

Variaciones del índice de cono en suelo movilizado posterior al tráfico de un tractor equipado con dos tipos de neumáticos y a cuatro velocidades de desplazamiento

The cone index in soil mobilized after tractor traffic with bia-ply and radial tires and in four forward speeds

GABRIEL FILHO, A.¹; LANÇAS, K.P.²; BONNIN, J.J.²; LEITE, F.²; PAULA, C.A.² & MONTEIRO, L.A.²

Abstract

The tractor is one of the machines that more traffics over the soil during the processes involving agricultural production. The interaction tractor/soil is made by the tires which, in most of the cases, are pneumatic. The tire type and the tractor travel speed, interfere directly on the pressure over the soil. One of the techniques employed to evaluate the alterations that tractor traffic causes in the soil is to measure its Cone Index. The aim of this research was to evaluate the same Cone Index alterations caused by an agricultural tractor equipped with both radial tires and bias ply tires, trafficking mobilized soil in four different travel speeds. The experiment was performed in a LATOSSOLO VERMELHO, located 22°51' S, 48°25' W and 770 m of altitude, in Botucatu-SP, Brazil. The soil mobilization was performed with a chisel plow and a disc arrow. The traction was accomplished with a John Deere tractor, model 6600, with 88 kW of power and 6,723 kg. Equipment requiring a force of 25kN was traced by the tractor draw bar. The experimental design was in randomized blocks with 4 x 2 factorial arrangements, with two distinct treatments corresponding to the types of tires (bias and radial) and the four travel speeds, with six replications. There were selected the following speeds: 3.5, 3.9, 5.1 and 5.9 km h⁻¹. To determine the soil resistance, there was utilized MSSU - Mobile Soil

- (1) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE/Cascavel-PR, Brasil. gabriel@unioeste.br
(2) Departamento de Ingeniería Rural. Faculdade de Ciências Agronômicas, FCA/UNESP/Botucatu-SP, Brasil. kplancas@fca.unesp.br; bonnin@fca.unesp.br; leitef@fca.unesp.br; capaula@fca.unesp.br; aiveca@fca.unesp.br

Sampling Unit, with which the Cone Index was obtained in layers from 0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500 and over 500 mm deep. The Cone Index where evaluated in areas with non contact between tire and soil (ICn) and in the tire footprint track (ICp). There were calculated the Cone Index increments caused by the tractor tire (AIC) and the results showed that as the tractor travel speed increased, there were observed decrements in the medium values of cone index. The radial tire provided smaller values of the Cone Index in the superficial layer of the soil (0 to 100 mm) in relation to the bias ply tire, when the speed was approximately 6 km h⁻¹. The increment in the Cone Index, promoted by the tractor, was more intense in the first 200 mm depth, but it also reached the layer from 200 to 300 mm.

Key words: agricultural mechanization, tire test, soil compaction.

INTRODUCCIÓN

La labranza del suelo es una actividad agrícola realizada desde los inicios de la agricultura con el objetivo de proporcionar mejores condiciones de crecimiento de las raíces de las plantas cultivadas y obtener un mayor rendimiento de los cultivos (GROHMANN, 1961; BUKHARI *et al.*, 1989; CASTRO 1989; LAL 1991). Esta operación consiste, básicamente, en la movilización del suelo para quebrar la estructura de los agregados y así permitir mayor aireación y facilitar la penetración de las raíces en los espacios porosos aumentando, de este modo, el área de explotación radicular (CASTRO, 1990; GAMERO & BENEZ, 1990; BALASTREIRE, 1990).

Actualmente, la utilización de las labores de labranza han disminuido, ya que en muchos casos un suelo desestructurado causa más daños que beneficios, aumentando la susceptibilidad del mismo a la erosión y, por ello, en muchos cultivos no se lleva a cabo (STONE & MOREIRA, 2000; SILVA *et al.*, 2000). No obstante, en algunos cultivos, como la caña de azúcar, muchos agricultores utilizan esta práctica para incorporar nutrientes y correctivos y por entender que la siembra de los brotes es más eficiente y genera mayor uniformidad en el brote de las plántulas (CORSINI & FERRAUDO, 1999; PRADO *et al.*, 2003).

Además, en los procesos de producción agrícola donde se lleva a cabo el laboreo del suelo, el tráfico de máquinas que se produce durante y después de esta operación tiende a reorganizar las partículas del suelo de tal forma que el agregado vuelve a las condiciones anteriores a la labranza y, muchas veces, este suelo se vuelve todavía más denso, aumentando su compacidad, lo que provoca efectos perjudiciales al crecimiento radicular (DAUDA & SAMARI, 2002; Van DIJCK & Van ASCH, 2002; AKINCI *et al.*, 2004; CHAN *et al.*, 2006).

La compactación excesiva del suelo, que se debe principalmente al uso inadecuado del

mismo, es un fenómeno perjudicial para la producción agrícola (AMPOORTER *et al.*, 2007). Las consecuencias de esta mala utilización del suelo aparecen en el desarrollo del cultivo, disminuyendo la producción de las plantas cultivadas (BARLEY, 1963; TAYLOR, 1964; SCOTT, 2005).

La compactación del suelo puede ser el efecto más perjudicial que provoca el tráfico de vehículos en áreas cultivadas. Según RAPER (2005) cuando un vehículo circula sobre la superficie del suelo, hay una reducción del volumen disponible para el aire y el agua y los componentes minerales del suelo se aproximan unos a otros. Los efectos de la compactación pueden permanecer durante años y puede no ser reducido a través de las prácticas agrícolas convencionales (STONE & SILVEIRA, 1999; RICHARD *et al.*, 1999; YAVUZCAN *et al.*, 2002; RAPER, 2005).

La compactación del suelo viene afectada también por la carga aplicada en el palier del tractor, principalmente si el suelo se encuentra húmedo, condicionando el tráfico. Un factor importante a tener en cuenta para disminuir los problemas de compactación es trabajar el suelo en condiciones adecuadas de humedad (HAKANSSON & MEDVEDEV, 1995; STRECK *et al.*, 2004). El nivel de compactación debido al tráfico aumenta con la humedad del suelo y, dependiendo de la forma en que la maquinaria es utilizada (carga y ancho del neumático), causa disminución en la porosidad estructural posterior al paso de las rodadas (RICHARD *et al.*, 1999).

Las alteraciones que ocurren en las propiedades físicas del suelo bajo el efecto del tráfico son diferentes dependiendo del tipo neumático y las condiciones en que se utilizan (DOUGLAS *et al.*, 1992; ARVIDSSON & RISTIC, 1996; BOTTA, 2002; GRECENKO, 2003; NAGAOKA *et al.*, 2003; MAZETTO, 2004). De acuerdo con ARVIDSSON & RISTIC (1996), NAGAOKA *et al.* (2003) y MAZETTO (2004) los neumáticos de constitución diagonal causan mayor presión sobre el suelo que los neumáticos de constitución

radial cuando son utilizados con la misma presión de inflado.

La compactación del suelo puede ser medida a través de sus efectos en diversas propiedades físicas tales como densidad del suelo, porosidad o infiltración de agua, entre otros (STONE & MOREIRA, 2000; BEUTLER & CENTURION, 2003; STRECK, 2004). Un parámetro físico bastante utilizado para establecer el nivel de compactación del suelo, según O'SULLIVAN & BALL (1982), IMHOFF *et al.* (2000), TORMENA *et al.* (2002) y MOTAVALLI (2003) es la resistencia del suelo a la penetración o Índice de Cono.

De acuerdo con BENGOUGH & MULLINS (1990), WHALLEY *et al.*, 2005 y WHALLEY *et al.* (2006) la utilización de los penetrómetros inicialmente estaba asociada con el problema de tráfico de vehículos llamados "todo terreno". Sin embargo, más recientemente la resistencia del suelo obtenida con los penetrómetros se convirtió en una medida importante para analizar también el desarrollo radicular en el suelo, siendo el límite crítico de resistencia del suelo a la penetración, que reduce la producción de la planta, entre 2,0 a 3,0 MPa (TAYLOR & BUNETT, 1964; BENGOUGH, 1997; SILVA *et al.*, 2000).

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar las alteraciones en el estado de compactación, a través del Índice de Cono, de un LATOSSOLO sometido a preparo con

escarificador y rastra media, posterior al paso de un tractor con dos tipos de neumáticos y a cuatro velocidades de desplazamiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El experimento fue llevado a cabo en la *Fazenda Experimental Lageado*, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Estadual Paulista, Campus de Botucatu en un área con coordenadas 22°51'S y 48°25'W, una altitud de 770 m y relieve llano.

El suelo del área experimental se clasifica como LATOSSOLO VERMELHO según EMBRAPA (1999), con textura arcillosa.

Los ensayos fueron realizados en un área de 400 m de largo, 20 m de ancho y una pendiente del 0,3% en sentido longitudinal y nivelado en sentido transversal.

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con disposición factorial 2 x 4, siendo los tratamientos dos tipos de constitución de neumáticos (uno de constitución diagonal y otro de constitución radial) y cuatro velocidades del tractor diferenciadas por el cambio de marchas.

Los trabajos fueron realizados con un tractor John Deere 6600 de 88 kW (120 cv) de potencia en el motor a 2100 revoluciones por minuto y con la tracción delantera auxiliar conectada. La Tabla 1 muestra las características ponderales y la masa del tractor.

Características	Valores
Distancia entre árboles (mm)	2640
Altura de la barra de tracción (mm)	465
Carga estática sobre el rodado	
Delantero kg (%)	2.752 (41%)
Trasero kg (%)	3.971 (59%)
TOTAL kg (%)	6.723 (100%)

Tabla 1. Características ponderales y masa del tractor John Deere 6600.

La movilización del suelo fue realizada con un escarificador de cinco astas para romper la capa compactada y el pase posterior de una rastra media para deshacer los terrones de la superficie.

Para la determinación de la densidad de partículas, densidad del suelo, granulometría y límites de Atterberg, se utilizó la metodología propuesta por KIEHL (1979) y EMBRAPA (1997). La toma de muestras se realizó entre 5 y 10 cm de profundidad. Para la determinación de la humedad del suelo se tomaron las muestras a las siguientes profundidades: 0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500 mm de profundidad, con tres repeticiones por parcela.

En la tabla 2 se presentan los valores medios de textura, límites de Atterberg, densidades y humedad (hasta 500 mm).

Para suministrar fuerza en la barra de tracción fue utilizada la Unidad Móvil de

Ensayo en la Barra de Tracción, “*Unidade Móvel de Ensaio na Barra de Tração - UMEB*”, desarrollada por el Núcleo de Ensayo de Máquinas y Neumáticos Agroforestales, “*Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroforestais - NEMPA*”. La UMEB fue construida a partir de un remolque tipo casa (trailer), reformado y adaptado para utilizarse como un carro dinámico instrumentado, usado en el análisis y la evaluación del rendimiento del tractor sometido al ensayo de tracción. Su masa total era de 9.000 kg sustentada por un conjunto de cuatro ruedas dobles.

Se pudo establecer, en ensayos previos, la fuerza de 25 kN ejercida por la UMEB en la barra de tiro del tractor, para un patinaje próximo al 15 %, condición de trabajo considerada ideal para el mejor rendimiento del tractor, según la ASAE EP 496.2 (1999).

Características	Valores
Arena (g kg ⁻¹)	383,0
Limo (g kg ⁻¹)	188,7
Arcilla (g kg ⁻¹)	428,3
Límite de liquidez (g kg ⁻¹)	334,5
Límite de plasticidad (g kg ⁻¹)	258,1
Densidad de los sólidos (Mg m ⁻³)	2,9
Densidad del suelo (Mg m ⁻³)	1,1
Humedad (g kg ⁻¹)	
0 – 100 (mm)	103,0
100 – 200 (mm)	184,2
200 – 300 (mm)	198,8
300 – 400 (mm)	213,6
400 – 500 (mm)	213,2

Tabla 2. Características del suelo del área estudiada.

Se seleccionaron las marchas A3, B1, B2 y C1, que, en los ensayos previos con la carga de 25 kN en la barra de tiro, presentaron velocidades de 3,5; 3,9; 5,1 y 5,9 km h⁻¹, respectivamente.

Para determinar la resistencia del suelo a la penetración, fue utilizada la UMAS - Unidad Móvil de Muestro de Suelo desarrollado por el NEMPA - Núcleo de Ensayo de Máquinas e Investigaciones Agroforestales (Fig. 1). La

UMAS es una carreta cerrada, de un eje, equipada con un Penetrómetro Hidráulico-Electrónico, accionado y movilizado por un pistón y por válvulas hidráulicas. Presenta un sistema electrónico de adquisición de datos

donde quedan registrados los valores de fuerza, obtenidos a través de una célula de carga, conforme ASAE S313.2 (1999) y los datos correspondientes a su profundidad de penetración son generados por un potenciómetro.



Fig.1. Vista general de la UMAS traccionada por un tractor.

Se evaluó el Índice de Cono en donde no hubo contacto del neumático con el suelo (ICn) y en el lugar de paso del neumático del tractor (ICp) y se calcularon los incrementos de este índice causados por el tráfico del tractor (AIC).

Los datos obtenidos fueron sometidos al análisis de variancia y los valores medios comparados por el Test de Tukey ($p > 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en la tabla 3 muestran que el tráfico del tractor sobre el

suelo movilizado alteró significativamente el Índice de Cono hasta la profundidad de 300 mm.

La capa de suelo donde se llevó a cabo el preparo, esto es, hasta 300 mm de profundidad, presentó una ruptura de la estructura debida a los equipamientos de preparo utilizado. Por debajo de esta profundidad el suelo presentó valores considerados altos del Índice de Cono, por efecto del tráfico intenso de las máquinas y aperos agrícolas en el lugar, o de la distribución de la carga de los equipos en el subsuelo (“pié de arado”).

I.C.	Capas (mm)					
	0-100	100-200	200-300	300-400	400 – 500	> 500
ICn	662 b*	683 b	1.646 b	3.499 a	3.360 a	3.098 a
ICp	1.993 a	2.423 a	2.269 a	3.765 a	3.479 a	3.118 a
cv	34	29	27	29	31	32

Tabla 3. Valores medios del Índice de Cono en kPa obtenidos antes (ICn) y después (ICp) del paso del tractor en las seis capas de suelo estudiadas. * medias seguidas por letras iguales, en la columna, no difieren entre sí según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

Además, después de la ruptura del suelo por los aperos de labranza, se observa que, tras el paso de las rodadas del tractor con la carga de 25 kN, a partir de 100 mm de profundidad, el valor medio del Índice de Cono fue próximo a los alcanzados en las demás capas del suelo.

Considerando el valor medio de 2 MPa como límite para que el suelo esté compactado (TAYLOR & BUNETT, 1964; BENGOUGH, 1997; SILVA *et al.*, 2000), los valores presentados en la tabla 3 muestran que, aún después de que el suelo fue removido con los equipos de labranza, el paso del tractor de 6.723 kg. con una carga de 25 kN elevó la resistencia a la penetración principalmente en las capas más superficiales, llegando a estar próximo de este límite en la capa de 0 a 100 mm y por encima de él en las demás capas. DAUDA & SAMARI, (2002); Van DIJCK & Van ASCH, (2002); AKINCI *et al.*, (2004); CHAN *et al.*, 2006) también observaron un aumento significativo del Índice de Cono en las capas superficiales del suelo cuando éste es sometido al tráfico de máquinas agrícolas. Además, estos niveles de Índice de Cono en las capas por debajo de 0 a 100 mm, pueden resultar perjudiciales para el desarrollo radicular de las principales plantas cultivadas, conforme relataron BARLEY, 1963; TAYLOR, 1964 y SCOTT, 2005.

Los valores del Índice de Cono, presentados en la figura 2, muestran que el mayor aumento se produjo en la capa de 100 a 200 mm. NAGAOKA *et al.* (2004) observaron también que los valores del Índice de Cono fueron mayores en la capa de 100 a 200 mm que en el de la capa de 0 a 100 mm, para neumáticos radiales y diagonales.

La distribución de las fuerzas de compresión de los neumáticos es intensa en esta capa del suelo (CHANCELLOR, 1977), además de esto, el mayor contenido de agua en esta capa en relación a la capa superficial contribuyó al mayor aumento en el Índice de Cono, lo que concuerda con los resultados obtenidos por IMOFF *et al.* (2000), STONE & MOREIRA (2000), BEUTLER & CENTURION (2003) y STRECK (2004).

En la figura 2, puede observarse también que el aumento de los valores del Índice de Cono es más acentuado hasta la capa de 200 a 300 mm, y a partir de esta profundidad, la deformación del suelo causada por el tráfico del tractor, es menos evidente. GRECENKO (2003) y NAGAOKA *et al.* (2003) observaron, además, mayor efecto de la presión a 200 mm de profundidad en un suelo bajo el efecto de la presión causada por neumáticos.

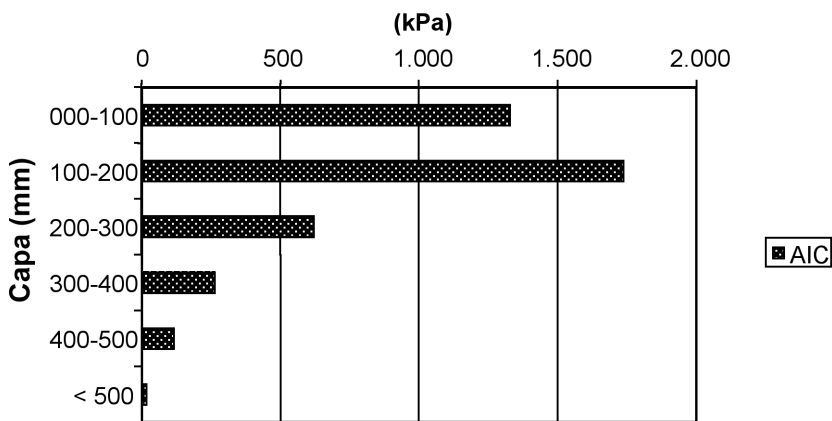


Figura 2 - Gráfico del aumento del Índice de Cono (AIC) debido al tráfico del tractor.

El cambio en la velocidad de desplazamiento y del tipo de neumático del tractor alteró la presión ejercida por las rodadas sobre el suelo, provocando una variación en los valores medios del Índice de Cono en las

capas del suelo estudiadas (Tablas 4 y 5), corroborando, de esta manera, los resultados obtenidos por DOUGLAS *et al.*, 1992; ARVIDSSON & RISTIC, 1996 y BOTTA, 2002.

Marcha	0 - 100		100 - 200		200 - 300	
	PD	PR	PD	PR	PD	PR
A3	2766 a* A	2505 a A	4501 a A	4067 a A	4521 aA	4142 a A
B1	2206 abA	2114 a A	3867 a A	3778 abA	3409 aA	3612 a A
B2	1849 bA	1860 a A	3438 a A	3121 abA	3168 aA	2800 abA
C1	1670 bA	976 b B	2282 bA	2329 bA	2992 aA	2125 bA
Cv	22		21		20	

Tabla 4. Valores medios del Índice de Cono obtenidos con el tractor en las capas de 0-100, 100-200 y 200 - 300 mm de profundidad, con los dos tipos de neumáticos y en las cuatro marchas.* medias seguidas por letras iguales, minúscula en la columna y mayúscula en la línea, no difieren entre sí según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

Se observa, en la tabla 4, que en las capas superficiales del suelo, a medida que aumenta la velocidad del tractor, los valores medios del Índice de Cono disminuyen. Para el tractor con neumáticos de constitución diagonal, en la capa de 0 a 100 mm, la disminución del Índice de Cono fue significativa a partir de la marcha B2 (aproximadamente 5 km h⁻¹) en relación a la marcha A3 (3,5 km h⁻¹). Cuando el tractor fue equipado con neumáticos de constitución

radial, la diferencia en el Índice de Cono fue significativa para la velocidad de 5,9 km h⁻¹ (C1) en comparación con las demás velocidades estudiadas. Por tanto, el tipo de neumáticos alteró el Índice de Cono, siendo significativamente menor la media obtenida con el neumático radial en relación al diagonal cuando la velocidad fue próxima a los 6 km h⁻¹. Resultados similares fueron obtenidos por ARVIDSSON & RISTIC (1996).

Marcha	300-400	400-500	>500	PR	PD	PR
	PD	PR	PD			
A3	3771 aA	4151 aA	3910 aA	3862 aA	3395 aA	3668 aA
B1	4131 aA	3178 aA	3662 aA	2883 aA	3266 aA	2543 aA
B2	4443 aA	3386 aA	3782 aA	3033 aA	3143 aA	2620 aA
C1	2910 aA	4151 aA	2961 aA	3742 aA	2801 aA	3508 aA
Cv	19		23		21	

Tabla 5. Valores medios del Índice de Cono obtenido en las cuatro marchas y con los dos tipos de neumáticos en las capas de 300-400, 400-500 y por debajo de 500 mm de profundidad. * medias seguidas por letras iguales, minúscula en la columna y mayúscula en la línea, no difieren entre sí según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

En la capa de 100-200 mm también se apreció efecto de la velocidad para los dos tipos de neumáticos ensayados (tabla 4). Con el neumático de constitución diagonal, el menor valor del Índice de Cono se observó cuando el tractor se desplazó a 5,9 km h⁻¹, siendo significativamente diferente a los valores obtenidos en las demás marchas. Cuando el tractor estaba equipado con neumáticos radiales, la diferencia de los valores medios del Índice de Cono fue significativa entre las marchas A3 y C1. Entre los neumáticos, no hubo diferencia significativa para los valores del Índice de Cono.

En la capa de 200 a 300 mm se observaron diferencias significativas en el Índice de Cono solamente cuando el tractor estaba equipado con neumáticos radiales en la velocidad de la marcha C1 en relación a las marchas A3 y B1 (tabla 4).

A medida que aumentó la velocidad de desplazamiento disminuyó el tiempo de contacto del neumático con el suelo y también la presión ejercida por el neumático sobre él, disminuyendo así, el efecto de la compresión del suelo. Esto provocó menores variaciones en el Índice de Cono conforme aumentaba la velocidad.

Los resultados mostraron que el tipo de constitución de los neumáticos modificó el modo en que se produce el contacto con el suelo, lo que concuerda con los trabajos de DOUGLAS *et al.* (1992), ARVIDSSON & RISTIC (1996), BOTTA (2002), GRECENKO (2003), NAGAOKA *et al.* (2003) y MAZETTO (2004). En el caso de los neumáticos de constitución radial la deformación del neumático, en condiciones dinámicas, ocurrió en los flancos evitando que esa deformación ocurriese en la banda de rodaje permitiendo así que hubiese

mayor área de contacto con el suelo. De esta forma, hubo una menor presión sobre el suelo y consecuentemente menor aumento en el Índice de Cono en comparación a los neumáticos de constitución diagonal, lo que está de acuerdo con los resultados obtenidos por NAGAOKA *et al.* (2003) y MAZETTO *et al.* (2004).

En las capas más profundas, a partir de 300 mm de profundidad, no hubo variación significativa de los valores medios del Índice de Cono tanto en relación a la velocidad de desplazamiento del tractor como del tipo de neumático utilizado (tabla 5).

Los datos mostraron que el efecto de la presión de las rodadas sobre el suelo, independientemente del tipo de constitución del neumático (diagonal o radial), hasta la velocidad de 5,9 km h⁻¹, fue más evidente en las capas más superficiales. Además, el efecto acumulativo, es decir, posterior a varias pasadas de las máquinas sobre el mismo lugar, puede llevar a un aumento de la resistencia del suelo en las capas más profundas.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que a medida que la velocidad del tractor aumenta, se produce una disminución de los valores medios de los Índices de Cono.

El uso del neumático radial proporcionó menor valor del Índice de Cono en la capa superficial (0-100 mm) en relación con el neumático diagonal, cuando la velocidad fue de, aproximadamente, 6 km h⁻¹.

El aumento del Índice de Cono provocado por el tractor fue mayor en los primeros 200 mm de profundidad, aunque también alcanzó la capa de 200 a 300 mm.

Recibido: 03 / 04 / 2007

Aceptado: 02 / 10 / 2007

BIBLIOGRAFÍA

- AKINCI, I.; ÇAKIR, E.; TOPAKCI, M.; CANAKCI, M. & INAN, O. (2004). The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. *Soil and Tillage Research*, 77: 203-210.
- AMPOORTER E.; GORIS A.R.; CORNELIS, W.M. & VERHEYEN, K. (2007). Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*, 241: 162–174.
- ARVIDSSON, J. & RISTIC, S. (1996). Soil stress and compaction effects for four tractor types. *Journal of Terramechanics*, 33 (5): 223-232.
- ASAE EP 496.2 DEC98. (1999). Agricultural Machinery Management. En: *Asae Standards*. American Society of Agricultural Engineering. St. Joseph. p. 683.
- ASAE S313.2 (1995). Soil cone penetrometer. En: *Asae Standards*. American Society of Agricultural Engineering. St. Joseph. p. 683.
- BALASTREIRE, L.A. (1990). *Máquinas agrícolas*. Manole. São Paulo. 310 pp.
- BARLEY, K.P. (1963). The influence of soil strength on the growth of roots. *Soil Science*, 96: 175–180.
- BENGOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Soil Science*, 41: 341–358.
- BENGOUGH, A.G. (1997). Modelling Rooting Depth and Soil Strength in a Drying Soil Profile. *Journal of theoretical Biology*, 186: 327-338.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. (2003). Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38 (7): 849-856.
- BOTTA G.F. ; JORAJURIA, D. & DRAGHIB, L.M. (2002). Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics*, 39: 47-54.
- BUKHARI, S.B.; MIRANI, A.N. & BALOCH, J.M. (1989). Soil manipulation with tillage implements. *Agricultural mechanization of Asia*, 20: 27-31.
- CASTRO, O.M. (1989). *Preparo do solo para a cultura do milho*. Campinas: Fundação Cargill,. 41 pp. (Série Técnica, 3).
- CASTRO, O.M. (1990). Avaliação de sistemas de manejo do solo. En: *IV Ciclo de Estudos Sobre Mecanização Agrícola*. Campinas. pp. 35-37.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR B.S. & PEOPLES, M.B. (2006). Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 89: 13-21.
- CHANCELLOR, W.J. (1977). Compaction of soil by agricultural equipment. *Bulletin. Division of Agricultural Sciences*. University of California, 1881: 1-53
- CORSINI, P.C. & FERRAUDO, A. S. (1999). Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34: 289-298.
- DAUDA, A. & SAMARI, A. (2002). Cowpea yield response to soil compaction under tractor traffic on a sandy loam soil in the semi-arid region of northern Nigéria. *Soil and Tillage Research*, 68: 17-22.
- DOUGLAS, J; CAMPBELL D & CRAWFORD C. (1992). Soil and crop responses to conventional, reduced ground pressure and zero traffic systems for grass silage production. *Soil and Tillage Research*, 24: 421–39.
- EMBRAPA. (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, Brasil. 212 pp.
- EMBRAPA. (1999). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, Brasil. 412 pp.
- JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. & ARAGON A. (1997). The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil and Tillage Research*, 41: 1–12.

- GAMERO, C.A. & BENEZ, S.H. (1990). Avaliação da condição do solo após a operação de preparo. En: *IV Ciclo de Estudos Sobre Mecanização Agrícola*, Campinas. pp. 12-21.
- GRECENKO, A. (2003). Tire load rating to reduce soil compaction. *Journal of Terramechanics*, 40: 97-115.
- GROHMANN, F. (1961). Influência do preparo do solo sobre a estrutura da Terra-Roxa-Legítma. *Bragantia*, 20: 1201-1209.
- HAKANSSON I. & MEDVEDEV, V.W. (1995). Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for tresses caused by heavy vehicles. *Soil and Tillage Research*, 35: 85-97.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. (2000). Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35 (7): 1493-1500.
- KIEHL, E.J. (1979). *Manual de edafologia*. São Paulo. 67pp.
- LAL, R. (1991). Tillage and agricultural sustainability. *Soil and Tillage Research*, 20: 133-46.
- MOTAVALLI, P.P.; ANDERSON, S.H.; PENGTHAMKEERATI, P. & GANTZER, C.J. (2003). Use of soil cone penetrometers to detect the effects of compaction and organic amendments in claypan soils. *Soil and Tillage Research*, 74: 103-114.
- O'SULLIVAN, M.F.; DICKSON, J.W. & CAMPBELL, D.J. (1987). Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of Soil Science*, 38: 137-148.
- PRADO R.M.; FERNANDES F.M. & NATALE W. (2003). Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27 (2): 287-296.
- RAPER, R.L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42: 259-280.
- RICHARD, G.; BOIZARDA, H.; ROGER-ESTRADEB, J.; BOIFFIN, J. & GUERIF, J. (1999) Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil and Tillage Research*, 51: 151-160.
- SCOTT, D.I.; TAMS, A.R.; BERRY, P.M. & MOONEY, S.J. (2005). The effects of wheel-induced soil compaction on anchorage strength and resistance to root lodging of winter barley (*Hordeum vulgare* L.). *Soil and Tillage Research*, 82: 147-160.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. (2000). Soil strength as affected by combine wheel traffic and two soil tillage systems. *Ciência Rural*, 30 (5): 795-801.
- STONE, L.F. & MOREIRA, J.A.A. (2000). Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35 (4): 835-841.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M.S. (1999). Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34: 83-91.
- STRECK, C.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. (2004). Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, 34 (3): 755-760.
- TAYLOR, H.M. & BURNETT, E. (1964). Influence of soil strength on root growth habits of plants. *Soil Science*, 98: 174-180.
- TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S. & GONÇALVES, A.C.A. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agrícola*, 59 (4): 795-801.
- Van DIJCK, S.J.E. & Van ASCH, W.J. (2002). Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil and Tillage Research*, 63 (3-4): 141-153.
- WHALLEY, W.R.; LEEDS-HARRISON, P.B.; CLARK, L.J. & GOWING, D.J.G. (2005). The use of effective stress to predict the

penetrometer resistance of unsaturated soils.
Soil and Tillage Research, 84: 8-27.

YAVUZCAN, H.G., VATANDAS, M. &
GÜRHAN, R. (2002). Soil strength as affec-

ted by tillage system and wheel traffic in
wheat-corn rotation in central Anatolia.
Journal of Terramechanics, 39: 23-34.