

Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa

R. Balbuena*¹, G. Botta^{2,3}, L. Draghi¹, H. Rosatto² y C. Dagostino³

¹ Departamento de Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
UNLP. 60 y 119 c 31. 1900 La Plata. Argentina

² Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. Facultad de Agronomía. UBA.
Avda. San Martín 4453. 1417 Buenos Aires. Argentina

³ Departamento de Tecnología. Universidad Nacional de Luján. Rutas 5 y 7. 6700 Luján (Buenos Aires). Argentina

Resumen

El presente trabajo muestra la incidencia del tránsito repetido de un tractor sobre las propiedades físicas de un suelo bajo el sistema de siembra directa en un cultivo de rotación continua trigo-soja. La compactación se cuantificó a través de los parámetros índice de cono y densidad aparente en seco, en forma previa y posterior al tránsito de un tractor seis, ocho, diez y doce veces sobre la misma senda. El suelo al momento del tránsito tenía una humedad promedio del 22%. Se utilizó un tractor con dos ruedas motrices de 52,25 kW (71 CV) en el motor, 3.020 kg de masa total, 940 kg sobre el eje delantero y 2.080 kg sobre el eje trasero, con rodado motriz 16.9-34 y rodado directriz 7.50-16. Se comprobó que a medida que se aumentó el número de pasadas, mayores fueron los valores de densidad aparente e índice de cono registrados en todo el perfil del suelo en estudio. Además, al aumentar el número de pasadas con tractores de bajo peso (29,6 kN), se indujo compactación subsuperficial. El sistema de siembra directa no es capaz de limitar la compactación inducida por tráfico ante situaciones de alta intensidad de tránsito.

Palabras clave: compactación subsuperficial, densidad aparente seca, índice de cono.

Abstract

Soil compaction. Tractor traffic effects on direct sowing systems

The present article evaluates the incidence of different traffic intensities on soil physical properties under a direct sowing system in the continuous crop rotation wheat-soybean. The traffic treatments applied were six, eight, ten or twelve consecutive passages of a tractor in the same track and a control plot without transit. The parameters used to quantify compaction were cone index and dry bulk density, measured before and after each traffic treatment, and compared with the control. The tractor used was a two wheel drive, 52.25 kW power engine, 3,020 kg total mass, 940 and 2,080 kg on the front and rear axles, 7.50-16 and 16.9-34 tyre size respectively. Results showed that as the number of passages increased, the values of bulk dry density and cone index registered in the soil profile studied were higher. Moreover, a higher number of passages of light tractors (29.6 kN) induced subsoil compaction. The direct sowing system does not limit subsoil induced compaction in high intensity traffic situations.

Key words: subsoil compaction, dry bulk density, cone index.

Introducción

El cultivo de soja (*Glycine max L.*) ocupa en la República Argentina año tras año un mayor número de hectáreas, constituyendo en la actualidad el principal cultivo estival. En una primera etapa se llevó a cabo un doble cultivo anual con rotación trigo-soja; posteriormente se potenció el incremento de prácticas de la-

branza conservacionista, principalmente con el sistema de siembra directa. Sin embargo, durante los primeros años, la preparación del terreno con implementos de roturación del suelo, luego de la cosecha del trigo, ocasionó severos daños al suelo desde el punto de vista de la fertilidad físico-química. Actualmente, alrededor de 9 millones de hectáreas son trabajadas con el sistema de siembra directa, lo cual representa el 38% de la superficie cultivada en Argentina (Bragachini *et al.*, 2000). Si bien la concepción de esta práctica tiende a mejorar la conservación del recurso suelo, coe-

* Corresponding author: balbuena@ceres.agro.unlp.edu.ar
Received: 18-01-02; Accepted: 17-12-02.

xisten resultados contradictorios en cuanto a la compactación inicial de los suelos, su evolución y persistencia en el tiempo, En este sentido, Unger (1996) indicó que debe tenerse particular interés en el seguimiento de la densidad aparente y el índice de cono, puesto que ambos factores pueden modificar la infiltración, el crecimiento radical y el rendimiento de los cultivos. Vehimeyer y Hendrickson (1948) determinaron que valores de densidad aparente de $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, mientras que Daddow y Warrington (1984) establecieron en $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ el umbral de crecimiento radical. Domínguez *et al.* (2000) registraron una mayor acumulación de compactación superficial y una mayor capacidad portante en suelos bajo siembra directa. Por otra parte, los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo colaboran no solamente en el aumento de la capacidad portante del suelo sino también en la disminución de los efectos perjudiciales del tránsito (Torbert y Reeves, 1995).

El desarrollo de condiciones físicas del suelo desfavorables es atribuido, entre otros factores, al tráfico de vehículos asociado con las operaciones del cultivo, indicándose el tipo de equipamiento, la presión en el área de contacto rueda/suelo, el número de pasadas, el tipo de suelo y la humedad del mismo, como las variables que inciden sobre la profundidad a la cual la densidad aparente y el índice de cono son incrementadas (Upadhyaya *et al.*, 1994). Meek (1996) indicó que en suelos arcillosos son mayores tanto los riesgos de compactar el subsuelo a niveles que limiten la producción agrícola, como mayor será también la persistencia del daño realizado. En cuanto a los efectos del tránsito con altas cargas por eje y el pasaje reiterado en una misma senda, Riley (1994) observó que no existían grandes diferencias en la reducción de rendimiento de cebada (*Hordeum vulgare* L.) entre un solo pasaje con una carga de 26 Mg/eje, con respecto al pasaje repetido cuatro veces de una carga de 14 Mg/eje. Además, informó que la compactación del suelo producto del pasaje repetido cuatro veces del tratamiento de 26 Mg/eje persistió por dos a tres años.

Jorajuría y Draghi (2000), en relación con el pasaje repetido de tractores de baja carga/eje, concluyeron que el pasaje repetido sobre la misma senda puede emular e incluso reemplazar al factor peso sobre el eje en la responsabilidad principal de inducir compactaciones en el subsuelo. Jorajuría (2001) indicó, además, que la profundidad del horizonte del suelo que reacciona con un mayor incremento del índice de cono

tiende a hacerse más superficial a medida que aumenta el número de pasadas. Por otra parte, identificó 10 pasadas como el número crítico de rodadas con las que se pierden las ventajas de traficar con un tractor liviano, como alternativa al trabajo de uno pesado con menor número de pasadas. En este mismo sentido, Botta *et al.* (2002) concluyeron que, en forma independiente del peso y de la superficie de contacto rueda/suelo, el número de pasadas reiteradas en una misma senda inducen compactación subsuperficial del suelo.

Independientemente de los efectos del tránsito, la densidad aparente del suelo y el índice de cono a nivel superficial y subsuperficial pueden incrementarse naturalmente en los sistemas de siembra sin labranza previa. Unger (1996) indicó que los incrementos naturales en estos parámetros usualmente están limitados a los 0,15 m superiores del perfil del suelo. La condición física del suelo en los estratos superiores del terreno incide también sobre la implantación y el desarrollo inicial de los cultivos. En general, el proceso de germinación es más rápido y completo con densidades aparentes de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ o menores, con diámetro medio de agregados igual o menor a 4 mm y con valores de índice de cono menores de 1,4 MPa. Según Nasr y Seles (1995), la densidad aparente afecta a la emergencia principalmente por cambios en el volumen y continuidad de los poros en la cama de siembra. Finlay *et al.* (1994) demostraron la conveniencia de la roturación del suelo por debajo de la profundidad de siembra, disminuyendo la densidad aparente y el índice de cono del suelo para alcanzar un mayor porcentaje de emergencia en el cultivo de trigo. Por otra parte, se cita frecuentemente que valores de índice de cono de 1,5 MPa retrasan el crecimiento del sistema radicular, mientras que registros de 2 a 2,5 MPa pueden detener el mismo (Treadghill, 1982).

El objetivo de este trabajo fue valorar los efectos del pasaje repetido de tractores agrícolas sobre las propiedades físicas del suelo, con la finalidad de averiguar la incidencia a largo plazo de la compactación inducida por tránsito en el sistema de siembra directa.

Material y métodos

El sitio

El ensayo se instaló sobre un suelo Argiudol típico, (Soil Conservation Service, 1994) de la serie Río tala, en el establecimiento La Regina, partido de Baradero,

provincia de Buenos Aires, Argentina, 33° 47' latitud sur, 59° 34' longitud oeste. El predio fue cultivado durante seis años con el sistema de siembra directa con rotación continua trigo (*Triticum aestivum* L.)-soja (*Glycine max* L.), efectuándose 2 cosechas por año.

El perfil del suelo posee: a) un horizonte A₁₁ de 0,16 m de desarrollo, de textura franco limoso, compuesto por un 26,1% de arcilla, 56,8% de limo, 17,1% de arena; b) un horizonte A₁₂, entre 0,16 y 0,30 m de profundidad, de textura franco arcillo limosa, con un 35% de arcilla, 50% de limo y 16% de arena; c) un horizonte B_{21t} a partir de los 0,30 m y hasta los 0,50 m, arcilloso, con estructura en prismas compuestos regulares gruesos fuertes, extremadamente duro en seco, firme en húmedo, muy plástico y adhesivo, y con un contenido de arcilla del 50,8%, 39,2% de limo y 10% de arena; d) un horizonte B_{22t} a continuación hasta 0,84 m, arcillo limoso, con estructura en prismas compuestos regulares gruesos fuertes, extremadamente duro en seco, muy firme en húmedo, plástico y adhesivo, con un contenido del 49,3% de arcilla, 40,3% de limo y 9,4% de arena. El contenido de materia orgánica para los horizontes descritos fue del 3,36; 2,64; 1,50 y 1,15% respectivamente.

La siembra directa se efectuó con una máquina sembradora y pasaje de pulverizadoras en forma previa y posterior a la misma. Las operaciones de cosecha se realizaron habitualmente con tránsito de la cosechadora y los carros graneleros desplazándose en forma conjunta por el predio para la descarga del cereal. En función de lo expuesto, y contabilizando la aplicación eventual de fungicidas e insecticidas para ambos cultivos, se estimó un número mínimo de seis pasadas y un número máximo variable de 8 a 12 pasadas de vehículos sobre el terreno.

El tractor

Se utilizó un tractor de diseño convencional de dos ruedas motrices (2RM) Massey Ferguson 1175, de 52,25 kW (71 CV) en el motor, 3020 kg de masa total, 940 sobre el eje delantero y 2.080 kg sobre el eje trasero, con rodado motriz 16.9-34 y rodado directriz 7.50-16. El área de contacto rueda/suelo se estimó de acuerdo con la propuesta para superficies rígidas de Inns y Kilgour (1978) citados por Sánchez-Girón Renedo (1996), correspondiendo al rodado delantero una superficie de 0,0646 m² y al rodado trasero 0,1844 m². En función de ello, las presiones en el área de contac-

to rueda/suelo resultaron de 142,65 y 110,55 kPa para los rodados delanteros y traseros respectivamente.

Diseño experimental

El diseño experimental fue en parcelas completamente al azar, realizando tres repeticiones de los distintos tratamientos de tránsito con 0 (parcela que se tomó como testigo sin tránsito), 6, 8, 10 y 12 pasadas. Las parcelas experimentales tuvieron una longitud de 50 m, en cuyo sector medio se establecieron las parcelas de medición de 30 m de longitud.

Los parámetros estudiados fueron: i) el índice de cono, que se tomó con un penetrómetro registrador S313 (ASAE, 1998) a intervalos de 25 mm de profundidad hasta los 575 mm, ii) densidad aparente, medida con sonda gammamétrica (Troxler 3440), para tres intervalos de profundidad, 0 a 150, 150 a 300 y 300 a 600 mm. Las mediciones de índice de cono y densidad aparente fueron realizadas inmediatamente después del tránsito, en el centro de la huella, según propuesta de Smith y Dickson (1990). Dentro de las parcelas de medición de cada tratamiento se realizaron 15 repeticiones de índice de cono, registrándose además dos mediciones de humedad gravimétrica por medio de un calador cada 100 mm de profundidad. Las mediciones se realizaron en el mes de enero de 2001 sobre un cultivo de soja sembrado en diciembre del año 2000 sobre el rastrojo de trigo cosechado en el transcurso del mismo mes, con una masa de 4.200 kg de materia seca por hectárea.

Resultados y Discusión

Se realizaron las tomas de datos en forma inmediata a la aplicación de los diferentes tratamientos de tránsito. La condición de humedad presente en el perfil al momento del tránsito se muestra en la Tabla 1, donde

Tabla 1. Humedad gravimétrica (%) en todo el perfil de suelo estudiado

Intervalo de profundidad (mm)	Humedad (% p/p)
0-150	22 a
150-300	23 a
300-450	26 a
450-600	25 a

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P \leq 0,05$ Tukey).

Tabla 2. Valores de densidad aparente (Mg m^{-3}) medidos gammamétricamente en tres intervalos de profundidad para los cinco tratamientos de 0, 6, 8, 10 y 12 pasadas

N.º pasadas	Profundidad (mm)		
	0-150	150-300	300-450
0	1,33 a	1,59 a	1,87 a
6	1,38 a	1,61 a	1,88 a
8	1,40 a	1,62 a	1,90 a
10	1,51 b	1,72 b	1,97 b
12	1,66 c	1,8 b	2,10 b

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P \leq 0,05$ Tukey).

se observa que la humedad en todo el perfil del suelo estudiado no arrojó diferencias significativas. Con esto se demuestra la independencia del parámetro índice de cono de la humedad del suelo al momento del tránsito.

En la Tabla 2 se detallan los valores de densidad aparente correspondientes al testigo y a los distintos tratamientos de tránsito.

La densidad aparente del suelo en el testigo sin tránsito registró valores elevados en la totalidad del perfil. A nivel superficial se superó el valor de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ indicado por Nasr y Seles (1995) para alcanzar una emergencia más rápida y completa en cultivos de trigo. En profundidad también se encontraron valores que superan el nivel crítico de $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ mencionado por Vehimeyer y Hendrickson (1948) para el desarrollo radicular de gramíneas y de $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ que establece el umbral de crecimiento radical según Daddow y Warrington (1984). En general, todos los tratamientos aumentaron la densidad aparente con respecto al testigo en todos los estratos, pero solamente los de 10 y 12 pasadas alcanzaron diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, el tratamiento de 10 pasadas lo hizo a nivel superficial, mientras que el de 12 pasadas se diferenció del testigo en los tres estratos analizados. No obstante, 10 pasadas incrementaron la densidad aparente del suelo en un 6,91 y 5,34% en los estratos de 150 a 300 y 300 a 600 mm respectivamente (Figura 1).

En relación con este parámetro surge, a diferencia de lo observado por Jorajuría y Draghi (2001), que al pasar 12 veces con un tractor de baja carga en el eje, el peso del mismo deja de tener responsabilidad en la compactación subsuperficial del suelo. Los estratos correspondientes a los horizontes A_{12} y B_{21b} , de 150 a 600 mm, ofrecieron por lo tanto una elevada capaci-

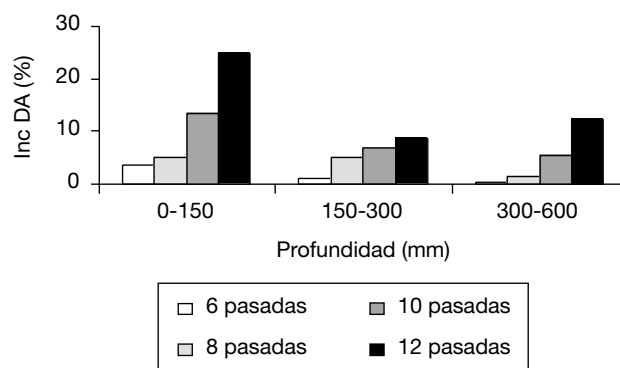


Figura 1. Incrementos de la densidad aparente respecto al testigo sin tránsito para 6, 8, 10 y 12 pasadas del tractor en tres intervalos de profundidad.

dad de soporte a las cargas producto del tránsito del tractor.

Al analizar el índice de cono (Tabla 3), todos los tratamientos de tránsito arrojaron diferencias significativas respecto al testigo, pero hasta distintos niveles de profundidad.

Es importante destacar que para el testigo, en los primeros estratos, se obtuvieron valores de índice de cono entre 1.300 y 1.400 kPa. A partir de 400 mm de profundidad se superó el valor de 1.500 kPa, mencionado por Threadgill (1982) como factor de retardo en el crecimiento radicular.

Si se tienen en cuenta para el testigo los valores de humedad (Tabla 1) y densidad aparente (Tabla 2) en conjunto con los resultados de índice de cono (Tabla 3), podría aseverarse que el testigo presenta un grado de precompactación que resultaría limitante para el desarrollo radicular en condiciones de baja humedad del suelo. Esta condición mecánica del sustrato brindaría en primera instancia una mejora en la capacidad portante del suelo (Domínguez *et al.*, 2000), la cual po-

Tabla 3. Valores de índice de cono (kPa) para 0, 6, 8, 10 y 12 pasadas de tractor medidos en tres intervalos de profundidad

N.º pasadas	Profundidad (mm)		
	0-175	200-375	400-575
0	1300 a	1302 a	1777 a
6	1380 b	1337 a	1812 a
8	1390 b	1356 a	1826 a
10	1470 c	1401 b	1845 a
12	1520 c	1506 c	2100 c

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P \leq 0,05$ Tukey).

dría atemperar, junto a los residuos de cosecha de trigo sobre la superficie del suelo (Torbert y Reeves, 1995), los efectos negativos del tráfico de vehículos. El tratamiento de mayor intensidad de tráfico (12 pasadas) fue el único que aumentó significativamente los valores de índice de cono del testigo superando en la totalidad del perfil bajo estudio (Tabla 3). Por otra parte, los incrementos de índice de cono para este tratamiento fueron en valores absolutos relativamente uniformes, sin que se detectaran zonas de incremento diferencial. A partir de los 175 mm de profundidad se registraron valores superiores a 1.500 kPa, lo cual constituye un riesgo para la capacidad de exploración radical del perfil. En cuanto a los valores absolutos de índice de cono iguales o superiores a 2.000 kPa, estos aparecieron entre los 400 y 575 mm del suelo luego de ser transitado 12 veces.

Solamente se registraron diferencias significativas respecto al testigo por debajo de los 200 mm (nivel subsuperficial) para los tratamientos de 10 y 12 pasadas de tractor. Los resultados confirman lo informado por Jorajuría y Draghi (2001) en lo referente a la posibilidad de inducir compactación a nivel subsuperficial con tractores de bajo peso/eje. Sin embargo, no se corrobora claramente que la profundidad del horizonte del suelo que reacciona con un mayor incremento del índice de cono disminuya en la medida que aumenta el número de pasadas. Si bien esto se manifiesta al compararse los tratamientos de 10 y 12 pasadas, no ocurre lo mismo al comparar los tratamientos de 6 y 8 pasadas. No obstante, es posible también avalar las conclusiones de Botta *et al.* (2002) en cuanto a que, independientemente del peso del tractor, el tránsito reiterado produce compactación a nivel subsuperficial. La compactación del suelo no logró mantenerse, tal como encontró Van den Akker (1998) dentro del horizonte arable (Ap), pese a que la carga/eje resultó inferior a 32 kN. Esto podría explicarse en parte por el tránsito repetido en la misma huella, como también por las reducidas áreas de contacto de los rodados delanteros y traseros, las cuales determinaron que las presiones de contacto estimadas alcanzaran valores de 142,65 y 110,55 kPa, 185,3 y 120% mayores a la presión de inflado de 50 kPa indicada por Jorajuría (2001) cuando la humedad del terreno resulta elevada.

En virtud de lo expuesto, sería diferente la problemática del tránsito repetido, con bajas y altas cargas en el eje, sobre la compactación inducida. Los resultados alcanzados por Riley (1994) indicarían que el efecto del pasaje repetido cuatro veces no resulta muy

distinto del que ocurre con un solo pasaje, cuando la masa/eje es muy elevada (26 Mg/eje), produciendo ambas condiciones compactación subsuperficial. En contraposición a ello, fueron necesarias al menos 10 pasadas del tractor para producir en profundidad una modificación significativa del índice de cono en el estrato delimitado entre 200 y 375 mm de profundidad. Si bien Jorajuría (2001) encuentra variaciones en las consecuencias del pasaje de tractores livianos y pesados en cuanto a su masa/eje, las diferencias en este factor son bajas en valores absolutos (1,08 Mg). Ambos tratamientos podrían tomarse entonces como de baja carga por eje, ya que ambos se encuentran por debajo del límite de 6 Mg/eje indicado por Håkansson y Danfors (1981) para prevenir los riesgos de compactación subsuperficial. Desde este punto de vista, el problema del tránsito repetido sería también afectado tanto por el peso como por el número de pasadas, estableciéndose las diferencias de la reacción del suelo en función de ambas variables. En este sentido, podría establecerse la hipótesis de que cualquier tractor puede causar compactación subsuperficial del suelo, resultando diferente el número de pasadas necesario para producir la misma, en relación inversa a la carga por eje del vehículo.

En acuerdo con Nasr y Seles (1995), las condiciones físicas del suelo, generadas como consecuencia del tráfico, podrían ocasionar, en razón de su impedancia mecánica, una emergencia más lenta y menos completa del cultivo de trigo. Esto implica que las máquinas sembradoras tendrán que trabajar sobre un sustrato que ofrecerá un alto grado de índice de cono y las plántulas deberán desarrollarse en un medio adverso. Por lo expuesto, en los sectores de los lotes de producción donde coincidan los pasajes de los rodados de tractores, pulverizadoras, cosechadoras y carros graneleros, los efectos del tránsito repetido en la misma senda podrían generar condiciones adversas y o limitantes en la emergencia del cultivo, a pesar de que la germinación no se vea afectada, al no superarse los valores de 3.000 kPa de índice de cono mencionados por Jorajuría (2001).

Por tanto, las sembradoras en el sistema de siembra directa deberían ser las encargadas de producir una mejor condición física del suelo para la implantación de los cultivos. Desde este punto de vista, la roturación del suelo en la línea de siembra constituye un factor de fundamental importancia, existiendo en función de ello diferentes mecanismos de corte de residuos y roturación del suelo, con distinta aptitud. Los resultados ob-

tenidos por Finlay *et al.* (1994) indican la conveniencia de roturar el suelo por debajo de la profundidad de siembra, a los efectos de generar condiciones físicas del suelo que no induzcan un retraso en la elongación del coleoptile y una menor emergencia. En relación con lo expuesto, la inclusión de cuchillas onduladas, como mecanismos de corte de rastrojo y roturación de la línea del cultivo trabajando a una mayor profundidad que el mecanismo abresurco, tendría ventajas en comparación con aquellos sistemas que utilizan cuchillas lisas de corte de residuos o los sistemas con un solo disco plano angulado que resuelve las funciones de corte de residuos y apertura del surco. Desde el punto de vista del tractor, y las máquinas agrícolas que habitualmente se utilizan en el sistema de siembra directa, surge claramente la necesidad de disminuir drásticamente la presión del neumático sobre el suelo. Las elevadas presiones en el área de contacto rueda/suelo serían las determinantes del incremento en el índice de cono en los primeros 150 mm del perfil. Puesto que el tractor posee baja carga sobre el eje, inferior a 2,1 Mg, la única alternativa posible es el incremento del tamaño de los neumáticos, junto a la disminución del número de pasadas del tractor. De esta forma, disminuyendo los problemas de compactación superficial, se reducen los problemas también de compactación subsuperficial en el sistemas a situaciones de alta intensidad de tránsito, de más de 8 pasajes sobre la misma senda, puesto que 6 y 8 pasajes sobre el terreno modificaron el índice de cono, pero no la densidad aparente del suelo. Pese a que el estrato superficial es el que posee mayor contenido de materia orgánica, resultó el más afectado por el tránsito repetido en la misma huella. Las características del perfil por debajo del horizonte A₁₂, en general muy firme en seco y de firme a muy firme en húmedo, junto a la estructuración propia del terreno en ausencia de labranzas, habrían brindado una mayor capacidad de soporte del suelo a partir de los 150 mm de profundidad.

Referencias bibliográficas

- ASAE STANDARDS., 1998. ASAE S313.2 Soil Cone Penetrometer. St. Joseph. Mich.: ASAE. 611 pp.
- BOTTA G., JORAJURIA D., DRAGHI L., 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J Terramechanics* 39, 47-54.
- BRAGACHINI M., MÉNDEZ A., VON MARTINI A., MONCHAMP J., 2000. Eslabonamiento productivo del sector maquinaria agrícola Argentina. Informe Técnico del Consejo Federal de Inversiones, 104 pp.
- COLLIS-GEORGE N., YOGANATHAN P., 1985. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat (*Triticum aestivum* L.) II. High shear strength conditions. *Aust J Soil Res* 23, 589-601.
- DADDOW R., WARRINGTON G., 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA - F5, Watershed systems development group REP. WSD6-TN-00005, USDA - FS, Fort Collins, CO. 203 pp.
- DOMÍNGUEZ J., RESSIA J., JORAJURÍA D., BALBUENA R., MENDÍVIL G., 2000. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. Avances en Ingeniería Agrícola. II Congreso Americano de Ingeniería Agrícola, pp. 110-115.
- FINLAY M.J., TISDALL, J.M., MCKENZIE B.M., 1994. Effect of tillage below the seed on emergence of wheat seedlings in a hardsetting soil. *Soil Till Res* 29, 215-225.
- HÅKANSSON I., DANFORS B., 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. 7th. Int. Conf. of ISTVS, Ed. ISTVS Hanover, NH, USA. 10 pp.
- JORAJURÍA D., 2001. Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular agrícola. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España. 135 pp.
- JORAJURÍA D., DRAGHI L., 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola Parte I: Influencia del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4, 445-452.
- MEEK P., 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. Technical Report Forest Eng. Res. Inst. of Canada. N° TR 117, 12 pp.
- NASR H.M., SELES F., 1995. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. *Soil Till Res* 34, 61-76.
- RILEY H., 1994. The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Soil Till Res* 29, 211-214.
- SÁNCHEZ-GIRÓN RENEDO V., 1996 *Dinámica y Mecánica de suelos*. Ed. Agrotécnicas, Madrid, España, 426 pp.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, 1994. Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff, USDA, USA, 6th. edition.
- THREADGILL E.D., 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *T ASAE* 25, 859-863.
- TORBERT H., REEVES D., 1995. Traffic and residue management systems: effects on fate of fertilizer N in corn. *Soil Till Res* 33, 197-213.
- UNGER P.W., 1996. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil Till Res* 37, 67-75.
- UPADHYAYA S. K., CHANCELLOR W., PRERUMPRAL J., SCHAFFER R.S., GILL W., VANDERBERG G., 1994. Advances in Soil Dynamics. Vol 1 Ed. De Vore-Hansen. St. Joseph, MI. 313 pp
- VAN DEN AKKER J.J., 1998. Prevention of subsoil compaction by defining a maximum wheel load bearing capacity. In: *Soil compaction and compression in relation to sugar beet production* (Märländer, B., Tijink, F.J., Hoffman, C. & Beckers, R., eds) 1, 55-66.
- VEIHMEYER F.J., HENDRICKSON A.H., 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci* 65, 487-493.