

EFFECTO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO SOBRE EL DESARROLLO RADICAL DEL MAÍZ CON DOS SISTEMAS DE LABRANZA

EFFECT OF SOIL STRUCTURE ON CORN ROOT DEVELOPMENT UNDER TWO TILLAGE SYSTEMS

Esteban S. Osuna-Ceja¹, Benjamín Figueroa-Sandoval², Klaudia Oleschko³, María de L. Flores-Delgadillo², Mario R. Martínez-Menes² y Félix V. González-Cossío²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP. 20600. Km 32.5. Carretera Aguascalientes-Zacatecas. Pabellón de Arteaga. Aguascalientes, México. (esosuna@yahoo.com.mx). ²Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. ³Instituto de Geología. Departamento de Edafología. Universidad Autónoma de México. Ciudad Universitaria. 76230. México, D. F.

RESUMEN

La estructura del suelo (arreglo geométrico y topológico de los poros del suelo que se forman entre los agregados, y su estabilidad en tiempo y espacio) es una propiedad básica considerada como uno de los principales atributos de la calidad del suelo. En este estudio se analizaron dos sistemas de labranza de largo plazo bajo riego: tradicional (LT) y de conservación (LC), con especial énfasis en el comportamiento de propiedades como densidad aparente (ρ_b), la pendiente de la curva de retención de humedad en su punto de inflexión (S) y contenido de materia orgánica (MO), así como su relación con el sistema radical del maíz (*Zea mays*). Se efectuaron pruebas comparativas considerando algunos parámetros de suelo (ρ_b , MO, y S) y planta (biomasa, y longitud de raíz). Los resultados muestran que los parámetros ρ_b , MO y S utilizados para medir la calidad física del suelo, demostraron que los sistemas de labranza causan cambios en la estructura del mismo y por ende en su calidad. El sistema de LC propicia una mejor calidad e incrementa el contenido de MO en el suelo. Los valores de S son menores en LT, lo que indica que tiene menor capacidad de retener agua en comparación con LC. Se encontró una alta correlación entre S y longitud de raíz, significativa al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo. Por tanto, S se podría usar como un indicador para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del suelo.

Palabras clave: *Zea mays*, labranza de conservación, sistema radical.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los sistemas radicales en los agroecosistemas es importante debido a su contribución en el crecimiento total de la planta. El propósito de tener una condición ideal del suelo para el crecimiento radical está relacionado con los sistemas de labranza de los suelos. Pero se ha demostrado que

ABSTRACT

The soil structure (the geometric and topological arrangement of the soil pores, which are formed between the aggregates, and its stability over time and space) is a basic property, considered one of the main attributes of soil quality. In this study, two long-term irrigated tillage systems were analyzed: traditional (LT) and conservation (LC) with special emphasis on properties such as bulk density (ρ_b), slope of the water retention curve at its inflection point (S) and content of organic matter (OM), as well as their relationship to the corn root system (*Zea mays*). Comparative tests were conducted considering soil (ρ_b , OM and S) and plant (biomass and root length) parameters. The results show that the parameters ρ_b , OM and S used to measure physical quality of the soil showed that the tillage systems cause changes in soil structure and, thus, in its quality. The LC system favors better quality and increases the OM content in the soil. The values of S are lower in LT, indicating that it has lower capacity for water retention compared with LC. A high correlation between S and root length was found, significant when data were grouped by type of management. Therefore, S could be used as an indicator to evaluate the impact of agricultural practices on soil quality.

Key words: *Zea mays*, conservation tillage, root systems.

INTRODUCTION

The study of root systems in agroecosystems is important because of the root's contribution to total growth of the plant. The purpose of having ideal soil conditions for root growth is related to soil tillage systems. It has been demonstrated that the ideal conditions of soil for plant growth are not necessarily those that favor maximum proliferation of roots. The ideal condition of the soil structure allows the aerial part of the plant to photosynthesize and develop to its maximum expression, in accord with the aerial environmental conditions and genetic factors, as long as there are no restrictions in water supply, air, nutrients and humic substances that stimulate plant growth

las condiciones ideales del suelo para el crecimiento de la planta no necesariamente son aquellas que conllevan a una proliferación máxima de raíces. La condición ideal de la estructura del suelo permite a la parte aérea de la planta fotosintetizar y desarrollarse a su máxima expresión, de acuerdo con las condiciones ambientales aéreas y los factores genéticos, mientras no existan limitaciones en el abastecimiento de agua, aire, nutrientes y sustancias húmicas que estimulan el crecimiento de la planta (Huang *et al.*, 1997; Bushamuka y Zobel, 1998; Vaz *et al.*, 2001).

La estructura del suelo controla la distribución, flujo y retención de agua, sustancias disueltas y gases; su perturbación conduce a procesos de degradación edáfica que se asocian con diversas causas (compactación y cementación, entre otros), y disminuyen la productividad de los agroecosistemas (Kay, 1999; Gale *et al.*, 2000a; Gale *et al.*, 2000b). La estructura del suelo y su estabilidad son los factores que más influyen en el crecimiento de las raíces, ya que afectan el abastecimiento de oxígeno, agua y nutrientes a la solución del suelo adyacente a éstas (Vaz *et al.*, 2001). La tasa de desarrollo del sistema radical se reduce si la planta tiene que ejercer presión para crear un mayor número de poros grandes en los que pueda crecer. La existencia de una cantidad adecuada de macroporos continuos en los que las raíces puedan penetrar libremente, es un requerimiento importante para su crecimiento (Zobel, 1991; De Freitas *et al.*, 1999; Dexter, 2001).

Para determinar el movimiento de la solución del suelo a través del sistema poroso, y evaluar la cantidad de agua que podrían absorber las plantas, y generar datos para los modelos de predicción del comportamiento general del sistema suelo-agua-planta, es necesario caracterizar el sistema radical y el patrón estructural del medio poroso (Vrugt *et al.*, 2001; Brück *et al.*, 2003; Tsutsumi *et al.*, 2003). Esta caracterización depende de la disponibilidad de técnicas de medición y métodos analíticos adecuados. El atributo principal de estos métodos es su capacidad para mantener intacta la estructura original del suelo, sin alterar la geometría de la red de poros, cuyos rasgos más importantes son: su distribución por tamaño, la topología general del espacio poroso, y la forma de interconexión de los espacios (Vogel y Roth, 2001).

La compactación del suelo es un proceso de densificación relacionado con el colapso de los poros, provocado por una carga o presión mecánica que supera la resistencia del suelo, y ocurren cambios en la relación de sólidos y poros como resultado del nuevo arreglo de las partículas. Con este tipo de degradación, el suelo experimenta cambios significativos que restringen la permeabilidad y el crecimiento de los sistemas radicales, principalmente en los campos agrícolas (Groleau-

(Huang *et al.*, 1997; Bushamuka and Zobel, 1998; Vaz *et al.*, 2001).

The soil structure controls the distribution, flow and retention of water, dissolved substances, and gases; disturbance leads to processes of degradation, which are associated with diverse causes (compaction and cementation, among others), and decreases agroecosystem productivity (Kay, 1999; Gale *et al.*, 2000a; Gale *et al.*, 2000b). Soil structure and its stability are the factors that most influence root growth, since oxygen, water and nutrient supply to the adjacent soil solution is affected (Vaz *et al.*, 2001). The rate of development of the root system decreases if the plant must exert pressure to create a greater number of large pores in which to grow. The existence of an adequate quantity of continuous macropores through which the roots can penetrate freely is an important requirement for their growth (Zobel, 1991; De Freitas *et al.*, 1999; Dexter, 2001).

To determine the movement of the soil solution through the porous system, assess the quantity of water the plants could absorb and generate data for prediction models of general performance of the soil-water-plant system, it is necessary to characterize the root system and the structural pattern of the porous medium (Vrugt *et al.*, 2001; Brück *et al.*, 2003; Tsutsumi *et al.*, 2003). This characterization depends on the availability of measurement techniques and suitable analytical methods. The main attribute of these methods is their ability to maintain the original soil structure intact without altering the geometry of the network of pores, whose most important traits are distribution by size, general topology of the porous space and the way these spaces are interconnected (Vogel and Roth, 2001).

Soil compaction is a process of densification related to the collapse of the pores caused by weight or mechanical pressure that surpasses the soil's resistance. Thus, changes in the relationship between solids and pores occur as a result of a new arrangement of the particles. With this type of degradation, the soil undergoes significant changes that restrict the permeability and growth of root systems, principally in agricultural fields (Groleau-Renaud *et al.*, 1998; Tubeileh *et al.*, 2003; Williams and Weil, 2004). This effect produces a mechanical resistance greater than that required for adequate root growth, limiting gas exchange between soil and atmosphere and provoking changes in the water retention curve. All of these effects modify root growth, and when they occur simultaneously in a compacted soil, it is difficult to distinguish which is more important (Ahuja *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2000; Tubeileh *et al.*, 2003; Williams and Weil, 2004).

The relationship between moisture content (θ) and effective water pressure (h) in the soil is a fundamental

Renaud *et al.*, 1998; Tubeileh *et al.*, 2003; Williams y Weil, 2004). Este efecto produce una resistencia mecánica mayor a la requerida para un adecuado crecimiento de las raíces, limitando el intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, y cambia la curva de retención de humedad. Todos estos efectos modifican el crecimiento de la raíz, y al presentarse simultáneamente en un suelo compactado es difícil distinguir el más importante (Ahuja *et al.*, 1998; Six *et al.*, 2000; Tubeileh *et al.*, 2003; Williams y Weil, 2004).

La relación entre el contenido de humedad (θ) y la presión efectiva del agua (h) en el suelo, es una parte fundamental de la caracterización de las propiedades hidrodinámicas de los suelos no saturados. Esta caracterización se ha identificado con el concepto de curva de retención de humedad $\theta(h)$ (Dexter y Bird, 2001). El contenido de humedad al graficarse contra el logaritmo natural de h , presenta un punto característico definido como punto de inflexión de la curva (θ_{inf}), donde su curvatura tiende asintóticamente a cero. La curva de retención de humedad en su punto de inflexión tiene dos características: su posición (θ_i , $\ln h_i$) y su pendiente, $S = d\theta/d(\ln h)$. Esta última se define como la pendiente de la curva de retención de humedad en su punto de inflexión. La degradación física del suelo ocurre cuando éste es compactado y reduce la pendiente de la curva de retención en el punto de inflexión. Por tanto, en este estudio se utiliza S como un indicador de la calidad física del suelo.

Las condiciones favorables que las raíces necesitan para el buen desarrollo y rendimiento de los cultivos, frecuentemente están controladas por el manejo del suelo. Sin embargo, la materia orgánica edáfica [a nivel de macro-agregados se engloba a los micro-agregados (<250 μm), fragmentos de plantas, raíces finas e hifas de hongos] y su relación con las propiedades, procesos y funciones del suelo, participan en el desarrollo de la estructura, dando estabilidad a los agregados (Betz *et al.*, 1998; Herrick *et al.*, 1999). Pero debido a que esta materia orgánica es muy lábil, su mineralización se intensifica con la labranza (Franzluebbers *et al.*, 1999; Franzluebbers *et al.*, 2000).

Mientras que la degradación, promovida por la labranza convencional, daña todas las fracciones orgánicas, incluyendo la de la fracción inerte, estabilizada, o pasiva, la labranza de conservación podría aumentar la cantidad de fracción lábil (nitrógeno mineralizable, fracción ligera de carbono, carbono microbiano), mejorando la calidad del suelo para el buen funcionamiento del sistema radical y desarrollo del cultivo (Janzen *et al.*, 1998; Follett, 2001). El objetivo de este estudio fue describir el cambio estructural del suelo a través de la pendiente de la curva de retención de humedad en su punto de inflexión y su relación con el sistema radical del maíz bajo diferente manejo de suelo.

part of the characterization of hydrodynamic properties of non-saturated soils. This characterization has been identified with the concept of the water retention curve $\theta(h)$ (Dexter and Bird, 2001). Moisture content, when graphed against the natural logarithm of h , has a characteristic point defined as the inflection point of the curve (θ_{inf}), where the curvature asymptotically tends toward zero. The water retention curve has two characteristics at its inflection point: its position (θ_i , $\ln h_i$) and its slope, $S = d\theta/d(\ln h)$. The latter is defined as the slope of the water retention curve at its point of inflection. Physical degradation of the soil occurs when it is compacted and the retention curve decreases at the inflection point. Therefore, in this study S is used as an indicator of the physical quality of soil.

The favorable conditions that the roots need to develop well and for good crop yield are frequently controlled by soil management. However, soil organic matter [the macro-aggregate level encompasses micro-aggregates (<250 μm), fragments of plants, fine roots and hyphae of fungi] and its relationship with soil properties, processes and functions participate in the development of the structure, giving stability to the aggregates (Betz *et al.*, 1998; Herrick *et al.*, 1999). But because this organic material is very labile, mineralization intensifies with tillage (Franzluebbers *et al.*, 1999; Franzluebbers *et al.*, 2000).

While degradation, promoted by conventional tillage, damages all of the organic fractions including that of the inert fraction, stabilized or passive, conservation tillage could increase the labile fraction (mineralized nitrogen, light carbon fraction, microbial carbon), improving soil quality so that the root system functions well and the crop develops properly (Janzen *et al.*, 1998; Follett, 2001). The objective of the study was to describe structural change in the soil by means of the slope of the water retention curve at its inflection point and its relationship with the corn root system under different soil management systems.

MATERIALS AND METHODS

This study was conducted in the municipality of Pabellón de Arteaga, State of Aguascalientes, México, in a haplic Calcisol with a crumb sandy clay texture (Table 1).

During the fall-winter and spring-summer of 1994, a long-term experiment was set up, in which in the spring-summer 2002 cycle two soil management systems under irrigation were compared: traditional tillage (LT) and conservation tillage (LC). In both treatments crop rotation and association with cut crops (winter clover: *Trifolium pratense* L. -triticale: *Triticale hexaploide* Lart.) for forage production were practiced; these practices are described by Osuna *et al.* (2000). Samples were taken in the soils of both tillage systems (0.75 ha LC and 0.30 ha LT) to obtain information on soil structure, content of organic

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en el municipio de Pabellón de Arteaga, en el Estado de Aguascalientes, México, en un suelo Calcisol háplico de textura migajón arcillo-arenoso (Cuadro 1).

Durante el otoño-invierno y primavera-verano de 1994 se estableció un experimento de largo plazo, donde en el ciclo p-v 2002 se compararon dos sistemas de manejo de suelo bajo riego: labranza tradicional (LT) y labranza de conservación (LC). En ambos tratamientos se realizaron prácticas de rotación y asociación de cultivos de corte (trébol: *Trifolium pratense* L. -triticale: *Triticale hexaploide* Lart.) para la producción de forraje; dichas prácticas son descritas por Osuna *et al.* (2000). Se hicieron muestreos en los suelos de ambos sistemas de labranza (0.75 ha LC y 0.30 ha LT) para obtener información sobre la estructura del suelo, contenido de materia orgánica, densidad aparente y el sistema radical del maíz, durante la etapa de madurez fisiológica.

El híbrido de maíz utilizado fue *Zea mays* L. cv. Jaguar, un genotipo intermedio de 140 d a madurez fisiológica. La siembra se realizó en la segunda quincena de mayo, en forma mecánica utilizando una sembradora de labranza de conservación en ambos tratamientos. La separación entre surcos fue 0.8 m y se depositaron seis semillas por metro lineal para garantizar una densidad de población de 75 000 plantas ha⁻¹. Además se fertilizó con la fórmula 120-60-00 y 180-60-00 en los sistemas de LC y LT; las diferencias en la fórmula de fertilización se deben a la aportación de nitrógeno proveniente del residuo de trébol utilizado como mantillo en la labranza de conservación.

Medición del sistema radical del maíz

Se realizó a los 135 d después de la siembra (etapa de ensilaje) tomando muestras de cinco plantas de maíz al centro de cada tratamiento de labranza. Las plantas extraídas estuvieron espaciadas cada 10 m a lo largo de la hilera central del cultivo.

Para determinar la longitud radical del cultivo de maíz en el sitio experimental, se tomaron muestras de cinco plantas adyacentes con competencia seleccionadas en cada tratamiento de labranza. Se extrajo un cubo de suelo (40×40×20 cm) y se dejó remojar en agua toda una noche, separando al día siguiente las raíces en un tamiz con agua a presión. Después de lavada la raíz, se contaron y midieron las raíces para obtener la longitud total (m) por planta; luego se

matter, bulk density and root system during the stage of physiological maturity.

The corn hybrid used was *Zea mays* L. cv. Jaguar, a medium genotype that reaches physiological maturity in 140 d. Sowing was done in the second half of May, performed mechanically with a conservation tillage seeder in both treatments. Rows were 0.8 m apart and six seeds were deposited per linear meter to guarantee a population density of 75 000 plants ha⁻¹. Also, the LC and LT systems were fertilized with the formulas 120-60-00 and 180-60-00; the differences in fertilizer formula were due to the nitrogen from residues of the clover used as mulch in conservation tillage.

Measurement of the maize root system

Measurements were performed 135 d after sowing (silage stage), taking samples from five corn plants at the center of each tillage treatment. The extracted plants were spaced every 10 m along the center row of the crop.

To determine root length in the experimental site, samples were taken of five adjacent competing plants selected from each tillage treatment. A cube of soil (40×40×20 cm) was extracted and left to soak in water all night; the next day the roots were separated on a screen by water pressure. After washing, the roots were counted and measured to obtain the total length (m) per plant. Later, they were placed in an oven to dry at 60 °C to determine dry weight.

Measurement of soil porosity

The tests were conducted on soil samples collected next to the sampling points where plants were selected for the root study in each tillage treatment. Bulk density (ρ_b) was determined at 0-5, 5-10 and 10-15 cm deep, using the double cylinder drill (Jury *et al.*, 1991). A copper cylinder of known volume was introduced into the soil, obtaining an unaltered sample, which was dried at 105 °C and weighed to determine dry soil mass. With these data, ρ_b was calculated by dividing the soil mass by the volume of the cylinder. Simultaneously, gravimetric moisture content (θ_g) was measured.

Organic matter (OM)

Organic matter was determined in little disturbed soil samples collected next to the points where plants were selected for the root

Cuadro 1. Composición físico-química del suelo experimental.
Table 1. Physical-chemical composition of experimental soil.

Sistema de manejo	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	CO (%)	pH
LC	0-5	53	22	25	1.20	7.92
	5-10	53	22	25	0.65	8.20
	10-15	63	13	24	0.66	8.30
LT	0-5	54	21	25	0.60	7.89
	5-10	54	21	25	0.55	7.96
	10-15	56	20	24	0.51	8.00

LC: labranza de conservación; LT: labranza tradicional; CO: carbono orgánico.

colocaron en la estufa de secado a 60 °C para determinar su peso seco.

Medición de la porosidad del suelo

Las pruebas se hicieron en muestras de suelo recolectadas al lado de los puntos de muestreo de las plantas seleccionadas para el estudio de raíz, en cada tratamiento de labranza. Se determinó la densidad aparente (ρ_b) a 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad, utilizando la barrena de doble cilindro (Jury *et al.*, 1991). Un cilindro de cobre de volumen conocido se introduce en el suelo, obteniendo una muestra inalterada que se secó a 105 °C y se pesó, determinando la masa seca del suelo. Con estos datos se calculó ρ_b dividiendo la masa del suelo por el volumen del cilindro. Simultáneamente se midió el contenido de humedad gravimétrica (θ_g).

Materia orgánica (MO)

La determinación de MO se hizo en muestras de suelo poco disturbadas recolectadas al lado de los puntos de muestreo de las plantas seleccionadas para el estudio de raíz en cada tratamiento de labranza. Se determinó la MO a 0-5, 5-10, 10-15 cm de profundidad, por el procedimiento de combustión húmeda (Walkley y Black, 1934).

Curva de retención de humedad

Para obtener la curva de retención de humedad se tomaron muestras del suelo del sitio experimental a 0-5, 5-10 y 10-15 cm en ambos tratamientos de labranza; se tomaron, por duplicado, muestras de suelo no alteradas empleando cilindros de PVC (3 cm altura por 5 cm diámetro). Las muestras con la humedad de campo, se llevaron a saturación previamente y luego se sometieron a tensiones de 0.10, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, y 15.0 atm, en la olla y membrana de presión, aplicando el principio del equilibrio hidrostático.

Los valores medios de los contenidos para cada valor de tensión se ajustaron con la ecuación de van Genuchten (1980), usando el software RETC para el ajuste de curvas no-lineal (van Genuchten *et al.*, 1991):

$$\theta = (\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + \theta_{RES} \quad (1)$$

donde θ_{SAT} y θ_{RES} son los contenidos de humedad a saturación y residual; α es un factor de escala para el potencial de agua; y m y n son los parámetros que definen la forma de la curva.

Determinación del punto de inflexión y la pendiente de la curva de retención de humedad

El punto de inflexión de la curva de retención θ_{INFL} (donde la pendiente de la curvatura cambia de signo, Figura 1) se determinó como un contenido de humedad volumétrica a partir de los parámetros de la ecuación de van Genuchten con la restricción $m = 1 - 1/n$ de Mualem (1976). Mediante un procedimiento matemático (Dexter, 2004a) se obtienen las siguientes expresiones analíticas para θ_{INFL} y la pendiente

study in each tillage treatment. OM was determined at 0-5, 5-10 and 10-15 cm deep, by the wet combustion procedure (Walkley and Black, 1934).

Water retention curve

To obtain the water retention curve, soil samples were taken at the experimental site at 0-5, 5-10 and 10-15 cm in both tillage treatments. Unaltered soil samples were taken in duplicate using PVC cylinders 3 cm high by 5 cm in diameter. The samples with field moisture, were previously saturated, and later subjected to tensions of 0.10, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 and 15.0 atm in the pressure cooker and membrane, applying the principle of hydrostatic balance.

Mean values of the contents for each tension value were adjusted with the van Genuchten (1980) equation, using RETC software to adjust the non-linear curves (van Genuchten *et al.*, 1991):

$$\theta = (\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + \theta_{RES} \quad (1)$$

where θ_{SAT} and θ_{RES} are the saturation and residual water contents; α is a scale factor for water potential; and m and n are the parameters that define the shape of the curve.

Determination of inflection point and slope of water retention curve

The inflection point of the retention curve θ_{INFL} (where the slope of the curvature changes signs, Figure 1) was determined as a volumetric content of water based on the parameters of the van Genuchten equation with the Mualem (1976) restriction $m = 1 - 1/n$. Using a mathematical procedure (Dexter, 2004a), the following analytical expressions are obtained for θ_{INFL} and the slope of the inflection point

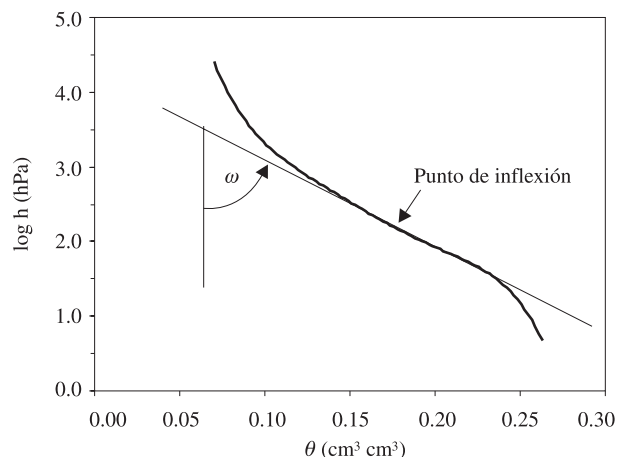


Figura 1. Ejemplo de la curva de retención de humedad mostrando el punto de inflexión y la pendiente ($S = \tan \omega$) de la tangente del punto de inflexión de la curva.

Figure 1. Example of the water retention curve showing the inflection point and the slope ($S = \tan \omega$) of the tangent of the inflection point of the curve.

del punto de inflexión (S), a partir de la derivación de la ecuación de van Genuchten (Dexter y Bird, 2001; Dexter, 2004a):

$$\theta_{INFL} = (\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_{RES} \quad (2)$$

$$S = -n(\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left(\frac{2n-1}{n-1}\right)^{-\left(\frac{1}{n}-2\right)} \quad (3)$$

Análisis estadístico

Se calcularon medidas de tendencia central y variación (media, desviación estándar, coeficiente de variación), ecuaciones de regresión y correlaciones múltiples utilizando procedimientos de estadística clásica en todas las variables estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad física del suelo y su relación con la materia orgánica

En el Cuadro 2 se presentan estimaciones de algunos parámetros que describen la variación de la MO y los parámetros de forma de las características hidrodinámicas del suelo usados en el modelo de retención de humedad de van Genuchten (1980) obtenidos en los dos sistemas de labranza.

Los valores medios de MO en la capa superficial (0-15 cm) son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) en el suelo con los sistemas de manejo analizados. El mayor contenido de MO lo presenta el suelo con LC (2.78%) respecto a LT (1.48%); la relación LC/LT ($2.78/1.48 = 1.88$) indica que LC superó en 88% a LT. Esta diferencia en MO se asoció al contenido volumétrico de agua a saturación, y a todos los demás parámetros del suelo en los sistemas de manejo. Con el cambio de LT al de LC, el punto de inflexión (contenido óptimo de humedad) (θ_{INFL}) y la pendiente (S) en el mismo punto de la curva de retención de humedad, aumentan. De los resultados se infiere que la variación del θ_{INFL} y S se deben a la alteración de la meso-porosidad, debido a las prácticas agrícolas.

La degradación física del suelo ocurre cuando éste es compactado por fuerzas externas (lluvia o riego, labranza, etc.), provocando una reducción en el volumen ocupado por los poros, en especial aquellos de tamaño más grande. Este efecto produce una resistencia mecánica mayor al crecimiento de las raíces, limitaciones al intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, y cambios en la curva de retención de humedad, principalmente en S (Dexter y Bird, 2001; Dexter, 2004a).

En la Figura 2 se presenta la correlación entre la densidad aparente (ρ_b) con la pendiente en su punto de inflexión (S) de la curva de retención de humedad del suelo, obtenida bajo diferente manejo. La correlación

(S) from the derivation of the van Genuchten equation (Dexter and Bird, 2001; Dexter, 2004a):

$$\theta_{INFL} = (\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_{RES} \quad (2)$$

$$S = -n(\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left(\frac{2n-1}{n-1}\right)^{-\left(\frac{1}{n}-2\right)} \quad (3)$$

Statistical analysis

Means of the central trend and variation (mean, standard deviation, coefficient of variation), regression equations and multiple correlations were calculated using classical statistical procedures in all of the studied variables.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical quality of the soil and its relationship with organic matter

In Table 2 it can be observed estimations of some parameters that describe the variation of OM and the shape parameters of the hydrodynamic characteristics of the soil used in the van Genuchten (1980) model of water retention obtained with the two tillage systems.

The mean OM values in the surface layer (0-15 cm) are statistically different ($p \leq 0.05$) in the soils under the two management systems analyzed. The content of OM found in the soil under LC (2.78%) was higher than that under LT (1.48%). The ratio LC/LT ($2.78/1.48 = 1.88$) indicates that LC surpassed LT by 88%. This difference in OM is associated with the volumetric content of water to saturation, and all of the other soil parameters under the management systems. With the change from LT to LC, the inflection point (optimum moisture content) (θ_{INFL}) and the slope (S) in the same water retention curve increase. From the results it is inferred that the variation θ_{INFL} and S are due to the alteration of the meso-porosity caused by agricultural practices.

Physical degradation of the soil occurs when it is compacted by external forces (rain or irrigation, tillage, etc.), provoking a reduction in the volume occupied by pores, especially those of larger size. This effect produces greater mechanical resistance to the growth of roots, limits to gas exchange between soil and atmosphere, and changes in the water retention curve, principally in S (Dexter and Bird, 2001; Dexter, 2004a).

The correlation between bulk density (ρ_b) with the slope in its inflection point (S) of the soil water retention curve obtained under different management practice is shown in Figure 2. The correlation between S and ρ_b shows an inverse linear trend at site level; this was highly significant when data were grouped by type of management. This association may be due to the fact

Cuadro 2. Variación y comparación de medias de la materia orgánica y de los parámetros de la ecuación de van Genuchten obtenidos con diferente manejo de suelo.**Table 2. Variation and comparison of means of the organic matter and the parameters of the van Genuchten equation obtained with different soil management.**

Sistema de manejo	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desviación estándar	C. V. %
Materia orgánica (%)							
LC	6	1.52	4.48	2.78a	2.24	0.23	8.3
LT	6	1.39	1.70	1.48b	1.45	0.12	8.1
Contenido volumétrico de agua a saturación (cm ³ .cm ³)							
LC	6	0.41	0.45	0.42a	0.42	0.008	1.9
LT	6	0.40	0.41	0.40b	0.40	0.009	2.3
Contenido volumétrico de agua residual (cm ³ .cm ³)							
LC	6	0.066	0.071	0.068a	0.068	0.003	4.7
LT	6	0.065	0.066	0.066b	0.066	0.004	6.1
Parámetros de forma de las características hidrodinámicas del suelo							
α							
LC	6	0.019	0.021	0.020a	0.020	0.001	4.9
LT	6	0.019	0.019	0.019b	0.019	0.001	5.1
n							
LC	6	1.364	1.415	1.389a	1.385	0.022	1.5
LT	6	1.372	1.377	1.373b	1.372	0.025	1.8
m							
LC	6	0.2671	0.2930	0.2800a	0.2778	0.008	2.9
LT	6	0.2710	0.2736	0.2714b	0.2710	0.007	2.6
Contenido volumétrico de agua en el punto de inflexión (cm ³ .cm ³)							
LC	6	0.29	0.32	0.30a	0.30	0.005	1.7
LT	6	0.28	0.29	0.29b	0.29	0.007	2.4
Pendiente del punto de inflexión de la curva (S)							
LC	6	0.046	0.054	0.047a	0.047	0.003	6.3
LT	6	0.045	0.046	0.045b	0.045	0.001	2.2

Prueba de t ($p \leq 0.05$); N = número de muestras; C.V. = coeficiente de variación.

entre S y ρ_b muestra una tendencia lineal inversa a nivel de sitio, siendo altamente significativa al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo. Esta asociación se puede deber a que las condiciones edáficas son muy contrastantes entre los sistemas de manejo evaluados.

Los datos se agruparon de acuerdo con el tipo de manejo, es decir, LT agrupó los valores de S más bajos y los valores más altos de ρ_b ; mientras que LC agrupó los valores más altos de S con los valores más bajos de ρ_b . Así se manifiesta un efecto indirecto de MO sobre ρ_b . Estos resultados coinciden con lo reportado por Dexter (2004a), y confirman que S es un buen indicador de la calidad física de los suelos.

La función derivada de la relación entre ρ_b y MO de ambos tratamientos de labranza, fue negativa y de tipo lineal (Figura 3). Esto significa que ρ_b tiende a disminuir con el aumento de MO. La menor ρ_b en LC, se atribuye al desarrollo de una estructura más porosa propiciada por la MO, significando mayor capacidad para almacenar agua. En cambio, el suelo bajo LT presenta

that the soil conditions of the two management systems evaluated are highly contrasting.

The data grouped according to the type of management; that is, LT grouped the lowest values of S and the highest values of ρ_b , while LC grouped the highest values of S with the lowest values of ρ_b . Thus, an indirect effect of OM on ρ_b is manifested. These results coincide with those reported by Dexter (2004a) and confirm that S is a good indicator of physical quality of soils.

The function derived from the relationship between ρ_b and OM in both tillage treatments was negative and linear (Figure 3). This means that ρ_b tends to decrease with an increase in OM. The lower ρ_b in LC is attributed to the development of a more porous structure propitiated by OM, which means greater capacity for water storage. In contrast, the soil under LT had a higher ρ_b , revealing less pore space and, therefore, low capacity for storing water.

The correlation between S and OM in the two tillage systems shows a clear linear trend at the site level, being

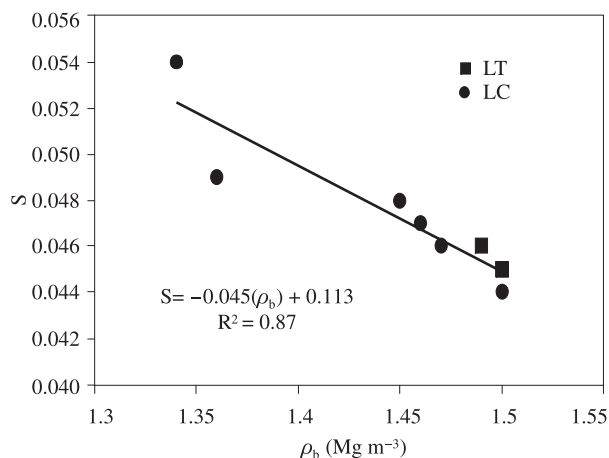


Figura 2. Correlación de la pendiente de la curva de retención de humedad en su punto de inflexión (S) con la densidad aparente del suelo con dos sistemas de labranza.

Figure 2. Correlation of the slope of the water retention curve at its point of inflection (S) with bulk density in soils with two tillage systems.

mayor ρ_b , revelando menor espacio poroso y, por tanto, baja capacidad para almacenar agua.

La correlación de S con MO en los dos sistemas de labranza muestra una clara tendencia lineal a nivel de sitio, siendo altamente significativa al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo del suelo (Figura 3). Los cambios en S son influenciados significativamente por MO, asociándose a factores como el efecto de cultivo y el grado de intensidad de labranza.

En la Figura 4 se muestran tendencias de valores más grandes de S en LC, lo cual confirma que S es un indicador adecuado para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad física del suelo. Esto se debe probablemente a los efectos separados de los factores de la calidad física del suelo, los cuales pueden explicarse significativamente por el uso de S . Para mantener una calidad física adecuada en el suelo el valor de S debe ser mayor a 0.035 (Dexter, 2004a, Dexter, 2004b; Dexter, 2004c); por tanto, los valores medios obtenidos para el suelo de ambos sistemas de manejo (0.047 y 0.045) son mayores al valor crítico.

Biomasa subterránea del maíz

El valor medio del peso seco total de raíz, obtenido de las muestras de las cinco plantas (área superficial total de terreno 1.802 m²; volumen total excavado 0.067 m³), por sistema de labranza fue: 0.116 y 0.078 kg, equivalente a una biomasa de 0.06 y 0.04 kg m⁻² (0.6 y 0.4 t ha⁻¹) para LC y LT.

En el Cuadro 3 se presentan las estimaciones de algunos parámetros estadísticos que describen la variación de la biomasa de raíz del cultivo de maíz en los

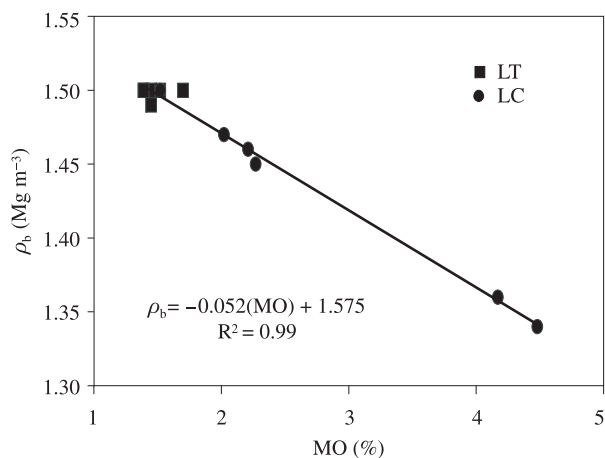


Figura 3. Variación de la densidad aparente en función del contenido de materia orgánica en el suelo con dos sistemas de labranza.

Figure 3. Variation in bulk density in function of the organic matter content in soil with two tillage systems.

highly significant when data are grouped according to the type of soil management (Figure 3). The changes in S are significantly affected by OM, associated with factors such as the effect of crop and degree of tillage intensity.

Figure 4 shows trends of higher S values under LC, confirming that S is a suitable indicator for assessing the impact of agricultural practices on physical quality of soil. This is likely due to the separated effects of the factors of physical soil quality, which can be explained significantly by the use of S . To maintain an adequate physical soil quality the value of S should be above

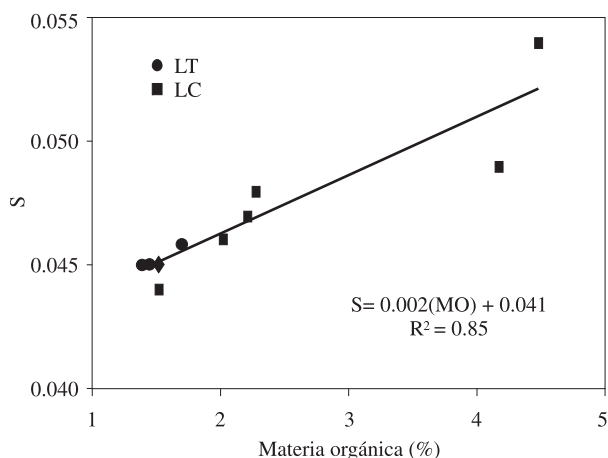


Figura 4. Correlación de la pendiente de la curva de retención de humedad en el punto de inflexión con el contenido de materia orgánica del suelo en dos sistemas de labranza.

Figure 4. Correlation of the slope of the water retention curve at the point of inflection with the content of organic matter of the soil in two tillage systems.

Cuadro 3. Variación y comparación de medias de los valores de biomasa de la raíz por planta con dos sistemas de labranza.
Table 3. Variation and comparison of means of the values of root biomass per plant with two tillage systems.

Sistema de manejo	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desviación estándar	C. V. %
Biomasa de raíz (kg pl ⁻¹)							
LC	5	0.019	0.034	0.020a	0.021	0.005	25.0
LT	5	0.009	0.027	0.014b	0.016	0.004	28.6
Biomasa de raíz (kg m ⁻²)							
LC	5	0.034	0.095	0.057a	0.059	0.015	26.0
LT	5	0.026	0.074	0.038b	0.044	0.012	31.6
Longitud de raíz (m)							
LC	5	32.15	89.75	40.54a	36.60	14.59	35.9
LT	5	18.24	50.12	31.73a	34.71	11.76	37.1
Densidad aparente (Mg m ⁻³)							
LC	5	1.30	1.45	1.37b	1.36	0.07	5.1
LT	5	1.33	1.67	1.53a	1.58	0.13	8.2

Prueba de t ($p \leq 0.05$); N = número de muestras; C. V. = coeficiente de variación.

dos sistemas de manejo. Las diferencias en biomasa de raíz originados por los sistemas de labranza son estadísticamente significativos; por tanto, estos parámetros resultaron más susceptibles al impacto de las prácticas agrícolas en el suelo LT, que en LC.

La máxima cantidad de biomasa por unidad de área en LC y LT fue 0.095 y 0.074 kg m⁻², mientras que la mínima fue 0.034 y 0.026 kg m⁻² (Cuadro 3). Los cambios en los datos de longitud de raíz, producto de las diferencias de los sistemas de labranza, no fueron significativos. En la Figura 4 se observa que la función derivada de la relación entre longitud de raíz y ρ_b de ambos sistemas de labranza, fue negativa de tipo exponencial. Esto significa que la longitud de raíz tendió a disminuir con el aumento de ρ_b . Entonces, el desarrollo radical obedece al patrón de resistencia mecánica del suelo derivado del sistema de labranza. Esta respuesta coincide con otros trabajos reportados por De Freitas *et al.* (1999), Eamus *et al.* (2002) y Tubeileh *et al.* (2003).

Relación entre la pendiente (S) y la longitud de raíz

Los flujos de agua y gases y la longitud de las raíces están asociados íntimamente con la estructura del suelo. Para entender cómo la estabilidad de la porosidad estructural es afectada por la compactación que ocurre con los dos sistemas de labranza, se cuantificó la porosidad estructural a partir de los cambios de S de la curva de retención de humedad y se relacionó la pendiente (S) con el crecimiento de la raíz, porque S está controlada por la porosidad estructural e integra directamente muchas de las principales propiedades físicas del suelo.

En la Figura 5 se aprecia la magnitud del efecto de los sistemas de manejo sobre la porosidad estructural,

0.035 (Dexter, 2004a, Dexter, 2004b; Dexter, 2004c); therefore, the mean values obtained for the soil under both management systems (0.047 and 0.045) are above the critical value.

Underground biomass of corn

The mean value of total root dry weight, obtained from the samples of five plants (total area of the field 1.802 m²; total volume excavated 0.067 m³) per tillable system was 0.116 and 0.078 kg, equivalent to a biomass of 0.06 and 0.04 kg m⁻² (0.6 and 0.4 t ha⁻¹) for LC and LT.

In Table 3 it can be observed the estimations of some statistical parameters that describe the variation of root biomass of the maize crop in the two management systems. The differences in root biomass originated by the tillage systems are statistically significant; therefore, these parameters were more susceptible to the impact of agricultural practices in the LT soil than in LC soil.

The highest quantities of biomass per unit of area in LC and LT were 0.093 and 0.074 kg m⁻², while the lowest were 0.034 and 0.026 kg m⁻² (Table 3). The changes in the root length data, product of the differences in tillage systems, were not significant. In Figure 4 it can be observed that the function derived from the ratio between root length and ρ_b of both tillage systems was negative of exponential type. This means that root length tended to decrease with an increase in ρ_b . Thus, root development obeys the pattern of mechanical resistance of the soil derived from the tillage system. This response coincides with other studies reported by De Freitas *et al.* (1999), Eamus *et al.* (2002) and Tubeileh *et al.* (2003).

así como la influencia que ejerce el sistema radical del cultivo de maíz sobre la misma. La correlación entre S y la longitud de raíz muestra una tendencia lineal a nivel de sitio, siendo significativa al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo.

En la literatura revisada se encontró muy poca información sobre el uso de S como indicador de la calidad física del suelo. La relación entre S y el crecimiento de la raíz puede explicarse, según Bruand *et al.* (1996), porque las raíces, al crecer a través del suelo, comprimen cilíndricamente el suelo alrededor de ellas. La consolidación del suelo está fuertemente influenciada por la presencia de poros estructurales (Dexter y Tanner, 1973). Por tanto, el valor de S es una medida del grado de micro-estructura en el suelo, cuya correlación entre la consolidación del suelo y S puede ser positiva. Lo anterior es congruente con lo reportado por Katou *et al.* (1987) y Ahuja *et al.* (1998), quienes mencionan que la forma de la curva de retención de humedad indica la susceptibilidad de la consolidación del suelo. Por tanto, se espera que el crecimiento de la raíz esté correlacionado positivamente con S .

CONCLUSIONES

Se puede concluir que los parámetros ρ_b , MO y S utilizados para medir la calidad física del suelo mostraron que los sistemas de laboreo causan cambios en la estructura y calidad del suelo. El sistema de labranza de conservación propicia una mejor calidad y su uso incrementa el contenido de materia orgánica en el suelo y los valores de la calidad física medidos por el parámetro S . Los valores de S son menores en labranza tradicional, lo que indica menor capacidad para retener

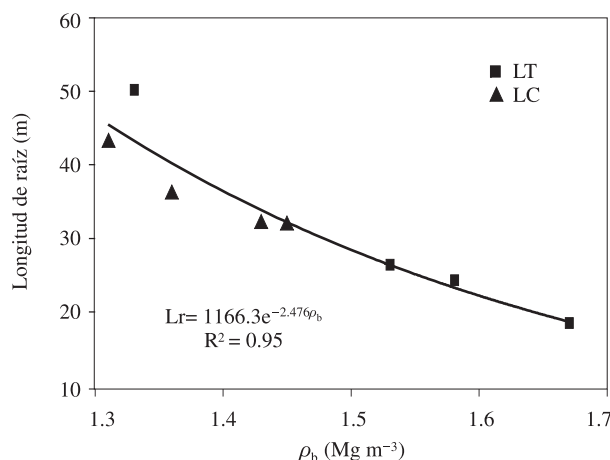


Figura 5. Relación entre densidad aparente y longitud de raíz con dos sistemas de labranza.

Figure 5. Relationship between bulk density and root length with two tillage systems.

Relationship between slope (S) and root length

Flows of water and gases and root length are intimately associated with soil structure. To understand how stability of structural porosity is affected by compaction occurring in the two tillage systems, structural porosity was quantified from the changes in the S of the water retention curve and the slope (S) was related to root growth, because S is controlled by structural porosity and directly integrates many of the main physical properties of the soil.

In Figure 5 the magnitude of the effect of the management systems, as well as the influence the root system exerts, on structural porosity can be appreciated. The correlation between S and root length shows a linear trend at site level, and is significant when data are grouped according to type of management.

In the literature reviewed, very little information was found on the use of S as an indicator of physical soil quality. The relationship between S and root growth can be explained, according to Bruand *et al.* (1996), because the roots, as they grow through the soil, compress the soil cylindrically around them. The consolidation of the soil is strongly affected by the presence of structural pores (Dexter and Tanner, 1973). Therefore, the value of S is a measurement of the degree in which micro-structure exists in the soil, and the correlation between soil consolidation and S can be positive. This is congruent with that reported by Katou *et al.* (1987) and Ahuja *et al.* (1998), who mention that the shape of the water retention curve indicates the susceptibility of soil consolidation. Therefore, it is expected that root growth is positively correlated with S .

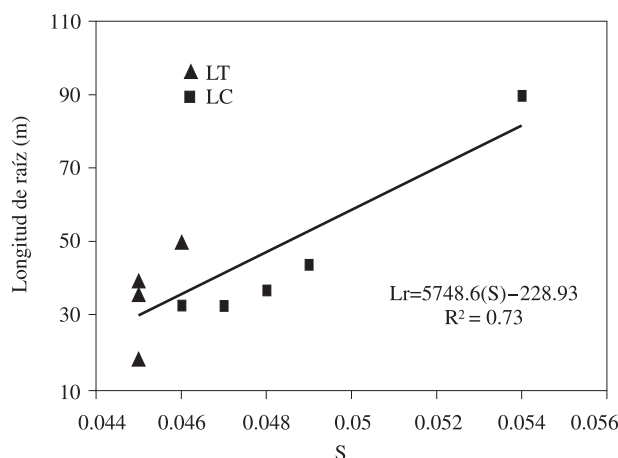


Figura 6. Relación entre la pendiente de la curva de retención de humedad en su punto de inflexión y el crecimiento de raíz bajo con sistemas de labranza.

Figure 6. Relationship between slope of the water retention curve at its inflection point and root growth under two tillage systems.

agua en comparación con la labranza de conservación. La correlación entre S y longitud de raíz fue alta y significativa al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo. El efecto de S sobre el crecimiento de la raíz muestra que este parámetro fue un indicador adecuado para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del suelo. El crecimiento radical del maíz con dos sistemas de labranza se correlacionó significativamente con S , mostrando una tendencia lineal al agrupar los datos de acuerdo con el tipo de manejo.

LITERATURA CITADA

- Ahuja, L. R., F. Fiedler, G. H. Dunn, J. G. Benjamin, and A. Garrison. 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1228-1233.
- Betz, C. L., R. R. Allmaras, S. M. Copeland, and G. W. Randall. 1998. Least limiting water rater traffic and long-term tillage influence in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1384-1393.
- Bruand, A., I. Cousin, B. Nicoulland, O. Duval, and J. C. Begon. 1996. Backscattering electron scanning images for analysing soil compaction around roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 895-901.
- Brück, H., B. Piro, B. Sattelmacher, and W. A. Payne. 2003. Spatial distribution of roots of pearl millet on sandy soils of Niger. *Plant and Soil* 256: 149-159.
- Bushamuka, V. N., and R. W. Zobel. 1998. Differential genotypic and root type penetration of compacted soil layers. *Crop Sci.* 38 (3): 776-781.
- De Freitas, P. L., R. W. Zobel, and V. A. Snyder. 1999. Corn root growth in soil columns with artificially constructed aggregates. *Crop Sci.* 39: 725-730.
- Dexter, A. R. 2001. The key to soil function. *Institute of Soil Science and Plant Cultivation*. Poland. 14 p.
- Dexter, A. R. 2004a. Soil physical quality. Part I. Theory, effect of soil texture, density, and organic matter, and effect on root growth. Article in press, *Geoderma*.
- Dexter, A. R. 2004b. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilling and hard-setting. Article in press, *Geoderma*.
- Dexter, A. R. 2004c. Soil physical quality Part. III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusion about S-theory. Article in press, *Geoderma*.
- Dexter, A. R., and D. W. Tanner. 1973. The response of unsaturated soils to isotropic stress. *J. Soil Sci.* 24: 491-502.
- Dexter, A. R., and N. R. A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Till. Res.* 57: 203-212.
- Eamus, D., X. Chen., G. Kelley., y L.B. Hutley. 2002. Root biomass and root fractal analyses of an open Eucalyptus forest in savanna of north Australia. *Aust. J. Bot.* 50: 31-41.
- Follett, R. F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil & Till. Res.* 61: 77-92.
- Franzluebbers, A. J., G. W. Langdale, and H. H. Schomberg. 1999. Soil carbon, nitrogen and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 349-355.
- Franzluebbers, A. J., R. L. Haney, C. W. Honeycutt, H. H. Schomberg, and F. M. Hons. 2000. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 613-623.
- Gale, W. J., C. A. Cambardella, and T. B. Bailey. 2000a. Surface residue-and root-derived carbon in stable and unstable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 196-201.
- Gale, W. J., C. A. Cambardella, and T. B. Bailey. 2000b. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 201-207.
- Groleau-Renaud, V., S. Plantureux, and A. Guckert. 1998. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponic conditions. *Plant Soil* 201: 231-239.
- Herrick, J. E., M. A. Weltz, J. D. Reeder, G. E. Schuman, and J. R. Simanton. 1999. Rangeland soil erosion and soil quality: role of soil resistance, resilience and disturbance regime. *Soil Water Cons. Soc.*
- Huang, B., R. R. Duncan, and R. N. Carrow. 1997. Drought-resistance mechanisms of seven warm-season turfgrass under surface soil drying: II Root aspects. *Crop Sci.* 37(6): 1863-1869.
- Janzen, H. H., C. A. Campbell, R. C. Izaurralde, B. H. Ellert, N. Juma, W. B. McGill, and R. P. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil & Till. Res.* 47: 189-203.
- Jury, W. A., W. R. Gardner, and W. H. Gardner. 1991. *Soil Physics*. John Wiley & Sons. New York. 328 p.
- Katou, H., K. Miyaji, and T. Kubota. 1987. Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. *Soil Sci. Plant Nutr.* 33 (4): 539-554.
- Kay, B. D. 1999. Soil structure. *In: Handbook of Soil Science*. Sumner, M. E. (ed). CRC Press Inc., Boca Raton. FL. USA. pp: 229-276.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Res.* 12: 513-522.
- Osuna, C. E. S., S. P. Ramírez, y F. E. Villagrana. 2000. Desarrollo de sistemas de producción sostenible para uso y conservación de suelo y agua en las zonas áridas y semiáridas del Norte-Centro de México. Cuaderno de Trabajo, SIHGO. CONACYT. 45 p.
- Six, J., E. T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
- Tsutsumi, D., K. Kosugi, and T. Mizuyama. 2003. Root-system development and water-extraction model considering hydrotropism. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 387-401.
- Tubeileh, A., V. Groleau-Renaud, and S. Plantureux. 2003. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil & Till. Res.* 71: 151-161.

CONCLUSIONS

It can be concluded that the parameters ρ_b , OM and S used to measure the physical quality of the soil showed that tillage systems cause changes in soil structure and quality. The conservation tillage system propitiates a better quality and its use increases the content of organic matter in the soil and the values of physical quality measured by the S parameter. The values of S are lower in traditional tillage, indicating a lower capacity to retain water, compared with conservation tillage. The correlation between S and root length was high and significant when data were grouped according to type of management. The effect of S on root growth shows that this parameter was an adequate indicator for evaluating the impact of agricultural practices on soil quality. Root growth of maize under two systems of tillage correlated significantly with S , showing a linear trend when data were grouped according to type of management.

—End of the English version—



- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, C.A. US Environmental Protection Agency, Document EPA/600/2-91/065.
- Vaz, C. M. P., L. H. Bassoi, and J. W. Hopmans. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil & Till. Res.* 60: 35-42.
- Vogel, H. J., and K. Roth. 2001. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. *Adv. Water Resour.* 24: 233-242.
- Vrugt, J. A., J. W. Hopmans, and J. Šimunek. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1027-1037.
- Walkley, A., and T. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 63: 251-264.
- Williams S. M., and R. R. Weil. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.
- Zobel, R. W. 1991. Root growth and development. *In: The Rhizosphere and Plant Growth*. Keister and Cregan (eds). Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands. pp: 61-71.