



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

ISSN: 2007-0934

revista_atm@yahoo.com.mx

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias
México

Vaca García, Víctor Manuel; Martínez Villanueva, Juan José; González Huerta, Andrés; Morales Rosales, Edgar Jesús; Zamudio González, Benjamín; Gutiérrez Rodríguez, Francisco
Compactación de un vertisol bajo tres sistemas de labranza en maíz (*Zea mays* L.)
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 5, núm. 8, noviembre-diciembre, 2014, pp. 1495-1507
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Estado de México, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263137780013>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Compactación de un vertisol bajo tres sistemas de labranza en maíz (*Zea mays* L.)*

Compaction of a vertisol under three tillage systems in maize (*Zea mays* L.)

Víctor Manuel Vaca García¹, Juan José Martínez Villanueva¹, Andrés González Huerta², Edgar Jesús Morales Rosales², Benjamín Zamudio González³ y Francisco Gutiérrez Rodríguez^{2§}

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 50090. Tel: (722) 296 6574. (vic.charger@gmail.com; jjmv_2206@hotmail.com). ²Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 50200. Tel: (722) 296 5529. (agonzalez@uaemex.mx; ejmorales@uaemex.mx). ³Sitio Experimental Metepec-INIFAP, km 4.5, carretera Toluca-Zitácuaro, Vialidad Adolfo López Mateos, Colonia San José Barbabosa, Municipio de Zinacantepec, Estado de México. C. P. 51350. Tel. (722) 278 4331. (zamudio.benjamin@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: fgrfca@hotmail.com.

Resumen

El comportamiento a corto plazo de las propiedades físicas de un vertisol, bajo sistemas de labranza tradicional y de conservación, en la zona de producción de maíz (*Zea mays* L.) del Valle Toluca-Atlacomulco, aún no ha sido reportado. La presente investigación se desarrolló durante un periodo de tres años (2010 - 2012) en Toluca, Estado de México, para evaluar el efecto de los sistemas de labranza tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC), sobre la compactación de un vertisol y el rendimiento del maíz. Para determinar la compactación del suelo, se midieron las variables de densidad aparente (Da), resistencia a la penetración, mediante el índice de cono (IC), y velocidad media de infiltración del agua (VMI), en cada ciclo de cultivo. En general, para todos los ciclos y sistemas, la Da se incrementó con la profundidad y el mayor valor se presentó en la capa más profunda. El valor más alto de Da (1.64 g cm^{-3}) se observó en LC a 15-30 cm de profundidad. Para el IC, el valor más alto (3 998 kPa), así como el mayor valor promedio (3 401 kPa), también fueron observados en LC. Para todos los ciclos de cultivo, la mayor VMI promedio se registró en LT ($0.088 \text{ mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$). Los mayores valores de rendimiento, en todos los ciclos agrícolas, fueron obtenidos en LM. El análisis de las

Abstract

The short-term behaviour of the physical traits of a vertisol under traditional systems and conservation tillage in the production area of maize (*Zea mays* L.) Valley Toluca-Atlacomulco, has not been reported so far. This research was developed over a three year period (2010 - 2012) in Toluca, State of Mexico, to evaluate the effect of conventional tillage systems (LT), minimum (LM) and zero (LC) on the compaction of a vertisol and yield of maize. In order to determine soil compaction, we measured the variables of bulk density (Da), resistance to penetration by the cone index (CI), and mean velocity of water infiltration (AIR) in each crop cycle. In general, for all cycles and systems, Da increased with depth and showed the highest value in the deepest layer. The highest value of Da (1.64 g cm^{-3}) was observed in LC at 15-30 cm depth. For the CI, the highest value (3 998 kPa) and the highest average value (3 401 kPa), were also observed in LC. For all crop cycles, the highest mean AIR was recorded in LT ($0.088 \text{ mL cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$). The highest yield values in all agricultural cycles were obtained in LM. The analysis of the different variables could not establish, in the short term, clear trends in the increase or remediation of compaction parameters of vertisol under different tillage systems.

* Recibido: febrero de 2014
Aceptado: julio de 2014

distintas variables no permitió determinar, en el corto plazo, tendencias claras en el incremento o remediación de los parámetros de compactación del vertisol bajo los diversos sistemas de labranza.

Palabras clave: *Zea mays* L., densidad aparente, índice de cono, rendimiento, velocidad de infiltración.

Introducción

En un contexto agronómico, la compactación es el resultado de la aplicación al suelo de cualquier fuerza, por ejemplo, la ejercida por la labranza y el tránsito rodado de maquinaria agrícola, que incrementa la densidad aparente del suelo y, por consiguiente, disminuye la porosidad del mismo (Soil Science Society of America, 2013). La compactación del suelo se asocia frecuentemente con una reducción en el rendimiento del cultivo, porque restringe el movimiento de agua, aire y raíces (Tardieu, 1994; Filipovic *et al.*, 2006).

Se afirma que en cualquier superficie donde opere tránsito rodado de maquinaria agrícola, se requiere del empleo de la labranza para regresar al suelo a una baja impedancia para la exploración de raíces y a un estado conductivo para la infiltración del agua (Carter *et al.*, 1999). En este sentido, el sistema de labranza convencional (tradicional) involucra, usualmente, la utilización del arado de vertedera y labranza secundaria adicional para preparar la cama de siembra. Este sistema está basado en una alta intensidad de trabajo del suelo y en el volteo del mismo (Filipovic *et al.*, 2006). Durante el ciclo de labranza convencional pueden aparecer dos problemas diferentes de compactación del suelo. El primero es la compactación del horizonte de cultivo o compactación superficial, que puede ser resuelto por la labranza anual.

El segundo es la compactación de la capa bajo el horizonte de labranza anual o compactación del subsuelo (piso de arado), donde el problema se magnifica debido a que la compactación presenta un efecto acumulativo que es más complejo y costoso de resolver que el de la compactación en el horizonte de cultivo (Filipovic *et al.*, 2006). En contraparte, los sistemas de labranza de conservación son comúnmente el resultado de prácticas reducidas de labranza. Estos sistemas tratan de alterar al suelo lo menos posible para conservar su estructura natural, lo que debería conducir a una menor compactación (Varsa *et al.*, 1997; Weise y Bourarach, 1999).

Keywords: *Zea mays* L., bulk density, cone index, infiltration rate, yield.

Introduction

In an agricultural context, compaction is the result of land application of any force, for instance, exerted by tillage and agricultural machinery of wheeled traffic, which increases soil bulk density and, consequently, decreases the porosity (Soil Science Society of America, 2013). Soil compaction is often associated with a reduction in crop yield, because it restricts the movement of water, air and roots (Tardieu, 1994; Filipovic *et al.*, 2006).

It is alleged that on any surface where road traffic operate farm machinery, requires the use of tillage to return to a low impedance ground for exploration of roots and a conductive state for water infiltration (Carter *et al.*, 1999). In this sense, the conventional tillage system (traditional) involves usually the moldboard plow and additional secondary tillage to prepare the seedbed. This system is based on high labour intensity of the soil (Filipovic *et al.*, 2006). During the cycle of two different tillage soil compaction problems can occur. The first is the growing horizon compaction or surface compaction, which can be solved by annual tillage.

The second is compaction of the layer below the horizon of annual tillage or compaction of the subsoil (plow pan), where the problem is magnified because compaction has a cumulative effect that is more complex and costly to solve than the compaction on the horizon of the crop (Filipovic *et al.*, 2006). In contrast, the conservation tillage systems are commonly the result of reduced tillage practices. These systems try to alter the soil as little as possible to conserve its natural structure, which should lead to less compaction (Varsa *et al.*, 1997; Weise and Bourarach, 1999).

Hamza and Anderson (2005) considered certain physical traits of the soil as the main parameters used to characterize compaction. These correspond to the bulk density, soil strength or penetration resistance and infiltration of water into the soil. Spatial and temporal analysis of the dynamics of the physical traits of the soil is used as an indicator of its quality and, magnitude of the degradation processes of their structure and compactness. This method increases the accuracy of the predictions about the response of these

Hamza y Anderson (2005), consideran ciertas propiedades físicas del suelo como los principales parámetros usados para caracterizar la compactación. Estas corresponden a la densidad aparente, la dureza del suelo o resistencia a la penetración y la infiltración de agua en el suelo. El análisis espacial y temporal de la dinámica de las propiedades físicas del suelo, se utiliza como indicador de la calidad del mismo y de la magnitud de los procesos de degradación de su estructura y de compactación. Dicho método incrementa la certeza de los pronósticos acerca de la respuesta de esas propiedades a diversos usos, bajo determinadas prácticas de manejo (Muñoz-Villalobos *et al.*, 2011). Aunque el contenido de humedad es considerado, usualmente, como el factor más importante que influencia los procesos de compactación del suelo (Soane y Van Ouwerkerk, 1995; Hamza y Anderson, 2005), el grado de compactación originado por la labranza y el tránsito de maquinaria pesada es también, con frecuencia, una función de su textura (de las proporciones de partículas de arena, arcilla y limo), densidad inicial, estructura, contenido de materia orgánica, y de las condiciones climáticas (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). Con relación a la textura del suelo, Pillai y McGarry (1999), afirman que los vertisoles, que combinan un alto contenido de arcilla con una gran proporción de arcillas expandibles, presentan propiedades inherentes que facilitan la reparación de una estructura de suelo compactada, por lo que se esperaba que este tipo de suelos experimentara un rápido mejoramiento a corto plazo (Radford *et al.*, 2007).

Diversas investigaciones han determinado la duración de los efectos adversos de la aplicación de tránsito rodado y prácticas de labranza en vertisoles (Alakukku, 1996; Radford *et al.*, 2007), así como su influencia en la pérdida de rendimiento de diversos cultivos, entre ellos el maíz (*Zea mays* L.), (Honsson y Reeder, 1994; Filipovic *et al.*, 2006); no obstante, el comportamiento de las propiedades físicas de un vertisol a corto plazo, específicamente en la principal zona de producción de maíz del Estado de México, correspondiente al Valle Toluca-Atacomulco, bajo sistemas de labranza tradicional y de conservación, aún no ha sido estudiado, por lo que la presente investigación planteó como objetivos, determinar la influencia de tres sistemas de labranza (tradicional, mínima y cero) sobre la compactación de un vertisol, así como su efecto en el rendimiento de maíz, durante tres ciclos agrícolas anuales consecutivos.

traits to various uses, under certain management practices (Muñoz-Villalobos *et al.*, 2011). Although, the moisture content is considered usually as the most important factor influencing the processes of soil compaction (Soane and Van Ouwerkerk, 1995; Hamza and Anderson, 2005), the degree of compaction caused by tillage and traffic of heavy machinery is often a function of their texture (the proportions of particles of sand, clay and silt), initial density, structure, organic matter content, and climatic conditions (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). With regard to soil texture, Pillai and McGarry (1999) stated that vertisols, which combine a high clay content with a high proportion of swelling clays, have inherent traits that facilitate the repair of a compacted soil structure that would be expected that by this type of soils would experience a rapid improvement in the short term (Radford *et al.*, 2007).

Research has determined the length of the side effects of the application of road traffic and tillage practices in vertisols (Alakukku *et al.*, 1996; Radford *et al.*, 2007) and its influence on yield loss of various crops, including maize (*Zea mays* L.), (Honsson and Reeder, 1994; Filipovic *et al.*, 2006); however, the behaviour of the physical traits of a vertisol in the short term, specifically in the main maize production area of the State of Mexico, Valley of Toluca-Atacomulco under traditional systems and conservation tillage, has not yet been studied, so this research proposed as objectives, to determine the influence of three tillage systems (traditional, low and zero) on the compaction of a vertisol and its effect on maize yield for three consecutive annual agricultural cycles.

Materials and methods

Description of the experimental site

The study was conducted during the spring-summer growing seasons (PV) of 2010-2012, in an area of 0.25 ha in the experimental field of the Faculty of Agricultural Sciences at the Autonomous University of the State of Mexico (UAEM) in Toluca, State of Mexico, Mexico (North 11atitud 9° 24' 43", 99° 41' 40" W, 2 609 m). The climate is classified as temperate sub-humid with summer rainfall, with annual precipitation range from 800 to 1 500 mm and temperature of 4-14 °C (INEGI, 2009). Tillage systems were established

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El estudio fue realizado durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) del periodo 2010-2012, en un área de 0.25 ha del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), en Toluca, Estado de México, México (11 latitud norte 9° 24' 43", 99° 41' 40" longitud oeste, 2 609 msnm). El clima de la localidad se clasifica como templado sub-húmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1 500 mm y de temperatura de 4 a 14 °C (INEGI, 2009). Los sistemas de labranza se establecieron en un suelo clasificado como vertisol, suborden Uderts, gran grupo Pelluderts y subgrupo Entic Pelluderts (de acuerdo con el USDA Soil Taxonomy System), perteneciente a la clase textural migajón arcilloso.

Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones de los sistemas de labranza tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC), resultando en nueve parcelas de 12.8 * 10 m con 16 surcos a 0.8 m de distancia entre-surcos; cada parcela fue separada de otra por una calle de 8 m de ancho, considerada como área de maniobras de tránsito. Los sistemas de labranza fueron aplicados a las mismas parcelas cada año. Las operaciones y características de los aperos utilizados en cada sistema, se detallan en el Cuadro 1. Para los sistemas de LT y LC, se empleó un tractor con fórmula 4 * 2, potencia en el motor de 66.4 kW y 2.600 Mg de peso total y; para LM, se empleó un tractor con fórmula 4 * 4, con 89 kW de potencia en el motor y 4.16 Mg de peso total. El área experimental fue utilizada antes del 2010, para el cultivo de maíz, avena y trigo bajo LT por más de 10 años. Los sistemas de labranza fueron establecidos desde 2008 (con 0% de rastrojo para LT, 25% para LM y 100% para LC en cada ciclo agrícola), a fin de estudiar los efectos de la labranza y otras técnicas de producción en el cultivo de maíz, así como en la calidad del agua y suelo.

Propiedades químicas del suelo

Previo al inicio de las operaciones de labranza en 2011, se obtuvieron muestras de suelo del área de estudio, para determinar las condiciones de pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{Cmol}^+ \text{kg}^{-1}$), conductividad eléctrica (CE,

on a soil classified as vertisol, suborder Uderts, great group Pelluderts and, subgroup Entic Pelluderts (according to the USDA Soil Taxonomy System), belonging to the clay loam textural class.

Experimental design

The experimental design consisted of an array of randomized complete block with three replications of traditional tillage systems (LT), minimum (LM) and zero (LC), resulting in nine parcels of 12.8 * 10 m with 16 rows 0.8 m between-grooves; each plot was separated from another by a road 8 meters wide, considered the maneuvering area of traffic. Tillage systems were applied to plots each year. Operations and features of the tools used in each system are listed in the Table 1 for the LT and LC systems, tractor formula 4 * 2, engine power of 66.4 kW and 2 600 mg total weight was used and; for LM, a tractor with formula 4 * 4, with 89 kW of engine power and 4.16 Mg total weight was used. The experimental area was used before 2010 for the cultivation of maize, oats and wheat under LT for over 10 years. Tillage systems were established since 2008 (with 0% stubble for LT, 25% for LM and 100% for LC in each agricultural cycle) in order to study the effects of tillage and other production techniques in growing maize, as well as water quality and soil.

Soil chemical traits

Before starting tillage operations in 2011, soil samples from the study area were obtained in order to determine the conditions of pH, cation exchange capacity (CEC, $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$), electrical conductivity (EC, dS m^{-1}), total nitrogen (N%) and organic matter content (MO,%). All samples and variables were obtained and determined under the methods proposed by the NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002).

Bulk density

Bulk density ($\text{Da}, \text{g cm}^{-3}$) was determined under the proposed NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), by obtaining three soil samples from each plot, 15 and 30 cm depth method prior to the start of each tillage operations of each agricultural cycle.

Resistance to penetration

In order to evaluate soil strength, resistance to penetration, obtained by using a portable penetrometer (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc,

dS m⁻¹), nitrógeno total (N, %) y contenido de materia orgánica (MO, %). Todas las muestras y variables fueron obtenidas y determinadas bajo los métodos propuestos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002).

Aurora IL, USA) we used as an alternative measure in order to determine the Cone index (CI), recording the pressure in kPa applied every 2.5 cm, at a depth of 30 cm. At least three penetrometer readings were taken on the tracks of the

Cuadro 1. Sistemas de labranza y especificaciones de los aperos utilizados.

Table 1. Tillage systems and specifications of the implements used.

Sistemas de labranza e implementos	(tipo/modelo)	Peso (kg)	Ancho de trabajo (cm)	Profundidad de trabajo (cm)	Núm. de pases
Labranza tradicional (LT)					
Arado	(de discos/John Deere® 635)	599	76.2	30	2
Rastra	(de discos tipo excéntrico/John Deere® MX425)	1667	297	10	4
Siembra y fertilización	(sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M)	550	200	10	1
Escarda	(cultivador de cuatro surcos/John Deere® 812)	450	244	15	1
Labranza mínima (LM)					
Subsoleo	(multiarado/M-250)	890	200	68.5	1
Rastra	(de discos tipo excéntrico/John Deere® MX425)	1667	297	10	3
Siembra y fertilización	(sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M)	550	200	10	1
Labranza cero (LC)					
Siembra y fertilización	(sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M)	550	200	10	1

Densidad aparente

La densidad aparente (Da, g cm⁻³) se determinó bajo el método propuesto por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), mediante la obtención de tres muestras de suelo de cada parcela, a 15 y 30 cm de profundidad, previo al inicio de operaciones de labranza de cada ciclo agrícola.

tractor for each plot, immediately after the weeding operation of the LT system in each growing season. The determination of the CI, was accompanied by the reading of the soil moisture (Ho, % volume) obtained with a meter portable moisture (Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum® Technologies, Inc, Aurora IL, USA), 12 and 20 cm deep.

Resistencia a la penetración

Para evaluar la dureza del suelo, se utilizó como medida alterna la resistencia a la penetración, obtenida mediante el empleo de un penetrómetro portátil (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), para determinar el índice de cono (IC), registrando la presión aplicada en kPa, cada 2.5 cm, hasta una profundidad de 30 cm. Se tomaron un mínimo de tres lecturas del penetrómetro en la huella del tractor de cada parcela, inmediatamente después de la operación de escarda del sistema de LT en cada ciclo agrícola. La determinación del IC, fue acompañada de la lectura de la humedad del suelo (Ho, % volumétrica), obtenida con un medidor de humedad portátil (Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), a 12 y 20 cm de profundidad.

Average infiltration rate

The average infiltration rate (AIR), was determined in the plots of each system, before the start of tillage operations in each agricultural cycle, according to the method of double cylinder infiltrometer proposed by Anaya (1977), and considering the modified formula by Porta *et al.* (1999): $AIR = V (A T)^{-1}$ where V is the volume of water (ml), A the area of the internal cylinder (cm²) and infiltration time t (min).

Grain yield

In order to evaluate the performance, we established in the experimental plots of hybrid maize (*Zea mays* L., cv. Aspros® AS-722), under a double row under rainfed conditions in the

Velocidad media de infiltración

La velocidad media de infiltración (VMI), se determinó en las parcelas de cada sistema, previo al inicio de operaciones de labranza en cada ciclo agrícola, de acuerdo con el método del infiltrómetro de doble cilindro propuesto por Anaya (1977), y considerando la fórmula modificada de Porta *et al.* (1999): $VMI = V(A t)^{-1}$, donde V es volumen de agua (mL), A el área del cilindro interno (cm²) y t el tiempo de infiltración (min).

Rendimiento de grano

Para evaluar el rendimiento, se estableció en las parcelas experimentales un cultivar de maíz híbrido (*Zea mays* L., cv. Aspros® AS-722), bajo un arreglo de doble hilera y condiciones de secano, en la primera semana de abril de cada ciclo agrícola del periodo experimental. La densidad de siembra fue de 50 kg ha⁻¹ con una distancia entre plantas de 0.15 m. El tratamiento de fertilización para todos los sistemas consistió de una dosis de 120-60-30 (N, P, K) unidades, aplicadas en la siembra. Como componente del rendimiento (Mg ha⁻¹), se consideró el peso de mil granos de la parcela útil (cuatro surcos centrales de 10 m de longitud), en cada ciclo agrícola.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), empleando software Statistical Analysis System, USA (SAS). Todos los parámetros fueron analizados con un mínimo de tres repeticiones y probados por significancia entre tratamientos ($p < 0.05$). Cuando se encontraron diferencias significativas, se utilizó la prueba de Tukey para determinar la diferencia entre medias.

Resultados y discusión

Propiedades químicas del suelo

Después de un periodo efectivo de dos años del establecimiento de los sistemas de labranza, los valores en 2011 de las propiedades químicas básicas del horizonte de cultivo, fueron similares en todos los sistemas (Cuadro 2). Según la determinación de la fertilidad del suelo de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), este se clasifica

first week of April each agricultural cycle of the experimental period. The seeding rate was 50 kg ha⁻¹ with a distance of 0.15 m between plants. Fertilization treatment for all systems consisted of a dose of 120-60-30 (N, P, K) units, applied at planting. As a component of yield (Mg ha⁻¹), the weight of a thousand grains of useful plot (four central rows of 10 m length) in each agricultural cycle was considered.

Statistical analysis

The data obtained were analysed by ANOVA using the software Statistical Analysis System, USA (SAS). All parameters were analysed with a minimum of three replicates and tested for significance between treatments ($p < 0.05$). When significant differences were found, the Tukey test was used in order to determine the difference between them.

Results and discussion

Soil chemical traits

After a period of two years of effective establishment of tillage systems, values in 2011 of the chemical traits of the horizon of the crop were similar in all systems (Table 2). As determined by soil fertility NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), this is classified as moderately acidic, with an average nutrient reserves and negligible effects of salinity (based on CIC and EC). The LC reported lower N content than other tillage systems (28% less on average); however, the N content of the LC is classified as high for non-volcanic soils (0.15 - 0.25% N) compared to very high (> 0.25% N) of LM and LT. Although there are significant differences in the content of MO between each system, all values reported for non-volcanic soils, high in the horizon of the crop (> 6%). The different contents of Mo in the three tillage systems showed that, since the establishment of the LM and LC in the experimental area (two years), the use of the subsoiler in LM, did not efficiently incorporated maize stover of the crop cycles 2009 and 2010, and for the plots of LC, the stubble remained on the surface as a cushioning material. The highest value of MO for LT, can be explained by the incorporation of organic material from the previous growing season, by the action of turning the plow itself.

como moderadamente ácido, con una reserva nutrimental media y efectos despreciables de salinidad (con base en la CIC y CE). La LC reportó un menor contenido de *N* que los demás sistemas de labranza (28% menor, en promedio); no obstante, el contenido de *N* de la LC se clasifica como alto para suelos no volcánicos (0.15 - 0.25% *N*), en comparación con contenido muy alto (> 0.25% *N*) de la LM y LT. A pesar de existir diferencias significativas en el contenido de MO entre cada sistema, todos reportaron valores, para suelos no volcánicos, muy altos en el horizonte de cultivo (> 6%). Los diferentes contenidos de MO en los tres sistemas de labranza, muestran que desde el establecimiento de la LM y LC en el área experimental (dos años), el empleo del subsolador en LM no incorporó eficientemente el rastrojo de maíz de los ciclos de cultivo 2009 y 2010, y que para las parcelas de LC, dicho rastrojo permaneció en la superficie como material de acolchado. El valor más alto de MO para la LT, puede explicarse por la incorporación de material orgánico del ciclo de cultivo anterior, por la acción de volteo propia del arado.

Densidad aparente

Los valores promedio de la densidad aparente de los diferentes sistemas de labranza, durante los ciclos agrícolas primavera- verano 2010-2012, mostraron (Cuadro 3) que, con la excepción de la LT en el ciclo 2011, en todos los ciclos y sistemas, la *Da* se incrementó con la profundidad y el mayor valor se presentó en la capa más profunda. El mayor incremento de *Da* entre capas de profundidad (7.4%) fue observado en LT durante el primer ciclo de cultivo. También en 2010, la LC presentó los mayores valores de *Da* en ambas capas de profundidad en comparación con los demás sistemas; esto confirma los resultados de investigaciones previas, donde se reportan mayores valores de compactación al establecer sistemas de cero labranza, en comparación con la labranza mínima y tradicional (Benito *et al.*, 1999; Tormena *et al.*, 2002). Para el segundo ciclo de cultivo, se observó una marcada disminución en los valores de *Da* comparados con los del primer año, valores que además se mantuvieron constantes para todos los sistemas y profundidades en el tercer ciclo.

Las razones de dicho comportamiento no resultan evidentes. Con la excepción de la LT en 2010 (0-15 cm), no se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza a la misma profundidad. La disminución de los valores de *Da* en ciclos de cultivo consecutivos, contradice lo reportado por Filipovic *et al.* (2006), quienes señalan

Cuadro 2. Propiedades químicas del suelo (0-30 cm) antes de las operaciones de labranza del 2011[†].

Table 2. Chemical traits of soil (0-30 cm) before tillage operations in 2011[†].

	LM	LC	LT
pH	5.6 ^a	5.6 ^a	5.8 ^a
CIC (cmol ⁺ kg ⁻¹)	22.5 ^a	20.5 ^a	23.8 ^a
CE (dS m ⁻¹)	0.6 ^a	0.5 ^a	0.8 ^a
Nitrógeno total (N, %)	0.27 ^a	0.21 ^b	0.31 ^a
Materia orgánica (MO, %)	6.88 ^b	6.14 ^a	7.56 ^c

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional; CIC= capacidad de intercambio catiónico; CE= conductividad eléctrica. [†]Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en el mismo renglón seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba de Tukey.

Bulk density

The average values of the bulk density of different tillage systems during the spring-summer growing seasons 2010-2012, showed (Table 3), with the exception of LT in the 2011 cycle, all cycles and systems, *Da* increased with depth and showed the highest value in the deepest layer. The highest increase in *Da* between layers deep (7.4%) was observed in LT during the first growing season. Also in 2010, the LC showed the highest values of *Da* in both layers of depth compared to the other systems; this confirms the results of previous research, where higher values of compaction are reported to establish no-tillage systems, compared to the minimum and conventional tillage (Benito *et al.*, 1999; Tormena *et al.*, 2002). For the second crop cycle, a marked decrease was observed in the values of *Da* compared to the first year, values also remained constant for all systems and depths in the third cycle.

The reasons for this behaviour are not evident. With the exception of LT in 2010 (0-15 cm), no significant differences between tillage systems at depth were observed. The decrease in the values of *Da* consecutive crop cycles, contradicts that reported by Filipovic *et al.* (2006), who point *Da* increments in subsequent cycles compared to the first year of research. The average values of *Da*, at both depths of all systems in the experimental cycle are reported below the threshold of adverse compaction (1.5 g cm⁻³). According to Butorac *et al.* (1992), the increase in the *Da* over this threshold on the horizon of the crop has a negative effect on growth and development of various crops.

incrementos de la Da en ciclos subsecuentes, comparados con el primer año de investigación. Los valores promedio de la Da, en ambas profundidades de todos los sistemas, en el ciclo experimental, se reportan por debajo del umbral de compactación adversa (1.5 g cm^{-3}). De acuerdo con Butorac *et al.* (1992), el incremento de la Da sobre dicho umbral en el horizonte de cultivo, tiene un efecto negativo en el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos.

Resistance to penetration

The curves of the CI showed similar responses of all systems in each crop cycle (Figure 1), with a tendency to increase the value of penetration resistance at depths higher than 20 cm. These similar responses represented by a single shape of the curves for the three systems in each cycle show a homogeneity in the behaviour of penetration resistance

Cuadro 3. Densidad aparente promedio de los sistemas de labranza durante el periodo 2010-2012[†].

Table 3. Average bulk density of tillage systems in 2010-2012[†].

Sistema de labranza	Profundidad (cm)	Da (g cm^{-3})			
		2010	2011	2012	2010-2012
LM	0-15	1.57 ^b	1.31 ^a	1.3 ^a	1.39 ^a
	15-30	1.59 ^b	1.33 ^a	1.32 ^a	1.41 ^a
LC	0-15	1.6 ^b	1.27 ^a	1.3 ^a	1.39 ^a
	15-30	1.64 ^b	1.32 ^a	1.31 ^a	1.42 ^a
LT	0-15	1.49 ^a	1.33 ^a	1.32 ^a	1.38 ^a
	15-30	1.6 ^b	1.28 ^a	1.31 ^a	1.4 ^a

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional; Da= densidad aparente. [†]Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba de Tukey.

Resistencia a la penetración

Las curvas del IC mostraron respuestas similares de todos los sistemas en cada ciclo de cultivo (Figura 1), con una tendencia a incrementar el valor de resistencia a la penetración a profundidades mayores de 20 cm. Estas respuestas similares, representadas por una misma forma de las curvas para los tres sistemas en cada ciclo, reflejan una homogeneidad en el comportamiento de resistencia a la penetración independientemente del tratamiento de labranza. El incremento en los valores de resistencia al aumentar la profundidad, se atribuye usualmente a la presencia de una discontinuidad vertical entre el horizonte de labranza y el subsuelo sin labor (Glinski y Lipiec, 1990).

En todos los ciclos de cultivo del periodo experimental, la LC presentó la mayor resistencia a la penetración promedio con respecto a los demás sistemas de labranza (Cuadro 4). Ferreras *et al.* (2000), también reportaron una mayor resistencia significativa del penetrometro, de la superficie hasta 20 cm de profundidad, bajo cero-labranza que en labranza convencional. Para 2010 y 2012, no se observaron diferencias significativas del IC entre LM y LT.

Las diferencias anuales en los valores de IC de cada sistema, pueden atribuirse a la variación en el contenido de Ho presente en cada parcela durante los distintos ciclos

independent of treatment implements. The increase in resistance values with increasing depth is usually attributed to the presence of a vertical discontinuity between the horizon and subsoil tillage without work (Glinski and Lipiec, 1990).

In all growing cycles of the experimental period, the LC had the highest average penetration resistance compared to other tillage systems (Table 4). Ferreras *et al.* (2000) also reported a significantly higher penetrometer resistance of the surface to 20 cm deep, zero-tillage than under conventional tillage. For 2010 and 2012, no significant differences between CI between LM and LT were observed.

The annual differences in CI values of each system can be attributed to the variation in the content of Ho present in each plot during the different stages of cultivation of the experimental period. The Ho in the surface layer (12 cm) was lower in LC and LM in LT (26% less on average), 20 cm deep, the LT Ho also reported the highest (27% higher on average) (Table 4). The high content of Ho in both layers of LT, can be explained by the higher level of water infiltration caused by farming activity in a relatively weak soil structure; this confirms the results of Carter *et al.* (1991), who argued that, in order to achieve a conductive state for water infiltration, it requires tillage operations to operate in areas with road traffic.

de cultivo del periodo experimental. La Ho en la capa superficial (12 cm) fue menor en LC y LM que en LT (26% menor en promedio), a 20 cm de profundidad, la LT también reportó la mayor Ho (27% mayor en promedio) (Cuadro 4). El alto contenido de Ho en ambas capas de la LT, puede explicarse por el mayor nivel de infiltración del agua originado por la actividad de labranza en una estructura del suelo relativamente débil; esto confirma los resultados de Carter *et al.* (1991), quienes sostienen que, para lograr un estado conductivo para la infiltración del agua, se requiere de operaciones de labranza en superficies donde opere tránsito rodado.

Lipiec y Hatano (2003), afirman que los valores críticos de resistencia a la penetración que detienen el crecimiento de la raíz varían de 3 000 a 4 000 kPa. En el experimento, se observaron valores promedio superiores a los 3 000 kPa, principalmente en LM y LC durante los primeros dos ciclos agrícolas. Los resultados del presente estudio sugieren que el empleo de aperos de labranza reduce la resistencia a la penetración en el horizonte de cultivo. Erbach *et al.* (1992), también reportaron resultados similares para no-labranza, con valores de resistencia a la penetración superiores a los de labranza con arado de vertedera y martillo.

Velocidad media de infiltración

Se encontró un efecto significativo del sistema de labranza sobre la VMI (Cuadro 5). Para todos los ciclos de cultivo, la mayor VMI se registró en LT y difirió significativamente de las tasas obtenidas en LM y LC. Por otro lado, en todos los casos, las VMI en LC siempre fueron significativamente menores que las de los demás sistemas. Los resultados muestran que las operaciones de labranza en el vertisol de estudio favorecen la infiltración de agua. Lo anterior resulta evidente, ya que la VMI en LT fue casi dos veces más alta que en LC. Güçlü *et al.* (2005), observaron efectos similares de mayor conductividad hidráulica a nivel superficial (20 - 30 cm), en tratamientos de labranza convencional con arado de discos, que en tratamientos de labranza mínima utilizando arado de vertederas. Otro factor que apoya dicho resultado, es el mayor contenido de MO de la LT en comparación con los demás sistemas (Cuadro 2). Esto confirma lo reportado por Reddy (1991), donde se aprecian incrementos en la tasa de infiltración del agua de 0.4 cm h⁻¹ debido a la incorporación de materia orgánica.

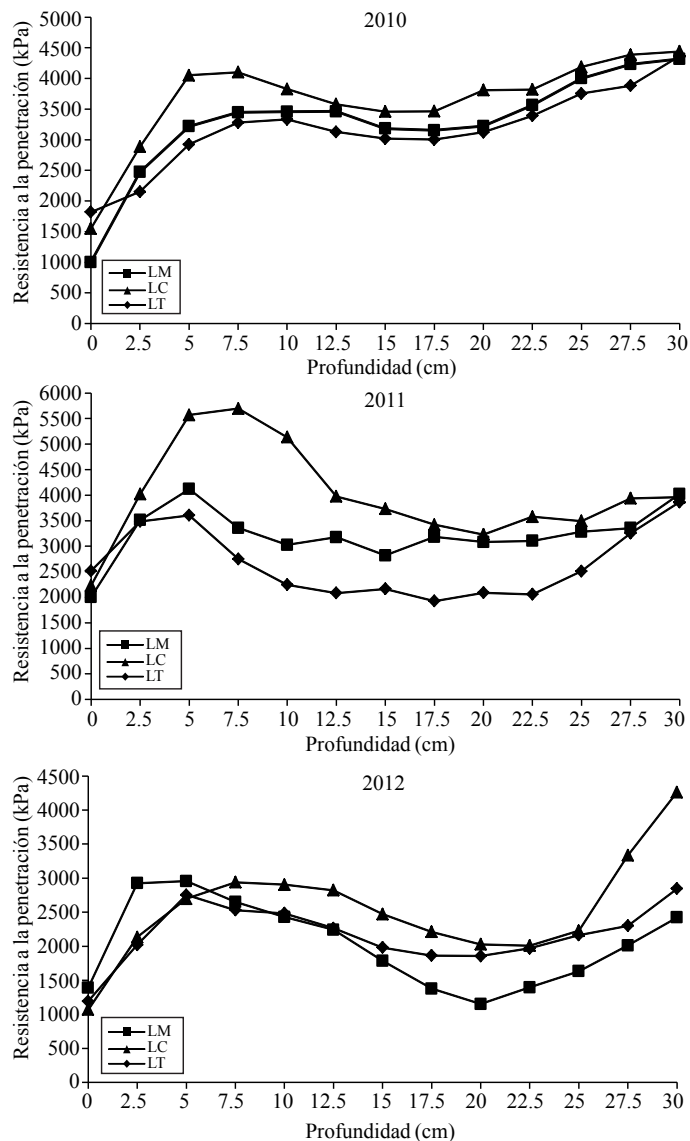


Figura 1. Curvas del comportamiento del índice de cono en sistemas de labranza mínima (LM), cero (LC) y tradicional (LT) durante tres ciclos de cultivo consecutivos.

Figure 1. Curves of the behaviour of cone index in tillage systems minimum (LM), zero (LC) and traditional (LT) for three consecutive crop cycles.

Lipiec and Hatano (2003) stated that the critical values of penetration resistance that stop root growth vary from 3 000 to 4 000 kPa. In the experiment, we observed higher than 3 000 kPa, mainly in LM and LC during the first two growing seasons mean values. The results of this study suggest that the use of tillage reduces penetration resistance on the horizon the crop. Erbach *et al.* (1992) also reported similar results for no-tillage, with resistance values higher than moldboard plow tillage and cock penetration.

Cuadro 4. Resistencia a la penetración y contenido de humedad del suelo promedio en los sistemas de labranza durante cada ciclo de cultivo[†].**Table 4. Resistance to penetration and average moisture content of soil tillage systems during each crop cycle[†].**

Sistema de labranza	Profundidad (cm)	Ho (%)	IC (0-30 cm, kPa)			
			2010	2011	2012	2010-2012
LM	12	21.5	3287 ^a	3234 ^b	2028 ^a	
	20	35.6				2850 ^b
LC	12	20.5	3659 ^b	3998 ^c	2547 ^b	3401 ^c
	20	27.9				
LT	12	25	3167 ^a	2659 ^a	2171 ^a	2666 ^a
	20	38.1				

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional; Ho= humedad volumétrica; IC= índice de cono. [†]Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba de Tukey.

Cuadro 5. Velocidad de infiltración del agua promedio en cada sistema de labranza durante tres ciclos de cultivo anuales consecutivos[†].**Table 5. Speed infiltration of average water in each tillage system for three consecutive crop cycles per year[†].**

Sistema de labranza	VMI (mL cm ⁻² min ⁻¹)			
	2010	2011	2012	2010-2012
LM	0.084 ^b	0.086 ^b	0.093 ^b	0.088 ^b
LC	0.043 ^a	0.044 ^a	0.047 ^a	0.045 ^a
LT	0.115 ^c	0.121 ^c	0.123 ^c	0.12 ^c

VMI= velocidad media de infiltración; LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional. [†]Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba de Tukey.

Rendimiento de grano

Los sistemas de labranza tuvieron un efecto significativo en los valores de rendimiento (Cuadro 6). En todos los ciclos de cultivo, los rendimientos más altos se obtuvieron con LM, aunque para 2010 y 2012 estos fueron estadísticamente similares a los de la LT. Los rendimientos de LM y LT, pueden atribuirse al mayor contenido de Ho y menor nivel de IC en ambos sistemas. De acuerdo con el SIAP (2014), los resultados para todos los sistemas en 2010 y 2011, fueron superiores a los promedios reportados para el distrito agrícola en los años correspondientes (49% mayor en 2010 y 155% mayor para 2011). La pérdida de rendimiento observada en 2012 en todos los sistemas, se debió a una escasa germinación ocasionada por severos encharcamientos en el área experimental. La obtención en LM de rendimientos superiores a LT anualmente (10% en promedio anual y 14% durante todo el periodo experimental), difieren de los resultados de Sartori y Peruzzi (1994), quienes reportaron una producción de maíz con métodos de LM, inferiores en 20-25% a los basados en el arado, así mismo, Borin y Sartori (1995), reportaron que entre labranza convencional, mínima y no-labranza, el mayor rendimiento fue obtenido con labranza convencional.

Average infiltration rate

A significant effect of tillage systems on the AIR (Table 5) was found. For all crop cycles, as recorded in AIR and LT differ significantly from the rates obtained in LM and LC. Furthermore, in all cases, the AIR LC were always significantly lower than other systems. The results show that tillage operations in the study of vertisol favour water infiltration. This is evident, as the AIR in LT was almost twice higher than in LC. Güçlü *et al.* (2005) observed similar effects from higher hydraulic conductivity at surface (20-30 cm) in treatments of conventional tillage with plow discs and minimum tillage treatments using moldboard plow. Another factor supporting this result is the higher content of MO LT compared with the other systems (Table 2). This confirms the results reported by Reddy (1991), where increases are seen in the rate of infiltration of 0.4 cm h⁻¹ due to the incorporation of organic matter.

Grain yield

Tillage systems had a significant effect on the yield values (Table 6). In all crop cycles, the highest yields were obtained with LM, but for 2010 and 2012 these were statistically

Cuadro 6. Rendimiento de grano promedio en tres sistemas de labranza durante el periodo 2010-2012[†].**Table 6. Average grain yield in three tillage systems in 2010-2012[†].**

Sistema de labranza	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)			
	2010	2011	2012	2010-2012
LM	6.2 ^a	6.4 ^a	3.4 ^a	5.3 ^a
LC	3.9 ^b	4.5 ^c	1.9 ^b	3.4 ^b
LT	5.6 ^a	5.2 ^b	3 ^a	4.6 ^a

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional. [†]Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($p < 0.05$) por la prueba de Tukey.

Conclusiones

El análisis conjunto de los parámetros comunes que caracterizan a la compactación del suelo (densidad aparente, dureza del suelo o resistencia a la penetración y velocidad de infiltración), permitió determinar, con mayor certeza, los factores que la originan, así como describir con precisión su desarrollo en el tiempo. En este sentido, el análisis individual de la densidad aparente, no permitió determinar cambios en la compactación del suelo por el efecto de los sistemas de labranza en el periodo de estudio.

Las características físicas inherentes al vertisol del área de estudio, no permitieron determinar en el corto plazo, tendencias claras en el incremento o remediación de los parámetros de compactación del suelo bajo diversos sistemas de labranza.

La VMI fue el único parámetro que presentó incrementos constantes durante cada ciclo consecutivo del periodo experimental en todos los sistemas de labranza, siendo la LM donde se observó el mayor incremento.

Durante el periodo de estudio, la adopción del sistema de LC para el cultivo de maíz, no representó ventajas en cuanto al rendimiento y remediación de la compactación del suelo, en comparación con los sistemas de LM y LT.

Se recomienda que la adopción de sistemas de labranza alternos al sistema tradicional en el área de estudio, deberá fundamentarse en los resultados de investigaciones a mediano y largo plazo, para determinar con precisión las ventajas que representan dichos sistemas, en cuanto a remediación de la compactación e incrementos en el rendimiento. No obstante, la adopción del sistema de LM en el área de estudio, podría representar, a corto plazo, mayores beneficios en la relación costo-beneficio del cultivo de maíz.

similar to those of the LT. Yields on LM and LT, can be attributed to the higher content of Ho and lower levels of CI in both systems. According to the SIAP (2014), the results for all systems in 2010 and 2011 were higher than the averages reported for the agricultural district in the corresponding years (49% higher in 2010 and 155% higher in 2011). Yield loss observed in 2012 in all systems, is due to poor germination caused by severe waterlogging in the experimental area. Higher yields in LM than those of the LT annually (10% average and 14% throughout the experimental period), differ from the results reported by Sartori and Peruzzi (1994), who stated maize production methods of LM, 20-25% lower than those based on the plow, also, Borin and Sartori (1995) reported that between conventional tillage, minimum and no-tillage, the highest yield was obtained with conventional tillage.

Conclusions

The set of common parameters that characterize soil compaction (bulk density, soil strength or penetration resistance and infiltration rate) analysis allowed us determining with better certainty, the factors that cause it and accurately describe its development over time. In this sense, the individual analysis of the bulk density did not allowed to calculate changes in soil compaction by the effect of tillage systems in the study period.

Inherent physical characteristics of vertisol of the study area, did not make possible to determine in the short term, clear trends in the increase or remediation of soil compaction parameters under different tillage systems.

The AIR was the only parameter which showed steady increases during each consecutive cycle of the experimental period in all tillage systems, being LM with the largest increase was observed.

Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada bajo los auspicios del proyecto: 2959/2010SF de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), y financiada por beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), de México.

Literatura citada

- Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil Tillage Res.* 37:211-222.
- Anaya, M. 1977. Manejo de cultivos y suelos en las zonas áridas y semiáridas de México. FAO/SIDA. Lima, Perú. Reunión - taller sobre conservación de suelos y manejo de las tierras. 121-122 pp.
- Benito, A.; Sombrero, A. and Escribano, C. 1999. The effect of conservation tillage on soil properties. *Agric. Rev. Agropec.* 68:538-541.
- Borin, M. and Sartori, L. 1995. Barley, soybean and maize production using ridge tillage, no-tillage and conventional tillage in north-east Italy. *J. Agric. Eng. Res.* 62:229-236.
- Butorac, A.; Basic, F.; Tursic, I. and Mesic, M. 1992. The response of some field crops to soil compaction. *In: proceedings of the 12th ISTRO conference.* Tallin, Estonia. 276-285 pp.
- Carter, L. M.; Meek, B. D. and Rechel, E. A. 1991. Zone production system for cotton, soil response. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.* 34:354-360.
- Erbach, D. C.; Benjamin, J. G.; Cruser, R. M.; Elamin, M. A.; Mukhtar, S. and Choi, C. H. 1992. Soil and corn response to tillage with para plow. *Transactions of ASAE.* 35:1347-1354.
- Ferreras, L. A.; Costa, J. L.; García, F. O. and Pecorari, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 54:31-39.
- Filipovic, D.; Husnjak, S.; Kosutic, S. and Gospodarcic, Z. 2006. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. *J. Terramechanics.* 43:177-189.
- Glinski, J. and Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press. Boca Raton, FL. 250 p.
- Güçlü, H.; Matthies, D. and Auernhammer, H. 2005. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil Tillage Res.* 84:200-215.
- Hamza, M. A. and Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82:121-145.
- Honsson, I. and Reeder, R. C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29(2-3):277-304.
- During the study period, the adoption of CR system for cultivation of maize did not represented advantages in yield and remediation of soil compaction compared to the LM and LT systems.
- It is recommended that, the adoption of alternative systems to the traditional system in the study area should be based on the research results in the medium and long term to accurately determine the benefits arising from those systems, in terms of remediation compaction and increased yield. However, the adoption of the LM system in the study area could represent the short term, with better benefits in cost-benefit ratio of the maize crop.

End of the English version



- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Toluca, México. Clave geoestadística 15106. INEGI. México.
- Lipiec, J. and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma.* 116:107-136.
- Mosaddeghi, M. R.; Hajabbasi, M. A.; Hemmat, A. and Afyuni, M. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Tillage Res.* 55:87-97.
- Muñoz-Villalobos, J. A.; Oleschko-Lutkova, K.; Velásquez-Valle, M. A.; Velásquez-García, J. de J.; Martínez-Menes, M. y Figueroa-Sandoval, B. 2011. Propiedades físicas de un Andosol Mólico bajo labranza de conservación. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1:151-162.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial (segunda sección)* (consultado diciembre, 2002). México, 85 p.
- Panayiotopoulos, K. P.; Papadopoulou, C. P. and Hatjioannidou, A. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Tillage Res.* 31:323-337.
- Pillai, U. P. and McGarry, D. 1999. Structure repair of a compacted Vertisol with wet-dry cycles and crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:201-210.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 2ª (Ed.). Bilbao, España. 330-339 pp.
- Radford, B. J.; Yule, D. F.; McGarry, D. and Playford, C. 2007. Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Res.* 97:249-255.
- Raper, R. L.; Reeves, D. W. and Burt, E. C. 1998. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *J. Cotton Sci.* 2:130-135.

- Reddy, M. S. 1991. Effects of soil amendments on the hardening of red sandy loams (chalka soils) of Andhra Pradesh. *Ann. Agric. Res.* 12:174-176.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. Anuario estadístico de la producción agrícola. Estado de México, Distrito de Toluca; ciclo primavera - verano 2010, 2011; modalidad: temporal (consultado agosto, 2014). <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-phhttp://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/or-cultivo/>.
- Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Tillage Res.* 35:5-22.
- Soil Science Society of America (SSSA). 2013. Glossary of soil science terms. Madison, WI, USA. 92 p.
- Tardieu, F. 1994. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction towards a system with multiple signaling. *Soil Tillage Res.* 30:217-243.
- Tormena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S. and Goncalves, A. C. A. 2002. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems. *Scientia Agricola* 59:795-801.
- Varsa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A. and Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristic and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Tillage Res.* 43:219-228.
- Weise, G. and Bourarach, E. H. 1999. Tillage Machinery. *In: CIGR handbook of agricultural engineering. Plant production engineering.* ASAE. St. Joseph. (3).