

COMPACTACIÓN INDUCIDA POR EL RODAJE DE TRACTORES AGRÍCOLAS EN UN VERTISOL

Compaction Induced by Breaking of Agricultural Tractors in Vertisol

Francisco Gutiérrez-Rodríguez^{1‡}, Andrés González-Huerta¹, Delfina de Jesús Pérez-López¹, Omar Franco-Mora¹, Edgar Jesús Morales-Rosales¹, Pedro Saldívar-Iglesias¹ y Carlos Gustavo Martínez-Rueda¹

RESUMEN

El nivel de compactación inducida en los campos de cultivo se ve fuertemente influenciada por el tránsito de los tractores y las máquinas agrícolas. La compactación del suelo aumenta en la mayoría de los casos y la resistencia mecánica del suelo impide la infiltración del agua y el crecimiento de raíces; además genera alteración de la densidad aparente y disminución del espacio poroso. El objetivo de estos ensayos fue probar el grado de alteración de algunas propiedades físicas en un vertisol. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones en un arreglo de parcelas subdivididas. Se utilizaron tres tractores de diferentes masas, potencias y rodaje así como cuatro variantes de contrapesos e inflado de aire en neumáticos. Los valores de F para los diferentes tractores resultaron significativos a 5 y 1%. En la comparación de medias entre tractores el tractor TM (tractor universal mediano 4 × 4), fue el que compactó más el suelo en los dos niveles superiores, debido al desgaste de sus neumáticos y el valor del índice de cono fue por encima del TP (tractor pesado 4 × 4). La compactación debido a lastre e inflado de neumáticos, tuvo su mayor valor en la capa superior y la compactación en la dos capas inferiores del suelo, dependió del contenido de la humedad gravimétrica en esos niveles de profundidad. Por otro lado, la densidad aparente del suelo se vio afectada en la mayoría de los casos por encima del testigo.

Palabras claves: resistencia a la penetración, densidad aparente, multiarado.

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas. El Cerrillo Piedras Blancas. 50200 Toluca, estado de México, México.

[‡] Autor responsable (fgrfca@hotmail.com)

SUMMARY

The level of induced compaction in crop fields is strongly influenced by the traffic of tractors and agricultural machinery. In most cases, soil compaction increases the mechanical resistance of the soil and thus prevents water infiltration and root growth; it also generates changes in bulk density and decreased porosity. The objective of this study was to test the degree of impairment of some physical properties in a clay soil. A randomized complete block design with three replications in a split-split-plot arrangement was employed. We used three tractors of different masses, powers, and drive train, and four variants of counterweights and tire air inflation. F values for the various tractors were significant at 5 and 1%. In the comparison of means between tractors (Factor A), the tractor TM (universal tractor medium 4 × 4), the more compacted soil was in the top two layers, because of the wear caused by the tires and the value of cone index was above the TP (heavy tractor 4 × 4). The compaction behavior variables ballast and tire inflation (Factor B) had its highest value in the upper layer, while in the two lower layers of soil it depended on the gravimetric moisture content. Moreover, soil bulk density was affected by most of the cases relative to the control.

Index words: penetration resistance, bulk density, multi-tillage.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción de maíz (*Zea mays* L.) y otros cultivos básicos en el Valle de Toluca, estado de México, México, están sufriendo cambios en los últimos años, ya que se está registrando un incremento en las prácticas de la labranza conservacionista o mínima para disminuir los daños que se producen por el tráfico de las máquinas agrícolas. Las prácticas tradicionales empleadas en su preparación han alterado de manera

sensible la compactación y la densidad aparente del suelo; sin embargo, todavía existe resistencia para la adopción de nuevas y más novedosas tecnologías para la preparación de los suelos por parte de los agricultores. Es importante señalar que la compactación en el suelo es la disminución del espacio poroso, especialmente de los macro poros, lo cual trae como consecuencia una menor aireación a nivel de raíces, menor capacidad para retener el agua y nutrimentos y una mayor impedancia para el desarrollo de las raíces (Jorajuria *et al.*, 1997).

De acuerdo con Becerra *et al.* (2005), la compactación es un fenómeno natural que expresa la respuesta del plasma del suelo a las fuerzas dispersivas del agua, acelerado con el uso y manejo de los suelos y aguas, contrario a la creencia de que la compactación se origina únicamente por el tráfico de maquinaria, a un contenido elevado de humedad edáfica.

Sin embargo, Voorhees (1989), comentó que la compactación del suelo es causada por la labranza y el tráfico de ruedas, pudiendo reducir sustancialmente el rendimiento de los cultivos. Para el suelo, la distribución de la compactación en el perfil está en función de la carga aplicada, de la presión ejercida por el rodado, del estado de humedad y de la intensidad de tránsito recibida (Raper y Erbach, 1990). A propósito de la presión ejercida por el rodaje de los tractores, es necesario plantear que las ruedas son el vínculo entre el vehículo y el suelo, y tiene como objetivo brindar una superficie de contacto que no exceda la capacidad portante del suelo y, a su vez, debe entregar una fuerza neta de tracción para arrastrar los distintos implementos de trabajo que se desplazarán sobre el suelo deformable (Solari *et al.*, 2000).

El desarrollo de condiciones físicas del suelo desfavorables es atribuido a diferentes factores, como el tráfico de vehículos durante las diferentes operaciones complementarias en el cultivo, la presión del rodaje con el suelo, la masa del tractor y los implementos agrícolas por unidad de área en contacto con el suelo agrícola; éstas son las variables que tienen incidencia sobre el aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración en diferentes horizontes del suelo (Danfors, 1994).

Botta *et al.* (2002) encontraron que la presión en la zona de contacto rueda-suelo puede influir en la compactación superficial, mientras que a una profundidad igual o incluso mayor de 40 cm, la masa sobre el eje, independientemente de la presión sobre

el suelo, es responsable de la compactación. En relación con lo anterior Jorajuria *et al.* (1997) propusieron dividir la compactación inducida por el tráfico agrícola en dos problemas diferentes, denominando compactación superficial a la disminución del volumen de los macro poros dentro del horizonte arable anualmente y la compactación sub superficial, la cual ocurre por debajo del horizonte arable por transmisión de las presiones que el rodado ejerce sobre el suelo.

Según Montovani (1987) las altas presiones de contacto rueda-suelo aparecen como uno de los factores responsables de alteración de la densidad aparente, al punto tal de presentar los siguientes perjuicios: demora en la emergencia de las plántulas, sistema radicular superficial, erosión excesiva y encostramiento del suelo, entre otros.

Alakukku (1997) concluyó que en condiciones de suelo húmedo el tránsito debe reducirse al mínimo indispensable y las presiones de inflado no deben superar los 50 kPa. Por otra parte, Sánchez Girón (1996) recomienda que si el número de pasadas de la maquinaria está comprendido entre 5 y 10 durante el ciclo vegetativo del cultivo, las presiones de contacto entre las ruedas y el suelo no deben superar los 80 kPa.

Jorajuria y Draghi (2000) concluyeron que el tránsito repetido sobre la misma senda puede reemplazar al factor masa sobre el eje del sistema de rodaje del tractor, y puede ser el responsable principal de inducir altas compactaciones en el subsuelo; la profundidad del horizonte del suelo que reacciona con un mayor incremento de la resistencia a la penetración tiende a hacerse más superficial en la medida que aumenta el número de pasadas.

A fin de evaluar la compactación que puede provocar el tránsito de diferentes tractores en suelo vertisol, al cual se le aplicó una preparación primaria con multiarado M-250 a casi 45 cm, se procedió a realizar diferentes intensidades de tránsito para conocer la alteración que se genera en la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo, en diferentes profundidades de muestreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente experiencia se realizó en enero de 2008, en el periodo sin precipitación pluvial. Se utilizó un terreno de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, en un suelo vertisol;

cinco años antes del experimento se realizó una nivelación espacial con rayo láser y desde entonces ha predominado la siembra de trigo (*Triticum aestivum* L.).

Esta Facultad está localizada en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México, dentro de la región conocida como Valle de Toluca, situada a 19° 23' 30" N y a 99° 41' 30" O del meridiano de Greenwich y a una altura de 2609 m. La clasificación del suelo según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norte América (USDA), se encuentra en el orden vertisol, subgrupo Entic pelluderts. El lote experimental tuvo un contenido de arcilla superior al 30% hasta los 50 cm de profundidad, presentando la formación de grietas de más de un centímetro de anchura hasta una profundidad de 50 cm. Esta cantidad de arcilla provoca la formación de superficies de fricción propias de los suelos que se encuentran dentro de este orden. El análisis del perfil del suelo vertisol, donde se realizó la presente investigación, fue caracterizado y hecho en el Laboratorio de Suelos de esta Facultad.

Treinta días antes de la preparación del experimento, el campo fue labrado con un multirado M-250 a una profundidad de 40 a 45 cm. Posteriormente se efectuaron mediciones de la compactación del suelo ocasionada por el tránsito de un grupo de tractores, los cuales tienen las siguientes características técnicas: TP (tractor pesado), con tracción delantera asistida y cubiertas delanteras 13.6-24.0" y las traseras 18.4-34.0" (pesado 4 × 4); TM (tractor universal mediano), con tracción delantera asistida y cubiertas delanteras 10.0-16.0" y las traseras 13.6-38.0" (universal mediano 4 × 4); TL (tractor universal ligero) y cubiertas 15.5-38.0" y 7.5-16.0" (universal ligero 4 × 2). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, en un arreglo de parcelas subdivididas. La resistencia a la penetración (Rp) fue medida a la profundidad de 5 a 15; 15 a 30 y 30 a 45 cm con penetrometro digital modelo Field Scout SC-900 (Spectrum Technologies, USA); también se determinó la humedad del suelo (Ho) para cada medición (en la capa superficial de 0 a 5 cm la resistencia a la penetración siempre superó los 5.0 MPa. Las variantes utilizadas en los tractores fueron: a) aire completo en los neumáticos traseros y delanteros con contrapesos; b) aire incompleto en los neumáticos traseros y delanteros (50%) con contrapesos; c) aire completo sin contrapesos y d) aire incompleto (50%) sin contrapesos. El tránsito realizado por los tractores en cada una de estas variantes en las parcelas fue de tres, cinco y diez

pasadas, en el escalón de velocidad donde la velocidad de desplazamiento fue casi de 4 km h⁻¹. Las mediciones realizadas se efectuaron sobre la huella del neumático del tractor y para cada nivel se realizaron cinco mediciones, las cuales se promediaron considerando los índices de cono obtenidos y la humedad del suelo en cada nivel de profundidad; la densidad aparente y la materia orgánica por niveles fue obtenida en el laboratorio con la metodología propuesta por la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2002), todas las mediciones fueron realizadas inmediatamente después del tránsito de los tractores. Las mediciones hechas en el testigo se realizaron en las calles laterales de la parcela experimental, antes de la preparación del suelo con multirado M-250 y de las pasadas de los tractores.

Para el análisis e interpretación de los datos se utilizaron el análisis de varianza, la comparación de medias de tratamientos con la prueba de Tukey ($P < 0.01$) y los coeficientes de correlación lineal entre parejas de variables; las salidas se generaron con el programa SAS (SAS Institute, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran los cuadrados medios y la significancia estadística de los valores de F; en éste se puede observar que entre tractores (factor A) a una profundidad de 5 a 15 cm la resistencia a la penetración Rp (5-15 cm) fue significativa al 5% y altamente significativa (1%) para los dos niveles inferiores de profundidad, lo cual es un indicador importante, ya que el tránsito de los diferentes tractores ocasionan daños sensibles en el suelo, lo cual corrobora lo planteado por Jorajuria y Draghi (2000), independientemente de la masa y sistema de rodaje empleado. La humedad gravimétrica (Ho) en el nivel superior de profundidad no fue significativo, pero en el nivel intermedio Ho (15-30 cm) fue significativo y en el nivel inferior Ho (30-45 cm) altamente significativo, por la humedad retenida que generalmente existe en los suelos vertisoles, o vertisoles en formación como en el caso en estudio.

Al analizar la densidad aparente se detectó que ésta fue significativa (5%) en el nivel superficial de profundidad, y altamente significativa (1%) en los dos niveles inferiores densidad aparente (DA) (15-30 cm) y DA (30-45 cm), en todos los casos se muestra que hay diferencia entre los tractores y esto se corrobora en lo planteado en sus investigaciones por Botta *et al.* (2004) y Zhang *et al.* (2006).

Cuadro 1. Cuadrados medios y valores de F para algunas variables medidas a diferentes profundidades, con cuatro lastres (métodos), intensidades de tráfico de tractores agrícolas en un suelo vertisol, en El Cerrillo Piedras Blancas, estado de México. Año 2008.

Fuentes de varianza	GL	Resistencia a la penetración			Humedad del suelo			Densidad aparente		
		5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
		----- MPa -----			----- % -----			----- g cm ⁻³ -----		
A tractores	2	2.234*	4.214**	4.703**	1.666ns	172.23*	58.103**	0.0193*	0.0923**	0.151**
Rep	2	0.168 ns	1.899*	3.867**	0.686ns	1.370ns	7.723	0.000 ns	0.008 ns	0.10 ns
B lastre	4	0.778*	0.314 ns	0.524ns	61.94**	51.85**	61.915**	0.0311**	0.002 ns	0.008ns
A*B	8	0.622*	0.288 ns	1.066*	7.089*	14.171ns	21.313*	0.006 ns	0.0107**	0.020*
C tránsito	2	0.486 ns	0.246 ns	0.297ns	2.913ns	10.54 ns	5.019 ns	0.003 ns	0.000 ns	0.000ns
A*C	4	0.601ns	0.192 ns	0.116ns	2.893ns	2.837 ns	9.111 ns	0.012*	0.004 ns	0.013ns
B*C	6	0.285ns	0.226 ns	0.284ns	3.524ns	10.699ns	16.082 ns	0.005 ns	0.000 ns	0.002ns
A*B*C	12	0.134ns	0.391 ns	0.319ns	2.288ns	13.401ns	7.622 ns	0.007 ns	0.001 ns	0.003ns
Error C	48	0.288	0.593	0.251	2.275	12.68	7.414	0.003	0.002	0.005
CV (%)		13.69	28.43	22.38	10.63	19.13	12.17	5.544	4.751	6.960
μ		3.91	2.71	2.24	14.17	18.61	22.37	1.125	1.108	1.108

ns = no significativo y *, ** significativo al 5% ó 1%, respectivamente.

Para el tránsito de los tractores (factor C), en ninguna de las variables se registró significancia. La interacción A × C fue significativa al 5% en la DA (5-15 cm). La interacción A × B × C en las diferentes variables no fue significativa. El CV para cada una de las variables tuvo un comportamiento dentro de los parámetros normales, de acuerdo a las mediciones registradas en campo y laboratorio.

En el Cuadro 2, al analizar la comparación de medias con la prueba de Tukey, la Rp (5-15 cm), en todos los tractores tuvo un comportamiento parecido, con un mismo grupo estadístico, sin embargo la resistencia a la penetración (Rp) para este nivel de profundidad se corresponde con los valores obtenidos en la DA del suelo, ya que para un tractor el valor de la Rp fue de 3.85 MPa y su valor correspondiente en DA es de 1.12 g cm⁻³. Sin embargo, estos valores varían a medida que aumenta o disminuye la resistencia a la penetración para los dos restantes tractores, lo cual es un índice que ayuda a detectar el nivel de compactación en un suelo, comportamiento similar se observa en el nivel medio para la Rp y DA, así también la humedad gravimétrica (Ho) en este nivel de profundidad de 15 a 30 cm, al parecer ha jugado un papel importante, ya que los aumentos o disminuciones de su contenido en el suelo se corresponden con los aumentos o disminuciones en las variables Rp y DA. Para este nivel de profundidad el testigo mostró una Rp de 2.44 MPa y en todos los casos estos valores están por encima de los obtenidos

después de las pruebas; lo mismo ocurre con la DA, donde el testigo presentó un valor de 1.08 g cm⁻³. Esto corrobora lo planteado por Montovani (1987) y Hamza y Anderson (2005), quienes hacen referencia a que las altas presiones de contacto rueda-suelo aparecen como uno de los factores responsables de la alteración de la (DA). En el nivel inferior de profundidad (30 a 45 cm), la Rp para los tractores TP y TL fueron superiores a los mostrados por el testigo (2.10 MPa), pero en el tractor TM se tuvo un valor por debajo del testigo, pero por encima del valor de éste en la DA del suelo, que fue de 1.17 g cm⁻³. Es necesario hacer notar que en estos niveles de profundidad poca influencia mostró el contenido de materia orgánica.

Threadgill (1982) y Jorajuria y Draghi (2000) encontraron que las plantas presentan problemas en su emergencia y reducción en el crecimiento de sus raíces cuando los valores del índice de cono son de casi 1.5 MPa y existen limitantes en el desarrollo de las plantas cuando los valores son mayores de 2.1 MPa. En los muestreos del suelo de 0 a 15 y de 15 a 30 cm, el valor de Rp está por encima del propuesto por estos autores. Los valores de DA, para los diferentes tratamientos, superaron en los diferentes estratos a los valores observados en el testigo sin tránsito que se indican en el Cuadro 2. Al comparar estos valores, con los obtenidos en los Rp, estos difieren con los reportados por Balbuena *et al.* (2003), pues los valores de DA crecen con el número de pasadas y no en las mediciones

Cuadro 2. Comparación de medias entre tractores. El Cerrillo Piedras Blancas, estado de México. Año 2008.

Tractores	Resistencia a la penetración			Humedad del suelo			Densidad aparente			Materia orgánica		
	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
	----- MPa -----			----- % -----			----- g cm ⁻³ -----			----- % -----		
TP (4×4)	3.85 a	2.54 a	2.25 a	14.2 a	19.2 a	23.7 a	1.12 a	1.09 b	1.09 b	2.6 a	2.4 a	2.5 a
TM (4×4)	4.18 a	3.08 a	1.88 a	14.3 a	16.2 a	21.3 a	1.14 a	1.16 a	1.17 a	2.8 a	2.5 a	2.1 b
TL (4×2)	3.71 a	2.49 a	2.58 a	13.9 a	20.3 a	22.0 a	1.10 a	1.06 b	1.05 c	2.4 a	2.0 a	1.8 b

Las medias con la misma literal dentro de cada columna son iguales estadísticamente (Tukey, $P < 0.01$).

realizadas en este índice. Terminiello *et al.* (2000), encontraron que el impacto en DA es importante en la medida en que se incrementan las pasadas continuas del sistema de rodaje de los tractores, y de manera lineal sobre la Rp, resultados que son congruentes con los valores presentados en el Cuadro 2.

La comparación de medias que se muestra en el Cuadro 3, se realizó teniendo en cuenta el lastre y la presión en los neumáticos durante las pruebas. Para las distintas variables a la profundidad de 5 a 15 cm, la Rp fue descendiendo a medida que se variaban las condiciones de lastre en el tractor y la presión en los neumáticos. Sólo en el nivel aire incompleto y sin contrapesos (AIS), la Rp estuvo por debajo del testigo, lo cual da una muestra sensible de que la presión en los neumáticos y el lastre juegan un papel importante en la compactación del suelo, resultados que coinciden con lo investigado por Chamen (2006).

A una profundidad de 15 a 30 cm, en todas las variables estudiadas los valores de la Rp estuvieron por encima del mostrado por el testigo, detectándose lo mismo para DA del suelo, ya que en la misma se utiliza a menudo como un parámetro para estimar la resistencia a la penetración; la Ho tuvo un mismo comportamiento

estadístico, pero en la materia orgánica se observó lo contrario, su presencia actuó como amortiguador en la resistencia a la penetración, lo cual se traduce en menor compactación del suelo.

En el muestreo de 30 a 45 cm, el nivel del factor AIS volvió a estar por debajo del valor del testigo, pero todos los demás niveles estuvieron por encima y, aunque la Rp tiene un mismo grupo estadístico, los valores aritméticos muestran lo sensible, en su variación con la presencia de la Ho, la cual muestra tres grupos estadísticos. La resistencia a la penetración en este nivel muestra el daño que ocasiona el tránsito del rodaje de los tractores en los diferentes niveles de profundidad del suelo, lo cual ha sido señalado por Whalley (2005) en sus investigaciones.

El análisis de correlación se muestra en el Cuadro 4. La correlación entre Rp y Ho fue negativa y significativa, lo cual plantea de forma clara que la resistencia a la penetración disminuya con el aumento de Ho.

La correlación entre Rp (15-30 cm) y Rp (30-45 cm) fue significativa al 5%, ya que la resistencia a la penetración en el nivel inferior de profundidad disminuyó sensiblemente y el contenido de humedad gravimétrica aumentó, por la retención de la misma en los suelos

Cuadro 3. Comparación de medias del Factor B. El Cerrillo Piedras Blancas, México. Año 2008.

Lastre de los tractores	Resistencia a la penetración			Humedad del suelo			Densidad aparente			Materia orgánica		
	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
	----- MPa -----			----- % -----			----- g cm ⁻³ -----			----- % -----		
ACC	4.15 a	2.64 a	2.35 a	13.8b	17.9 a	21.0 b	1.13 a	1.10 a	1.10 a	2.6 b	2.3b	2.3 a
AIC	4.04 a	2.84 a	2.30 a	13.4b	17.4 a	21.3 b	1.14 a	1.11 a	1.10 a	2.6 b	2.3b	2.2 a
ACS	3.89 a	2.68 a	2.33 a	13.6b	18.6 a	22.8 ab	1.11 a	1.11 a	1.13 a	2.1 b	2.0b	1.9 a
AIS	3.69 a	2.75 a	2.02 a	14.0b	18.9 a	22.9 ab	1.14 a	1.14 a	1.09 a	2.4 b	2.2b	2.2 a
Testigo	3.71 a	2.44 a	2.10 a	19.1a	22.7 a	26.4 a	1.02b	1.02 a	1.10 a	4.4 a	3.6a	1.8 a

Las medias con la misma literal dentro de cada columna son iguales estadísticamente (Tukey, $P < 0.01$). ACC = tractor con aire completo y contrapesos; AIC = tractor con aire incompleto en los neumáticos y contrapesos; ACS = tractor con aire completo en los neumáticos y sin contrapesos; AIS = tractor con aire incompleto en los neumáticos y sin contrapesos.

vertisol. Al correlacionar Rp (15-30 cm) con Ho en el nivel de profundidad intermedio e inferior, se detectaron asociaciones negativas y significativas al 1 y 5%. Para DA, en los primeros dos niveles de profundidad también hubo correlaciones significativas al 5%, lo que indica que con una afectación o cambio en la resistencia a

la penetración, esta repercute de forma directa en la densidad aparente del suelo.

Las correlaciones negativas y significativas entre Rp (30-45 cm) y Mo en los tres niveles de profundidad, sugieren que la resistencia a la penetración disminuye cuando aumenta la materia orgánica en el suelo.

Cuadro 4. Análisis de correlación entre las variables, después de las diferentes pasadas de los tres tractores sobre un suelo vertisol, con preparación primaria con multiarado a diferentes niveles de profundidad. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, México, 2008.

Variables	Resistencia a la penetración		Humedad del suelo			Densidad aparente			Materia orgánica		
	15-30 cm	30-45 cm	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
	MPa		%			g cm ⁻³			%		
Resistencia a la penetración 0-15 cm MPa	0.120	-0.242	-0.293	-0.125	0.061	0.008	0.080	0.088	0.000	0.017	0.467
Resistencia a la penetración 15-30 cm MPa		0.212*	0.063	-0.56 **	-0.321*	-0.003	0.254*	0.287*	0.002	0.063	0.047
Resistencia a la penetración 30-45 cm MPa			-0.022	0.011	-0.236*	-0.130	-0.093	-0.022	-0.277*	-0.221*	-0.188*
Humedad del suelo 0-15 cm %				0.080	0.259*	-0.321*	-0.082	-0.02	0.303*	0.290*	0.04
Humedad del suelo 15-30 cm %					0.449**	-0.021	-0.260*	-0.306*	0.069	0.029	-0.075
Humedad del suelo 30-45 cm %						-0.15	-0.233*	-0.196*	0.089	0.064	-0.033
Densidad aparente 0-15 cm g cm ⁻³							0.556**	0.065	0.065	-0.033	0.049
Densidad aparente 15-30 cm g cm ⁻³								0.816**	0.14	0.197*	0.173
Densidad aparente 30-45 cm g cm ⁻³									0.046	0.229*	0.252
Materia orgánica 0-15 cm %										0.77**	0.223*
Materia orgánica 15-30 cm %											0.695**

*, ** significativo al 5% ó 1% , respectivamente.

Estos resultados sugieren que en el Valle de Toluca, en el estado de México, es necesario disminuir la resistencia a la penetración en los suelos de tipo vertisol; la incorporación de materia orgánica contribuirá a incrementar sus niveles de fertilidad y retención de humedad y, particularmente, a mejorar sus propiedades físicas y químicas. Adicionalmente, los suelos de esta región preparados con tractores e implementos agrícolas de menor tamaño y masa y con un menor paso de maquinaria agrícola estarían relacionados con un menor gasto de combustible y, por lo tanto, contribuirá a reducir los costos de producción en el cultivo de maíz.

CONCLUSIONES

-Las diferentes intensidades de tráfico de los tractores empleados en las pruebas alteraron la resistencia a la penetración por encima de lo mostrado por el testigo, antes de la preparación del suelo con el multirado M-250.

-Por los valores obtenidos en los niveles de 15 a 30 cm y de 30 a 45 cm, el tránsito reiterado del sistema de rodaje de los diferentes tractores altera la resistencia a la penetración en mayor valor que el testigo, así como la densidad aparente del suelo.

-En el nivel superior de profundidad (5 a 15 cm) la disminución del lastre y de la presión en los neumáticos estuvo relacionado con una disminución en la resistencia a la penetración; este mismo comportamiento se observó en el nivel de profundidad inferior (30 a 45 cm).

-Al correlacionar (30-45 cm) con contenido de materia orgánica en los tres niveles de profundidad, se detectó una asociación negativa y significativa al 5%.

LITERATURA CITADA

- Alakukku, L. 1997. Properties of fine-textured subsoils as affected by high axle load traffic. *Acta Agric. Scand., Sec. B Soil Plant*: 47: 81-88.
- Balbuena, R., G. Botta, L. Draghi, H. Rosatto y C. Dagostino. 2003. Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa. *Spanish J. Agric. Res.* 1: 75-80.
- Becerra, C., E. Madero, O. Herrera y E. Amézquita. 2005. Caracterización espacial de la compactación en terrenos del CIAT, Colombia. *Rev. Inst. Inv. FIGMMG* 8: 33-37.
- Botta, G., D. Jorajuría, and L. Draghi. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayish soil. *J. Terramechanics* 39: 47-54.
- Botta, G., D. Jorajuría, R. Balbuena, and H. Rosatto. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yield. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.
- Chamen, W. C. T. 2006. Controlled traffic farming on a field scale in the UK. pp. 251-260. *In*: R. Horn, H. Fleige, S. Peth, and X. Peng (eds.). *Soil management for Sustainability. Advance in Geocology* 38. Reiskirchen, Germany.
- Danfors, B. 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil Till. Res.* 29: 135-144.
- Hamza, M. A. and W. K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Jorajuría, D. y L. Draghi. 2000. Sobre compactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia del peso y el número de pasadas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 4: 445-452.
- Jorajuría, D., L. Draghi, and A. Aragon. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of a *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil Till. Res.* 41: 1-12.
- Montovani, E. C. 1987. Compactacao do solo. *Inf. Agropec.* 13: 52-55.
- Raper, R. L. and D. C. Erbach. 1990. Prediction of soil stresses using the finite element method. *Trans. ASAE.* 33: 725-730.
- Sánchez-Girón, R. 1996. *Dinámica y mecánica de suelos. Aerotécnicas.* Madrid, España.
- SAS Institute. 1988. *SAS-STAT user's guide.* Release 6.03. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf>. (Consulta: noviembre 22, 2010).
- Solari, F. A., L. Draghi y H. G. Rossato. 2000. Comparación de dos métodos de medición de superficies improntas de rodado de tractor. *Avances en Ingeniería Agrícola 1998/2000.* Ed. Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.
- Terminiello, M. A., R. H. Balbuena, J. A. Claverie y J. P. Casado. 2000. Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción Hortícola. *Rev. Bras. Engen. Agríc. Amb.* 4: 290-293.
- Threadgill, E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Trans. ASAE* 25: 859-863.
- Voorhees, W. B. 1989. Root activity related to shallow and deep compaction. pp. 173-186. *In*: L. E. Lasson (ed.). *Mechanics and related processes in structured agricultural soil.* Kluwer Academic Publishers. Morris, MN, USA.
- Whalley, W. R., P. B. Leeds-Harrison, L. J. Clark, and D. J. G. Gowing. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil Till. Res.* 84: 18-27.
- Zhang, X. Y., R. M. Cruse, Y. Y. Sui, and Z. Jhao. 2006. Soil compaction induced by small tractor traffic in northeast China. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 613-619.