededor de los 500 kPa de resistencia edáfica; luego, se mantiene aproximadamente constante hasta los 1500 kPa, y de aquí el crecimiento cae rápidamente hasta la paralización para una resistencia de 2500 kPa del suelo. A partir de los 1500 kPa, la tensión de la raíz empieza a aumentar. Las curvas de la penetración radical y la tensión axial se cruzan en un punto, para esta intersección se obtiene un polinomio de tercer grado, que al resolverlo produce dos raíces complejas y una real igual a $23,432 \cdot 10^2$ kPa de resistencia del suelo para el cual la penetración radical es del 20,78 % y la tensión radical axial es de $20,78 \cdot 10^2$ kPa. El análisis de regresión lineal de la tensión radical axial versus la resistencia del suelo produce un r^2 de 56,32 % y un valor crítico de F de 0,0013 para una significación del 0,05 y la ecuación de regresión $\tau_A = 0,579 \cdot Re + 3,965$ para una probabilidad de 0,0013 para la variable y 0,036 para el intercepto. El análisis lineal de la penetración radical versus la resistencia del suelo produce un r^2 de 70,93 % y un valor crítico de F de $8,17E-05$, para una significación del 0,05 y la ecuación de regresión $Pe = -2,01 \cdot Re + 71,357$ para una probabilidad de $8,17E-05$ para la variable y $3,90E-10$ para el intercepto.

La Figura 2 muestra la franja de la capacidad de campo, índice de marchitez y límite líquido para un suelo Ultisol de sabana, relacionándola con la tensión cortante. Se produce el área friable alrededor del límite plástico, en donde el índice plástico es alrededor entre 3,59 y 5,78 (Salazar, 1999; Hossne,

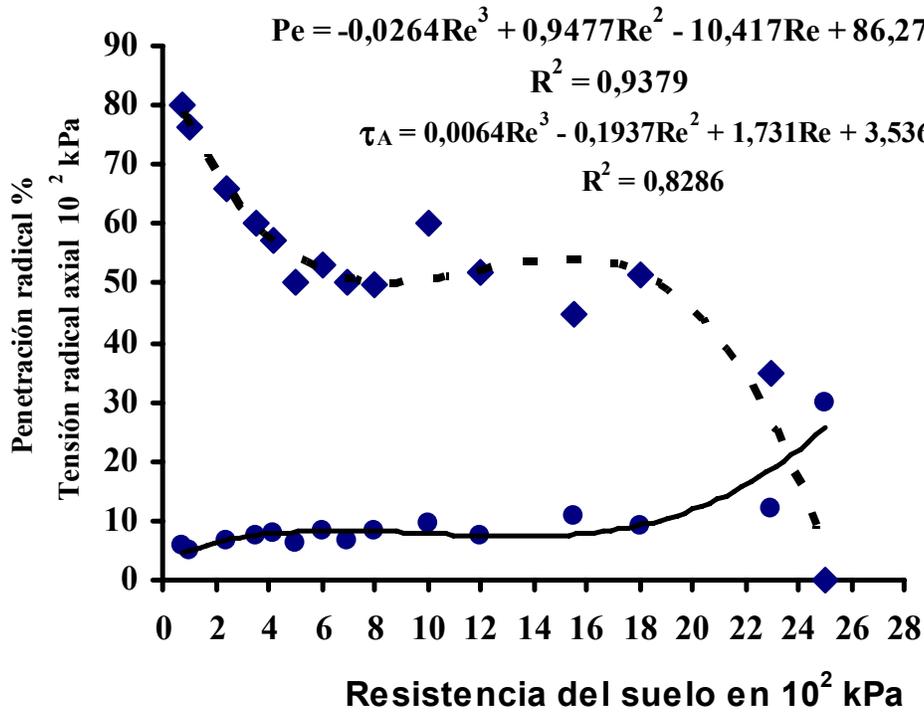


Figura 1. Penetración radical en porcentaje (-----) y la tensión axial radical en 102 kPa (—) relación con la resistencia del suelo en 102 kPa.

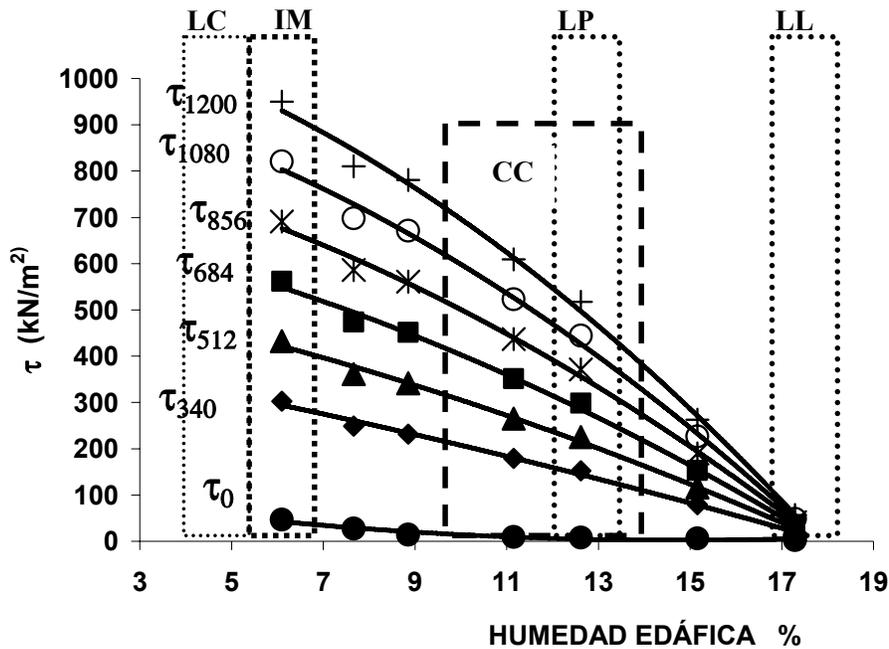


Figura 2. Tensión cortante (τ) en kN/m^2 ($\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$) para diferentes tensiones de compresión (σ_3) en kN/m^2 con respecto a la humedad, en relación con el límite líquido (LL), la capacidad de campo (CC), el límite de contracción (LC) y el índice de marchites (IM) de un suelo ultisol del Estado Monagas

2004 y Salazar, 2001a). Los máximos valores de τ se encuentran en el estado sólido, disminuyen rápidamente después del índice de marchites, estado friable y se reducen mucho más en el estado plástico, acercándose a cero en el límite líquido del suelo estudiado. El análisis de regresión para la relación $\tau_{340} = f(w)$, produce un r^2 de 0,98, error típico de 9,83; una probabilidad del modelo de $1,45E-57$, una relación algebraica $\tau = 421,007 - 22,284*w$ con una probabilidad para los coeficientes de $1,93E-74$ y $1,45E-57$ respectivamente.

La Figura 3 muestra la relación entre la densidad aparente seca (ρ_s) y w a diferentes profundidades. Se observa la variación inversa de (ρ_s) versus w , la cual es mayor a la profundidad de 450 - 600 mm. La humedad disminuye la compactación de los suelos en estudio.

DISCUSIÓN

Los parámetros terramecánicos cohesión aparente y ángulo de fricción interna conforman la estructura resistente del suelo (τ), los cuales varían con el contenido de materia orgánica, componentes texturales en donde es importante la presencia de arcillas, cationes intercambiables, el contenido de humedad del suelo, y en especial para los suelos agrícolas el zooplantum y el fitoplantum. La humedad edáfica produce variaciones dinámicas y rápidas en

los valores de τ . La Figura 1 muestra que después de los 2.343,2 kPa de resistencia del suelo el crecimiento radical es detenido con gran rapidez, para este valor el crecimiento radical está en un 20,78 %, y para 2500 kPa el crecimiento se paralizaría por completo. Se puede observar que al aumentar la resistencia del suelo la tensión axial radical también aumenta. Estos resultados apoyan los encontrados por otros investigadores. En el rango de resistencia del suelo entre 700 kPa y 1700 kPa el crecimiento radical se mantiene aproximadamente en un 50 %. Relaciones al respecto presentadas por Gill y Bolt (1955) al revisar la publicación de Pfeffer (1893) que las plantas pueden ejercer presiones por encima de los 2500 kPa durante el crecimiento. Una presión alrededor de 700 kPa (7 bar) (700 kN/m²) (7 kg/cm²) es requerida para expandir una cavidad radical en un suelo suficientemente denso para paralizar la penetración radical. Esto es similar a la presión máxima que una raíz puede ejercer en crecimiento. Casi todas las raíces de algodón penetraron suelos con poca resistencia, pero la proporción disminuyó con el aumento de la resistencia, hasta que ninguna raíz penetró a una resistencia de 3000 kPa, indiferentemente si la alta resistencia fue causada por el aumento de la densidad seca o por la reducción en la humedad edáfica (ASAE, 1981). Existe información relacionada con la distribución de las raíces debido a la importancia asumida para un adecuado suministro de agua (Phene *et al* 1991; Sharp y Davies, 1988), citado por Liegens and Richner,

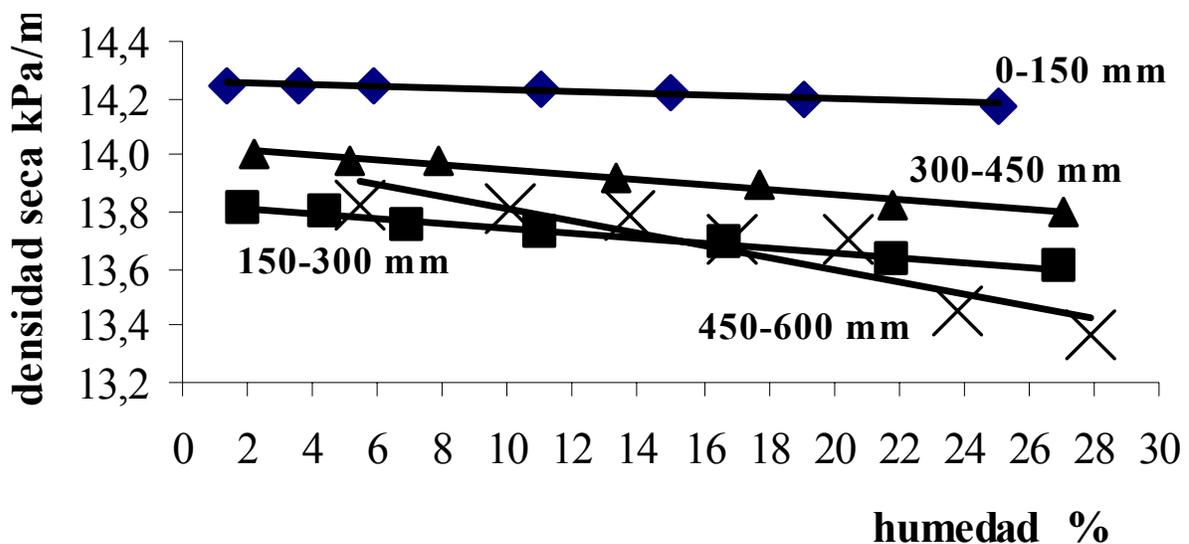


Figura 3. Densidad aparente seca versus el contenido de humedad del suelo a las profundidades de 0-150, 150-300, 300-450 y 450-600 mm.

(2001). Sin embargo, las variaciones en la distribución en el plano horizontal de las raíces podría también influenciar el suministro de agua para la planta (Tardieu, 1988), citado por Liegens and Richner, 2001. Kaspar *et al* 1991, citado por Liegens and Richner, 2001, manifestaron que agrónomicamente las variaciones horizontales de las raíces son importantes especialmente cuando concierne el tráfico de ruedas y la colocación de fertilizantes. Greacen (1981) citado por Cornish (1998) en su estudio comparando un suelo franco limoso con uno franco arenoso, ambos con una densidad aparente seca de $1,3 \text{ g/cm}^3$, encontraron que el crecimiento de las raíces fue menor en el suelo franco limoso debido a su mayor resistencia. El secamiento reduce el crecimiento mayor en el suelo franco limoso que en el franco arenoso debido a que la resistencia del suelo aumentó a una mayor razón. Él también estableció que para una resistencia al penetrometro de 3000 kPa a una profundidad de 300 mm, el crecimiento prácticamente se paralizó. Bengough *et al* (2004a) trabajando con maíz y guisantes establecieron que el diámetro de las raíces en un suelo franco arenoso con una resistencia a la penetración de alrededor 2000 kPa fue aproximadamente el doble para la de 500 kPa. Vepraskas *et al* (1986) encontraron una alta relación entre la tasa de elongación, el porcentaje de penetración y la concentración de raíces en la medida que se incrementó la resistencia mecánica desde valores de cero hasta 3200 kPa, indicando como valor crítico para el desarrollo de raíces, un índice de cono de 2800 kPa.

La Figura 2 muestra que los suelos franco arenosos de sabana en el proceso de falla no alcanzan a más allá de 1000 kPa y para las humedades en el rango de la capacidad de campo no llega a 800 kPa y entre 11 % y 12 % no pasa de los 600 kPa. Si el suelo se encuentra a bajas presiones como sucede en los 0,30 m de profundidad, la resistencia del suelo en ningún momento pasa de los 100 kPa. Esto podría inferir que el verdadero impedimento al crecimiento radical es el contenido de agua adecuado también exigido por la planta. Al respecto Bengough *et al* (2004b) trabajando con cebada y trigo en suelos arenosos encontraron que la resistencia del suelo es difícil de separarla del efecto del contenido de agua, y como resultado obtuvieron que al compactar el suelo decreció el crecimiento y la elongación de las hojas en minutos, luego el suelo fue saturado con una solución de nutrimentos aireada a la presión atmosférica y la resistencia del medio cambió. En el

rango de la capacidad de campo no hay resistencia alguna para el desarrollo radical. De acuerdo a Baver *et al* (1972) la tensión cortante para suelos sin consolidación aumenta linealmente con la humedad hasta un máximo cerca del límite plástico, y luego decrece a una cantidad muy baja al llegar al límite líquido. De acuerdo a la teoría de las películas de plasticidad, esto es esperado, ya que la tensión y cohesión máxima de una película ocurre cerca del contenido de humedad del límite plástico. La fuerza tensión-película en el límite líquido son muy pequeñas y el flujo es producido. Una vez que el suelo está en límite plástico hay poca fricción interna; consecuentemente, la tensión está en función de la cohesión de la película húmeda más que del límite plástico. En lo que la humedad se acerca al límite líquido la tensión cortante asume las propiedades de un flujo viscoso. La tensión cortante máxima es proporcional al índice plástico, como es de esperarse ya que la tensión cortante es función de la cohesión debido a la humedad. Cuanto más alto es el contenido de arcilla, mayor es la contribución de la cohesión a la resistencia.

Según Tardieu (1988), citado por Liegens and Richner (2001), hay un menor consumo de agua cuando las raíces están agrupadas que cuando se encuentran distribuidas uniformemente. El maní es bastante sembrado en suelos tropicales semiáridos. Erráticas y limitadas lluvias limita la productividad en estas regiones, la carencia de agua durante la colocación de la semilla influencia altamente la productividad más que las sequías en las fases siguientes (Boot y Hammond, 1981; Negeswara *et al* 1985; Pallas *et al*. 1979). El efecto de la carencia de agua durante la fase vegetativa indican consecuencias mínimas en el crecimiento y rendimiento del maní (Ketring *et al* 1982; Reddy and Reddy 1977; Stansell *et al*. 1976; Stansell and Pallas 1976). Según Harris (1971) cuando se le aplica carga a un suelo, la mayor acción dentro del suelo es el arreglo de las partículas y la reducción en los poros, especialmente en los poros grandes. Este arreglo de las partículas y reducción de los poros, aumenta tanto la compactación como la cohesión del suelo. Esto se pone de manifiesto en la Figura 2 en la cual no se observa relación con la humedad.

Compactación, humedad edáfica y crecimiento radicular

El índice de plasticidad es una medida de la cohesividad de un suelo, cuanto mayor sea su valor

mayor la atracción entre las partículas. El ángulo de fricción interno disminuye al aumentar el índice de plasticidad. Este suelo es moderadamente plástico y un cambio de volumen es pequeño pero sucede. El término fracción gruesa del suelo engloba a las partículas mayores de 2 mm de diámetro. Este material se conoce también como gravas, clastos o esqueleto del suelo. Cuando esta fracción representa más del 40% del volumen de un suelo, éste se definiría como pedregoso o esquelético ISRIC, 1994, citado por Sanjurjo (1999).

La variación de la densidad aparente inversamente proporcional con respecto a la humedad edáfica, fue demostrada por Hossne (1997a, 1997b, 1998, 1999, 2001, 2001a) para un suelo Ultisol. Esto muestra el proceso de compactación que experimentan los suelos con la variación de la humedad edáfica. La disminución de la densidad aparente al aumentar la humedad del suelo conlleva a una disminución de la compactación. La compactación de los suelos es una característica de los suelos exánimes, no son agrícolas, por manejos inadecuados, abandonados y expuestos a variaciones de humedad por tiempos largos. Se ha establecido que con muchas excepciones se consideran los valores de 1,55, 1,65, 1,80 y 1,85 g/cm³ para la densidad aparente seca, que causarían impedimentos severos en el crecimiento radical y el rendimiento, en suelos franco arcilloso, franco limoso, franco arenoso fino, y arenosos finos francos, respectivamente (ASAE, 1981); pero, no se dice nada del contenido de humedad edáfica.

Unger y Kaspar (1994) concluyen que las condiciones del tiempo a través del agua del suelo que influyen la resistencia del suelo pueden mejorar o disminuir el efecto de compactación en el crecimiento radical. Aún si la compactación limita el crecimiento radical, los subsecuentes eventos de tiempo podrían mejorar o disminuir el efecto de las limitaciones radicales al crecimiento de las plantas. Oljaca (1994) concluyó que en suelos franco limo arcilloso pesados y livianos, que la compactación de los suelos es mayor cuando expuestos a rodamientos de hierros y que la penetración al penetrómetro para los rodamientos de hierros es del 22,31 % a 150 %, y para los rodamientos de gomas es del 20,05 % al 120,63 % en relación al suelo descompactado. Sin embargo, él no hace la observación que a medida que aumenta el índice cónico disminuye la humedad. La humedad registrada varió un 18,85 %, la resistencia a la penetración un 67,92 % y la densidad seca un 5,68

%. Se podría inferir la influencia de la humedad en la variación de la resistencia al penetrómetro. Veihmeyer y Hendrickson (1948) conclusivamente mostraron que el aumento en la densidad seca reduce el crecimiento de las raíces aún en suelos en donde la aireación no era problema. No se hace mención de la humedad. Los cultivos que crecen en áreas semiáridas y áridas del mundo en donde a menudo son sembrados cuando el suelo está por debajo de la capacidad de campo, pero aún suficiente para que germinen. El impedimento mecánico es función tanto de la densidad seca como del contenido de agua. Las capas con bajo contenido de agua algunas veces impiden el crecimiento de las raíces hasta que llueva (Taylor *et al* (1964)) o hasta que agua sea aplicada por riego. Cuando el agua es agregada, la resistencia del suelo disminuye y la penetración radical aumenta. Riego adicional que aumente el contenido disponible de agua aumenta el crecimiento inclusive en capas de alta resistencia (ASAE, 1981). El impedimento mecánico es más severo en áreas semiáridas en donde la materia orgánica es baja y el suelo se seca rápidamente (ASAE, 1981). Taylor y Burnett (1964) mostraron que al sembrar algodón, una capa de suelo inmediatamente debajo de la semilla fue compactada por el mecanismo de apertura y la bota sembradora; la semilla germinó y las raicillas penetraron la capa compactada, la que subsecuentemente se secó; durante el secamiento, el suelo se hizo resistente al aumentar la tensión cortante. Las raíces se expandieron lateralmente por arriba y debajo de la capa compactada, cuando la capa compactada fue humedecida por la lluvia, el diámetro radical pronto aumentó y lo que vivía de las plantas se recuperó. Taylor *et al* 1964b mostraron que los suelos aumentan en resistencia cuando compactados, y que el suelo compactado obtiene más resistencia cuando pierden agua. Taylor y Gardner (1963), citado por Unger y Kaspar (1994), mostraron que la resistencia del suelo es suficientemente grande para limitar críticamente la penetración de la raíz de algodón, y que se puede obtener aumentando la densidad aparente o disminuyendo el potencial mátrico del agua edáfica. Además de la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo que afectan la resistencia del suelo, se incluye el contenido de arcilla y los cationes intercambiables (Mathers *et al* (1966), citado por Unger y Kaspar (1994). Lawton (1945) obtuvo un 65 % de reducción en el crecimiento radical del maíz en un suelo franco cuando el suelo fue compactado a baja porosidad de aireación de 37 % a 1,00 %.

Braunack y Williams (1993) concluyen que el contenido inicial de la humedad es importante para determinar la resistencia del suelo y así su perturbación. Ellos introducen la expresión $NCR = 377 - 14.7 * w$ para predecir la resistencia al penetrómetro normalizado (NCR) en kPa/cm en función de la humedad para el suelo en estudio. Según Baber *et al* 1972 la cantidad de agua disponible en el suelo afecta el crecimiento radical. Las raíces no penetran los suelos secos y la tasa de elongación disminuye al aumentar la tensión del agua edáfica. La presencia de sustancias tóxicas, tal como la presencia excesiva de aluminio soluble, restringen el crecimiento radical. Dos factores principales en suelos compactados que afectan el sistema radical son la aireación y los impedimentos mecánicos. En otras palabras, la habilidad de las raíces para penetrar es función de la porosidad y la compresibilidad. Otra forma para contrarrestar la resistencia del suelo es con el agregado de materia orgánica. Esto se puede lograr con el uso de la labranza cero, rotación de cultivos, estercolar o aplicar otros materiales orgánicos (Unger y Kaspar, 1994). Ohu *et al* 1985, citado por Unger y Kaspar (1994) mostraron que al agregar materia orgánica disminuyó la resistencia a la penetración del suelo cuando es compactado.

La raíz crece a lo largo de las masas de suelo de menor resistencia, como por ejemplo los poros, y aumenta su acción de tensión axial proporcionalmente a la resistencia del suelo en acción cizallante de la masa de suelo que encuentre. Bengough *et al* (2004b) trabajando con arvejas encontraron que la presión de las raíces en suelos sin restricciones era la misma que en los suelos restringidos. Cuando la raíz en su crecimiento avanza, un número de masas del suelo, proporcional al volumen de la raíz, fallan al colapsar una en frente de la otra. Las componentes horizontales y verticales de la resistencia del suelo son cíclicas y en fase con cada una, con distintos valores de crestas y canales. Cuando la raíz avanza en la masa del suelo semiinfinito, causa fallas en intervalos periódicos. Cuando el suelo colapsa, la raíz se mueve en la masa de suelo colapsada que a su vez causa desplazamiento del suelo a lo largo de la raíz. Cuanto mayor sea la sección de área de la raíz, mayor es el número de fallas. Esto varía con el tipo de raíz, en especial aquellas que tienen componentes cálcicos en las puntas o terminales de la raíz. Esto expuesto es la forma como sucede en elementos de aperos que se aplican al suelo. Holloway y Dexter (1990) recomiendan el desarrollo de la labranza biológica con variedades de lombrices que son más activas en

condiciones secas o el uso de plantas con sistemas radicales que son mejores para penetrar los suelos compactados.

CONCLUSIONES

1. La cohesión aparente, el ángulo de fricción interno, la densidad aparente, la humedad edáfica (la cual varía la magnitud inversamente proporcional de los anteriores) afectan el crecimiento radical. El suelo estudiado bajo condiciones adecuadas de humedad no ofrecería ninguna resistencia al desarrollo radicular. La resistencia de los suelos de sabana en el rango de la capacidad de campo no sería mayor de los 500 kPa. El valor crítico es del orden de 2.343,2 kPa para un 20,78 % de crecimiento. La mayor resistencia de estos suelos se encontró en el estado sólido con un límite contracción entre 4% y 5 % de humedad.
2. Como la densidad aparente, la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna son alterados inversamente proporcionales por la humedad edáfica, se puede inferir que la humedad edáfica es el factor fundamental en el crecimiento radical y que es el verdadero índice de penetrabilidad radical.
3. La raíz crece, de acuerdo a la sección de área, a través del suelo por donde haya menor resistencia o cizallando la masa de suelo cuando σ de la raíz (radial o axial) sea mayor a la resistencia del suelo, las masas de suelos colapsan una frente a la otra.
4. Cuando se presentan valores de las densidades aparentes, índices cónicos, la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna deben estar acompañadas de la humedad edáfica, características texturales del perfil físico y el perfil químico del suelo en cuestión. Si es posible, la precipitación caída en el lugar bajo estudio.
5. La densidad aparente no se le debería considerar el índice de penetrabilidad radical, sólo como un índice de porosidad aerífera o de compactación. Los efectos de los parámetros terramecánicos juegan gran importancia.

AGRADECIMIENTOS

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

LITERATURA CITADA

- ASAE. 1981. Modifying the root environment to reduce crop stress. Edited by Arkin, G. F., and Taylor, H. M. Monograph number 4. American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, P.O. Box 410, St. Joseph, Michigan 49085. 407 p.
- Baver, L. D., W. H. Gardner and W. R. Gardner. 1972. Soil Physics. John Wiley & Sons, New York. Fourth Edition. 489 p.
- Bengough, A. G., J. M. Kirby, M. F. O'Sullivan, R. P. 2004a. Mechanics of root growth in soil. Scottish Crop Research Institute, Dundee DD2 5DA, Scotland, UK. 4 p.
- Bengough, A. G., C. Crosser, J. M. Kirby, I. M. Young, J. Pritchard and B. M. McKenzie. 2004b. Physics and physiology of plant growth in the soil. Plant, soils and Environment 134-135. www.scn.san.ac.uk/annualreportdocuments/98indiv/26physic. Última visita 22 de octubre de 2004.
- Boot, K. J. and L. C. Hammond. 1981. Effect of drought on vegetative and reproductive development of peanut. Proc. Am. Peanut Res. Edu. Soc. 13:86 (Abstr).
- Braunack, M. V. and B. G. Williams. 1993. The effect of initial water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. Journal of Terramechanics, Vol. 30:299-311.
- Coder, K. D. 2000. Tree root growth requirements. University of Georgia. Warnell School of Forest Resources. Extension Publication FOR00-5. Web site: www.forestry.uga.edu/efr. 7 p. Última visita 28 de noviembre de 2004.
- Cornish P. 1998. Soil physical requirements for germination, root development, plant production and survival. 25 years of the Rivering Outlook Conference, Wagga 1973-1998. Agricultural Research Institute, Wagga Wagga, NSW 2650, 20 p.
- Espinoza, J. 1970. Estudio de las Series de Suelo y Levantamiento Agrológico del Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepín. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela: 42 p.
- Gill, W. R. and G. H. Bolt. 1955. Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. Agronomy Journal. 47:166-168.
- Greacen, E. L. (1981). Physical properties and water relations. In Red-Brown Earths. (Eds. Oades, Lewis, Norrish). Waite A.R.1. and CSIRO, Div. Soils: Adelaide) 83-96.
- Harris, W. L. 1971. The soil compaction process pp. 9-44 in Barnes, K. K. *et al.* Compaction of agricultural soils. Pub. ASAE St. Joseph, MI 49085.
- Holloway, R. E. and A. R. Dexter. 1990. Traffic intensity on arable land on the Eyre Peninsula of South Australia. Journal of Terramechanics. Vol. 27 No. 3: 247-259.
- Hossne G., A. J. 1997a. Investigaciones sobre las interrelaciones terramecánicas entre la densidad y humedad de los suelos agrícolas. SABER Vol. 9 N° 1 Suplemento. Memorias del III Congreso Científico. Maturín, Estado Monagas, del 3 al 7 de noviembre de 1996.
- Hossne G., A. 1997b. Investigaciones Sobre las Acciones Físicas y Terramecánicas de la Humedad Edáfica en los Suelos Agrícolas. XLVIII Convención Anual ASOVAC. Universidad Rafael Belloso Chacín. Maracaibo del 9 al 13 de noviembre. ISSSN 0001 5504. Volumen 49 Suplemento 2. Agronomía II (Suelos). Pp208.
- Hossne G., A. 1998. Concernencia de la Cohesión Edáfica en la Compactación de los Suelos Agrícolas. VI Congreso Venezolano de Ingeniería Agrícola. Barquisimeto, Estado Lara, del 26 de julio al 01 de agosto.
- Hossne G., A. 1999. Concernencia de la Densidad Aparente en los Suelos Agrícolas. XV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Decanato de Agronomía. Del 30 al 4 de diciembre.

- Hossne G., A. J. 2004. Efecto de la humedad edáfica sobre la densidad aparente en los suelos agrícolas. VII congreso Venezolano de Ingeniería Agrícola, Evento Internacional
- Hossne G., A. J. 2001a. Investigación de la inherencia de la humedad edáfica sobre la densidad aparente en los suelos agrícolas. IV congreso Científico de la Universidad de Oriente, diciembre del 2 al 7 del 2001. Memorias: 123-139.
- Hossne G., A. J. 2001b. Índices físicos y terramecánicos conformantes del ambiente edáfico radical. LI convención anual de ASOVAC, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. Del 18 al 23 del 2001. Memorias
- Hossne G., A. J., J. Cristopher, G. Paredes, R. Carvajal, E. Santaella, J. Malaver y A. Cova. 2001. Cohesión y fricción interna versus densidad seca y humedad edáfica en un suelo Ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. XVI congreso Venezolano de la ciencia del Suelo. Maracaibo 25 al 29 de septiembre del 2001. Memorias CD: FS02: 9 p.
- Hossne, G. A. J. y J. F. Salazar. 2001a. Los límites de consistencia de un suelo Ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. XVI congreso Venezolano de la ciencia del Suelo. Maracaibo 25 al 29 de septiembre del 2001. Memorias CD: FS03: 9 p.
- Hossne, G. A. J. y J. F. Salazar. 2001b. Estado friable de un suelo Ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. XVI congreso Venezolano de la ciencia del Suelo. Maracaibo 25 al 29 de septiembre del 2001. Memorias en CD: FS06: 7 p.
- ISRIC, (1994). Directive pour la description des sols. 3^e édition (révisée). Centre International de Référence et d'Information pédologique. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Rome, Italy.
- Kaspar, T. C., H. J. Brown and E. M. Kassmeyer. 1991. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. *Soil Sci. Am. J.* 55:1390-1394.
- Kestring, D. L., R. H. Brown, G. A. Sullivan and B. B. Johnson. 1982. Growth physiology. P. 411-457. In Pattee, H. E. and Young, C. T. (ed.) *Peanut science and technology*. Am. Peanut Res. And Educ. Soc. Yoakum, TX.
- Lawton, K. 1945. The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrients by corn plants. *Soil Sci. soc. Am. Proc.*, 10:263-268.
- Liedgens, M. and W. Richner. 2001. Minirhizotron observation of spatial distribution of the maize root system. *Agronomy Journal*. 93:1097-1104.
- Lutz, J. F. 1952. Mechanical impedance. Pp. 43-71, In: B. T. Shaw, Ed. *Soil physical conditions and plant growth*. American Society Agron.
- 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.
- Mathers, A. C., F. B. Lotspeich, G. R. Laase and G. C. Wilson. 1966. Strength of compacted Amarillo fine sandy loam as influenced by moisture, clay content, and exchangeable cation. *Soil Sci. soc. Am. Pro.* 30:788-791.
- Misra, R. K., A. R. Dexter and A. M. Alston. 1986. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant Soil*. 95: 315-326.
- Nadian Habib. 2002. Mechanical impedance to root growth and phosphorus uptake. 17th WCSS, 14-21. Thailand. Symposium no. 22. Paper no. 1052: 1052(1)-1052(7).
- Negeswara, R., R. C. Sardar, M. V. Sivakumar, K. L. Srivastava and J. H. Williams. 1985. Effect of water deficit at different growth phases of peanut. I Yield response. *Agronomy Journal*. 77:782-786.
- Ohu, J. O., G. S. Raghavan and E. Mckyes. 1985. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 28:420-424.
- Oljaca, M. V. 1994. Damage to soil mechanical properties caused by iron and rubber tracks. *Journal of Terramechanics*, Vol. 5:279-284.
- Pallas, J. E. Jr., J. R. Stansell and T. J. Koske. 1979. Effects of drought on florunner peanuts. *Agronomy Journal*. 71:853-858.

- Pfeffer, W. 1893. Druck-und arbeitsleistung durch wachsende pflanzen. Abh. Sachs. Ges (Akad.) Wiss. 33:235-474.
- Phene, C. J., K. R. Davis, R. B. Hatmacher, B. Bar-Yosef, D. W. Meek and J. Misaki. 1991. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrigation Sci.* 12:135-140.
- Reddi, G. H. and M. N. Reddy. 1977. Efficient use of irrigation water for wheat and groundnut. *Mysore J. Agric. Sci.* 11:22-27.
- Sharp, R. E. and W. J. Davies. 1985. Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *J. Exp Bot.* 170:1441-1456.
- 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. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Jusepín, Estado Monagas, Venezuela. 62 p.
- Sanjurjo, M. J. E. 1999. Influencia de los fragmentos gruesos en algunas propiedades físicas y químicas del suelo: antecedentes y estado actual del tema. Publicado por la sociedad Española de Ciencia del Suelo. Volumen 6: 95-107.
- Stansell, J. R. and J. E. Jr. Pallas. 1979. Peanut response to timing and duration of drought stress as reflected in kernel yield and quality. *Proc. Am. Peanut Res. Educ. Soc.* 11:61 (Abstr).
- Stansell, J. R., J. L. Shepherd, J. E. Pallas, B. R. Bruce, N. A. Minton, D. K. Bell and L. W. Morgan. 1976. Peanut responses to soil water variables in the south east. *Peanut Sci.* 3:44-48.
- Tardieu, F. 1988. Analysis of the spatial variability of maize root density: 1 Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil.* 107:259-266.
- Taylor, H. M. and E. Burnett. 1964. Influence of soil strength on the root growth habits of plants. *Soil Sci.* 98:174-180.
- Taylor, H. M. and H. R. Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96:153-156.
- Taylor, H. M., A. C. Mathers and Lotspeich. 1964. Pans in southern great plains soils. I. Why root-restricting pans occur. *Agron. J.* 56:328-332.
- Unger, P. W. and T. C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: A review. *Agronomy Journal*, Vol. 86:759-766.
- Vepraskas, M; R. Sojka y G. Miner. 1986. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 50: 423-427.
- Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65:487-493.
- Zou, C.; C. Penfold, R. Sand, R. K. Misra and 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.