

## Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra

Draghi Laura<sup>1</sup>, Jorajuria Collazo Daniel<sup>1</sup>, Sarena Daniel<sup>2</sup>, Bailleres Matías<sup>2</sup>, Melani Esteban<sup>3</sup>, Castillo José Manuel<sup>1</sup>, Cerisola Cecilia<sup>1</sup>, Palancar Telmo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Avenida 60 y 119, 1900 La Plata, Argentina. Correo electrónico: draghilaura1@gmail.com

<sup>2</sup>MAA-INTA CEI Chascomús, Argentina

<sup>3</sup>NTA EEA Cuenca del Salado, Argentina

Recibido: 15/4/14 Aceptado: 8/4/15

### Resumen

Los sistemas productivos agrícolas presentan altos niveles de mecanización con tractores y máquinas cada vez más pesados. Como consecuencia, la compactación de los suelos es un problema emergente, dando como resultado el deterioro de la estructura de muchos suelos y la baja de los rendimientos productivos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de distintas intensidades de tráfico sobre dos condiciones de suelo: con labranza y bajo siembra directa, sometidos a diferentes intensidades de tráfico. Se compararon dos sistemas de siembra: suelo bajo siembra directa y suelo con labranza. Como subtratamientos se estudió la incidencia del pasaje repetido sobre la misma senda de un tractor de 6,4 Mg resultando en una, cinco y diez pasadas. Para cuantificar la compactación inducida se evaluaron la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la profundidad de huella. Además se evaluó la compactación máxima resultante a través del test Proctor (1933). El suelo labrado resultó ser más compactable, presentando mayor profundidad de huella y menos resistencia a la penetración luego del tráfico. El suelo bajo siembra directa presentó una menor compactabilidad Proctor y una menor humedad óptima. Además, se encontró que este suelo tenía un mayor porcentaje de carbono total y de carbono particulado y mayor estabilidad estructural. El suelo bajo siembra directa fue capaz de almacenar más agua durante un periodo más prolongado. Hubo un comportamiento reológico diferente según el sistema de labranza. Los cambios en las propiedades físicas medidas resultaron más evidentes en el suelo labrado.

**Palabras clave:** propiedades físicas del suelo, capacidad portante, densidad aparente

### Resumen

## Impact of Traffic in Two Sowing Systems

Agricultural farm systems show high levels of mechanization using tractors and machines weighing more than formers. As a consequence, soil compaction is an emerging problem, resulting in the deterioration of the structure of many soils and low yields. The aim of this study was to evaluate the effect of different intensities of traffic on two conditions of soil: low tillage and direct seeding, under different traffic intensities. Two sowing systems were compared: direct seeding and tilled soil sowing. As sub-treatments, multiple traffic intensities were applied using one, five and ten passes of a 6.4 Mg tractor. Induced soil compaction was assessed by penetration resistance, bulk density and rut depth. In addition the resulting maximum compaction was evaluated using Proctor Test (1933). Tilled soil was more compactable, showing more important rut depths and less penetration resistance after the traffic. The soil under reduced tillage presented lower Proctor compactness and lower optimum moisture. Furthermore, it was found that this soil had a higher percentage of total carbon and particulate carbon, and greater structural stability. The soil under no tillage was able to store more water for a longer period. There was a different rheological behavior under tillage system. The changes in physical properties were more evident in the tilled soil.

**Keywords:** soil physical properties, bearing capacity, bulk density

## Introducción

Los sistemas productivos de granos y carnes han evolucionado hacia esquemas de rotaciones cortas y altos niveles de mecanización con tractores y máquinas cada vez más pesados. La búsqueda de mayores capacidades de trabajo, aún sobre condiciones de suelo limitantes, y la necesidad de optimizar los rendimientos tractivos, son algunos de los factores que han presionado a la industria para la generación de vehículos de gran tamaño y por ende de gran masa. Si bien se ha mejorado en la selección del tamaño adecuado de neumáticos para no aumentar las presiones de contacto, el aumento significativo del peso de las máquinas debe ser soportado por un sustrato siempre deformable como lo es el suelo (Hamza y Anderson, 2005). Como consecuencia, la compactación de los suelos es un problema emergente inducido fundamentalmente por el tráfico de dichas máquinas, dando como resultado el deterioro de la estructura de muchos suelos y la baja de los rendimientos productivos.

La naturaleza y la magnitud de este problema, que puede maximizarse por la falta de materia orgánica y el tránsito sobre suelos húmedos, han sido reconocidas en el mundo entero. Esta degradación no se visualiza fácilmente en la superficie de los suelos, por lo cual debe ser monitoreada a través de varios parámetros indicadores de la modificación de las condiciones mecánicas, físicas y químicas del suelo afectado (Hamza y Anderson, 2005). La compactación altera el comportamiento físico, químico y biológico del suelo y los cultivos se ven alterados en su provisión de agua, aire y nutrientes.

Numerosos estudios relacionan el impacto de la compactación inducida y los diferentes sistemas productivos (Botta *et al.*, 2009, 2012; Tolon-Becerra *et al.*, 2011).

En Argentina 22 millones de hectáreas se hacen bajo siembra directa (Botta *et al.*, 2012). Aún bajo este sistema, moderadas intensidades de tráfico y cargas normales por debajo de los 30 kN son incapaces de limitar la compactación sub-superficial (Botta *et al.*, 2009). Botta *et al.* (2012) concluyeron que una pasada de un tractor pesado (más de 90kN) produjo compactaciones en el subsuelo. La siembra directa trajo aparejada una disminución del número de pasadas que deben hacerse sobre el terreno, pero no así de la intensidad del tráfico considerada en  $\text{Mg km ha}^{-1}$  (Botta *et al.*, 2009). Esta se mantuvo o subió a partir del mayor peso de los equipos utilizados.

Brasil y Argentina comparten como características climas templados y/o tropicales, es decir, sin la presencia del mayor agente descompactador natural anual: el congelamiento de los suelos. Eso llevó a la necesidad de desarro-

llar sembradoras con suficiente peso como para penetrar y mantener la profundidad en los suelos sin labranza, por tanto con mucha mayor impedancia. Estas nuevas y pesadas sembradoras demandan en el caso de las de mayor ancho de labor hasta más de 220 kW de potencia disponible en el motor. Significa entonces que el tractor y su equipo de siembra tienen valores similares de masa y se ubican en el orden de 12 a 15 Mg cada uno. Esto mantiene alta la intensidad de tráfico a pesar de la disminución en el número de pasadas sobre el mismo terreno (Jorajuria Collazo, 2005; Botta *et al.*, 2010).

La realidad descrita nos muestra la necesidad de evaluar la incidencia del tráfico en la modificación de algunas propiedades físicas del suelo que puedan ser indicadoras de la compactación inducida. Los parámetros más usualmente utilizados para cuantificar la compactación inducida son la resistencia a la penetración y la densidad aparente. La susceptibilidad de un suelo a densificarse puede ser determinada en laboratorio a partir de la realización de ensayos de compactabilidad o ensayos Proctor (Sánchez Girón-Renedo, 1996). Esta prueba analiza la posibilidad de un suelo de sufrir aumentos de densidad en respuesta a fuerzas externas aplicadas para diferentes rangos de humedades. En lo que respecta a valores limitantes de resistencia a la penetración en su relación al crecimiento radicular, Threadgill (1982) indicó que valores de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces, mientras que valores superiores a 2,1 MPa lo detendrían. Lógicamente la capacidad radicular para explorar el suelo depende de la especie vegetal. En ese sentido Stenitzer (1988) asumió, al modelizar el crecimiento de las raíces que, dependiendo del tipo de raíz, los valores que comienzan a ser limitantes varían entre 1 MPa (raíces de baja resistencia) y 1,7 MPa (raíces de alta resistencia), mientras que valores entre 3 y 4 MPa detendrían el crecimiento. El valor limitante también varía según la textura del suelo y la macroporosidad (Pabin *et al.*, 1998).

Por otro lado la principal limitante de la densidad aparente es la dificultad de tomar un gran número de muestras, sin introducir mayores disturbios, en un tiempo limitado, y el posterior trabajo de laboratorio que demanda su pesaje. Además es un indicador de menor sensibilidad que la resistencia a la penetración. La densidad aparente del suelo (peso seco del suelo/volumen) depende de varios factores, que incluyen los siguientes: la densidad de las partículas de suelo mineral, la cantidad de materia orgánica, la compactación del suelo, las actividades de animales que excavan en la tierra, tales como las lombrices, y la abundancia de raíces de plantas.

Raghavan *et al.* (1976) sostienen que el máximo rendimiento de un huerto frutal se obtiene con una densidad aparente del suelo del orden de  $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$  en el rango de 50-200 mm de profundidad, valores por encima del citado serían limitantes para que el cultivo alcanzara su rendimiento potencial. Daddow y Warrington (1983), trabajando sobre suelos arcillo-limosos, establecen como umbral para detener el crecimiento radicular el valor de  $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , y como limitante del crecimiento el valor de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ .

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de distintas intensidades de tráfico sobre dos condiciones de suelo: con labranza y bajo siembra directa, sometidos a diferentes intensidades de tráfico.

### Materiales y métodos

El suelo ensayado pertenece a la serie Udaondo correspondiente a un Argiudol Abruptico, Fina, illítica, térmica (Soil Survey Staff, 2006). La textura del horizonte Ap es franco arcillosa. El horizonte A tiene un desarrollo de 18 cm. Analizada la distribución del tamaño de partículas se obtuvo lo presentado en el Cuadro 1.

Las pruebas fueron realizadas sobre un ensayo pre-existente desde hace 14 años en la Chacra Experimental Integrada Chascomús (INTA-MAA) ubicada en el punto  $35^{\circ}44'39,23'' \text{ S}$ - $58^{\circ}03'10,21'' \text{ O}$ . El diseño experimental consistió parcelas divididas, dispuestas en bloques distribuidos al azar. Las parcelas grandes fueron los dos tratamientos (siembra directa y labranza) ocupando cada uno de ellos una franja de 42 m de ancho y 50 m largo. La labranza presiembra consistió en dos pasadas de rastra con 36 casquetes de 60 kg/disco a una profundidad de 10 cm y posteriormente una pasada de rastra de dientes. En ambos tratamientos se hicieron tres aplicaciones de glifosato 30 días antes del laboreo, con una máquina autopulsada de 18 m de ancho de botalón. En el mes de diciembre de 2012 se sembró moha (*Setaria italica*) con una sembradora Gitana cuya masa era  $2,5 \text{ Mg}$  y a continuación e inmediatamente después de la siembra se hicieron

los tratamientos correspondientes a las parcelas chicas, que fueron tres intensidades de tráfico (IT) que consistieron en una, cinco y diez pasadas sobre la misma senda de un tractor Valtra DM 120 de una masa con lastres de  $6,4 \text{ Mg}$ . Las pasadas (una, cinco y diez) se hicieron perpendiculares a la dirección de labranza-siembra. Las intensidades de tráfico se hicieron siguiendo las conclusiones de Canarache *et al.* (1984), quienes estudiaron los cambios en las propiedades físicas y rendimiento con distintas intensidades de tráfico y encontraron que los mayores cambios ocurrían hasta 10 pasadas, mayores intensidades de tráfico ya originaban efectos despreciables. Se calcularon las diferentes intensidades de tráfico que corresponden a ambos tratamientos siendo  $73 \text{ Mg km ha}^{-1}$  el valor alcanzado por la siembra directa y  $105 \text{ Mg km ha}^{-1}$  el suelo con labranza.

Luego del pasaje del tractor se determinó la profundidad de huella resultante de las tres intensidades de tráfico evaluadas.

Para determinar la resistencia a la penetración (RP) se utilizó un penetrómetro de cono electrónico RIMIX CP20, construido bajo Norma ASAE S312.2 (ASAE, 1992) con principio de medición de esfuerzos por puente extensiométrico electrónico y profundidad por ultrasonido. Puede relacionarse fácilmente la resistencia a la penetración con la dureza del suelo, y por ende con el trabajo necesario que deberán hacer las raíces de los cultivos para explorar dicho perfil. Se empleó un cono de  $30^{\circ}$  con diámetro de  $12,83 \text{ mm}$  y velocidad de penetración de  $30,5 \text{ mm.s}^{-1}$ . Se tomaron lecturas cada 25 mm, desde la superficie hasta una profundidad máxima de 300 mm. Por debajo de 300 mm no hay datos disponibles, porque se sobrepasaba los  $5 \text{ MPa}$ . La resistencia a la penetración entre tratamientos (directa vs. labranza) fue evaluada en diciembre de 2011 y diciembre de 2012. Con el objeto de poder comparar los valores de resistencia a la penetración, se determinó el porcentaje de humedad presente al momento de la medición en forma gravimétrica (g/g).

La evaluación de la densidad aparente se hizo por el método del cilindro que consiste en el pesaje de un volumen

**Cuadro 1.** Distribución de arena, limo y arcilla en los horizontes del suelo donde se hizo el experimento.

Clase Textural	0-30 cm	30-50 cm	>50 cm
	Franco limoso	Franco arcilloso	Franco limoso
Arena %	25,2	22,7	22,7
Limo %	57,5	50,0	52,5
Arcilla %	17,3	27,3	24,8

conocido. Se utilizaron cilindros que se hincaron en el suelo a diferentes profundidades: 0 a 5 cm y 5 a 10 cm (ver Cuadro 11). Luego se llevaron a estufa hasta peso constante calculando así la densidad aparente. Se utilizó un cilindro metálico con un diámetro de 8 cm y una altura de 5 cm.

Para determinar la humedad óptima de máxima compactación y la densidad máxima alcanzable, se realizaron los test de compactación normalizados Proctor con muestras de suelo de los primeros 20 cm para ambos tratamientos.

En laboratorio se determinó el porcentaje de carbono orgánico total (Walkley y Black micrométodo, Begenisic, 2004), carbono particulado (Walkley y Black micrométodo) y diámetro medio ponderado por tres métodos de pretratamientos: humectación rápida, trabajo mecánico y humectación lenta.

La hipótesis básica o fundamental que direcciona este trabajo es que los suelos bajo siembra directa tienen un comportamiento reológico diferente a los que reciben labranza anualmente.

Por otro lado, las hipótesis de trabajo fueron: el suelo bajo siembra directa retiene el agua durante más tiempo que el suelo labrado, y el suelo labrado es más susceptible a la compactación a nivel superficial que el suelo bajo siembra directa.

## Resultados y discusión

En los Cuadros 2 y 3 se observan las humedades registradas en el perfil en las dos instancias de muestreo.

El perfil hídrico en diciembre 2011 fue el correspondiente a un período alejado de la última precipitación, en cambio el del 2012 se relevó a los tres días de una precipitación moderada. En el horizonte más profundo evaluado (30-40 cm) los perfiles son estadísticamente iguales para los dos períodos.

El Cuadro 2 muestra además significativas diferencias en el almacenamiento de agua en el perfil en los rangos más superficiales evaluados (0-15, 15-30), correspondien-

**Cuadro 2.** Humedad presente en el perfil hasta los 40 cm, discriminada por rangos de profundidad para el suelo bajo ambos tratamientos. Diciembre 2011.

Tratamiento	0-15 cm	15-30 cm	30-40 cm
Con labranza	8,7 a	10,9 a	21,3 a
Siembra directa	15,2 b	13,8 b	23,5 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

**Cuadro 3.** Humedad presente en el perfil hasta los 40 cm, discriminada por rangos de profundidad para el suelo bajo ambos tratamientos. Diciembre 2012.

Tratamiento	0-15 cm	15-30 cm	30-40 cm
Con labranza	22,4 a	23,6 a	23,4 a
Siembra directa	21,6 a	24,7 a	23,1 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

do al tratamiento de siembra directa los mayores valores de humedad presente. Respecto al tratamiento con labranza previa a la siembra, Hernández *et al.* (2000) encontraron más humedad en siembra directa en periodos de lluvia y menos en periodos de seca. Estos autores hipotetizan la mayor humedad al mayor contenido de materia orgánica del suelo bajo siembra directa de acuerdo con Unger y Cassel (1991) y Hernández (1998).

Del análisis del Cuadro 4 puede concluirse, como era de esperar, que el suelo labrado antes de la siembra presenta una resistencia a la penetración inferior a la del suelo bajo siembra directa hasta los 20 cm de profundidad, siendo este estrato el trabajado con la rastra de casquetes. No se encontraron diferencias en el estrato inferior. Si se comparan estos valores con umbrales que aparecen en la bibliografía, el suelo labrado presentó valores de resistencia a la penetración que podrían limitar el crecimiento radicular ya que Narro Farías (1994) trabajando en suelos de textura franco-limosa concluye que los valores de resistencia a la penetración deberían mantenerse por debajo de 1000 kPa para no afectar el normal desarrollo de las raíces.

En siembra directa no se observa la incidencia del tráfico, ya que parte previo al tráfico (0 pasada) de un valor alto de impedancia que no se modifica (Cuadro 5). En el tratamiento con labranza se aprecia el incremento de la RP con

**Cuadro 4.** Resistencia a la penetración (kPa) para el perfil analizado y discriminado por rango de profundidades evaluado, promedio de todas las repeticiones para ambos tratamientos de suelo. Diciembre 2011.

Tratamiento	Resistencia a la penetración (kPa)		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Convencional	1338,9 a	1962,6 a	2103,7 a
Directa	1775,7 b	2188,0 b	2209,1 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

**Cuadro 5.** Resistencia a la penetración (kPa), luego de los subtratamientos de tráfico. Promedio de todos los intervalos de profundidad para cada tratamiento. Diciembre de 2012.

Nº de pasadas	Con labranza	Siembra directa
0	2720,7 a	2911,1 a
1	2866,4 b	2989,5 a
5	2919,8 bc	2987,5 a
10	3020,5 c	2942,4 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

el aumento de la intensidad de tráfico, pero parte de un valor prístino menor de la reacción vertical del suelo. Por lo tanto en el suelo con labranza las mayores intensidades de tránsito incrementaron la resistencia a la penetración, coincidiendo con Botta *et al.* (2002, 2009). Los incrementos en resistencia a la penetración respecto al testigo en el tratamiento con labranza oscilaron entre 5 y 11 % mientras que en siembra directa no superaron el 3 %.

El suelo labrado (Cuadro 6) evidencia la incidencia del tráfico sólo en el rango superior de profundidad considerado (0-10 cm). Esto es coherente y corrobora lo establecido por las mayores profundidades de huella medidas en este tratamiento (ver Cuadro 9). La compactabilidad diferencial de ambas condiciones de suelo por tanto se limita al nivel superficial, donde las huellas se producen. Cuando se analizan los incrementos en resistencia a la penetración se verifica que las mayores diferencias se registran en el estrato superficial del tratamiento con labranza (del 17 al 34 %).

En siembra directa (Cuadro 7) nuevamente los incrementos no superaron el 3 %.

**Cuadro 6.** Resistencia a la penetración (kPa) para cada subtratamiento para cada rango de profundidad evaluado. Tratamiento con labranza.

Nº de pasadas	0-10	oct-20	20-30
0	2078,8 a	3207,7 a	3266,5 a
1	2423,5 b	3286,6 a	3108,6 a
5	2623,3 c	3229,0 a	3089,6 a
10	2785,4 d	3220,0 a	3289,5 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

**Cuadro 7.** Resistencia a la penetración (kPa) para cada subtratamiento para cada rango de profundidad evaluado. Tratamiento siembra directa.

Nº de pasadas	0-10	oct-20	20-30
0	2623,3 a	3198,2 bc	3234,5 a
1	2705,6 a	3253,0 c	3247,5 a
5	2707,5 a	3120,9 ab	3313,5 a
10	2702,7 a	3019,6a	3290,9 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Test LSD.

Sin tráfico y hasta luego de una pasada el suelo labrado presentó una menor RP en el rango más superficial (0-10 cm). Para las intensidades de tráfico correspondientes a cinco y 10 pasadas no se registraron diferencias significativas de RP en el rango superficial, por lo tanto cinco pasadas fueron suficientes para igualar los valores de RP en superficie de ambos tratamientos del suelo (Cuadro 8).

Antes del tráfico en el rango intermedio (10-20 cm) no hubo diferencias de RP entre tratamientos y en el rango más profundo (20-30 cm) el comportamiento se invierte dado que el suelo labrado mostró mayores valores de RP. Esta profundidad es compatible con lo frecuentemente citado respecto a un «piso de arado», es decir la zona donde el suelo colapsa como resultado de la compactación transmitida por los implementos agrícolas y la lixiviación de partículas más pequeñas del suelo que se acumulan allí.

Las distintas IT no mostraron diferencias en el valor de RP relevado en los dos tratamientos en el rango de mayor profundidad (20-30 cm). Por lo tanto una pasada ya fue suficiente para igualar los valores de reacción mecánica del suelo.

Para ambos tratamientos 10 pasadas incrementaron significativamente la profundidad de huella con respecto a una pasada. El tratamiento convencional comprime mucho en la primera pasada, mientras que la siembra directa necesita de mayor intensidad de tránsito para modificar su huella, en forma significativa en coincidencia con Botta *et al.* (2009) (Cuadro 9).

En el tratamiento convencional el incremento de la profundidad de huella por efecto del tránsito fue algo menos del 20 %, mientras que en siembra directa ese incremento superó el 80 %. No obstante, el suelo bajo siembra directa acusó una mayor reacción al tráfico, ya que luego de

**Cuadro 8.** Resistencia a la penetración (kPa) comparación entre tratamientos (con labranza y siembra directa), para cada una de las intensidades de tráfico (subtratamientos) en los diferentes intervalos de profundidad evaluados.

<b>0 PASADAS (Condición inicial del suelo previa al tráfico)</b>			
	<b>0-10 cm</b>	<b>10-20 cm</b>	<b>20-30 cm</b>
CL	2078,8a	3207,7a	3266,5b
SD	2623,3b	3198,2a	2850,9a
<b>1 PASADA</b>			
0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	
CL	2423,5a	3286,6a	3108,6a
SD	2705,6b	3253,1a	2898,8a
<b>5 PASADAS</b>			
0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	
CL	2623,3a	3229,0b	3089,6a
SD	2707,5a	3120,9a	3313,5a
<b>10 PASADAS</b>			
0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	
CL	2785,4a	3220,0b	3289,5a
SD	2702,7a	3019,6a	3290,9a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

**Cuadro 9.** Profundidad de huella media (en mm) para cada subtratamiento (intensidades de tráfico), para ambos tratamientos.

<b>Pasadas</b>	<b>Con labranza</b>	<b>Siembra directa</b>
1	33 a	9 a
5	36 a	17 b
10	40 b	16 b

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

10 pasadas las huellas remanentes tenían una profundidad algo menor a la mitad de las que se midieron sobre el suelo labrado. Es notorio que el tráfico sobre suelo labrado provoca el 83 % del hundimiento final en la primera pasada. El tráfico posterior y hasta las diez pasadas provoca sólo el 17 % del hundimiento restante. En definitiva, la no labranza evidencia un suelo con mayor capacidad portante, pero sensible a la intensidad del tráfico, aún más que el suelo labrado.

Según Botta *et al.* (2009) el principal indicador visual de la compactación superficial es la profundidad de huella, la cual está ligada a la condición inicial del sustrato. Davies *et al.* (1973) lo consideran el mejor indicador de la compactación después del tráfico (Cuadro 10).

Independientemente de la intensidad de tráfico la siembra directa siempre tuvo una menor profundidad de huella (ver Cuadros 11, 12 y 13).

No hay diferencias entre tratamientos para las bajas intensidades de tráfico (0 y 1 pasada). En las intensidades

**Cuadro 10.** Profundidad de huella media (en mm). Análisis entre tratamientos (con labranza y siembra directa) dentro de cada subtratamiento.

<b>Tratamiento</b>	<b>1 pasada</b>	<b>5 pasadas</b>	<b>10 pasadas</b>
Con labranza	33 b	36 b	40 b
Siembra directa	9 a	17 a	16 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

**Cuadro 11.** Densidad aparente ( $Mg/m^3$ ) para los dos rangos de profundidad, evaluados para los dos tratamientos de suelo y las cuatro intensidades de tráfico ensayadas.

	Testigo	
	0-5	5-10
Con labranza	1,07 a	1,17 a
Siembra directa	1,15 a	1,22 a
<b>1 pasada</b>		
	<b>0-5</b>	<b>5-10</b>
Con labranza	1,19 a	1,28 a
Siembra directa	1,23 a	1,29 a
<b>5 pasadas</b>		
	<b>0-5</b>	<b>5-10</b>
Con labranza	1,27 b	1,25 a
Siembra directa	1,23 a	1,28 a
<b>10 pasadas</b>		
	<b>0-5</b>	<b>5-10</b>
Con labranza	1,30 b	1,18 a
Siembra directa	1,17 a	1,24 a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

**Cuadro 12.** Densidad aparente ( $Mg/m^3$ ) del suelo bajo Tratamiento con labranza, para los cuatro subtratamientos (0, 1, 5 y 10 pasadas) para los dos rangos de profundidad evaluados.

Con labranza	0-5 cm	5-10 cm
0 pasada	1,07a	1,18a
1 pasada	1,19b	1,28a
5 pasadas	1,28bc	1,25a
10 pasadas	1,31c	1,18a

Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

mayores se observa una mayor densificación del suelo labrado en el estrato superficial, en coincidencia con Hernández *et al.* (2000). En el suelo labrado se observan diferencias de los valores de densidad alcanzados por las distintas intensidades de tráfico, cosa que no ocurre en siembra directa. Estos resultados coinciden con los encontrados en resistencia a la penetración en el estrato superior (ver Cuadros 6 y 7).

**Cuadro 13.** Densidad aparente ( $Mg/m^3$ ) del suelo bajo tratamiento siembra directa, para los cuatro subtratamientos (0, 1, 5 y 10 pasadas) y para los dos rangos de profundidad evaluados.

Siembra directa	0-5 cm	5-10 cm
0 pasada	1,16a	1,22a
1 pasada	1,23a	1,29a
5 pasadas	1,23a	1,28a
10 pasadas	1,17a	1,24a

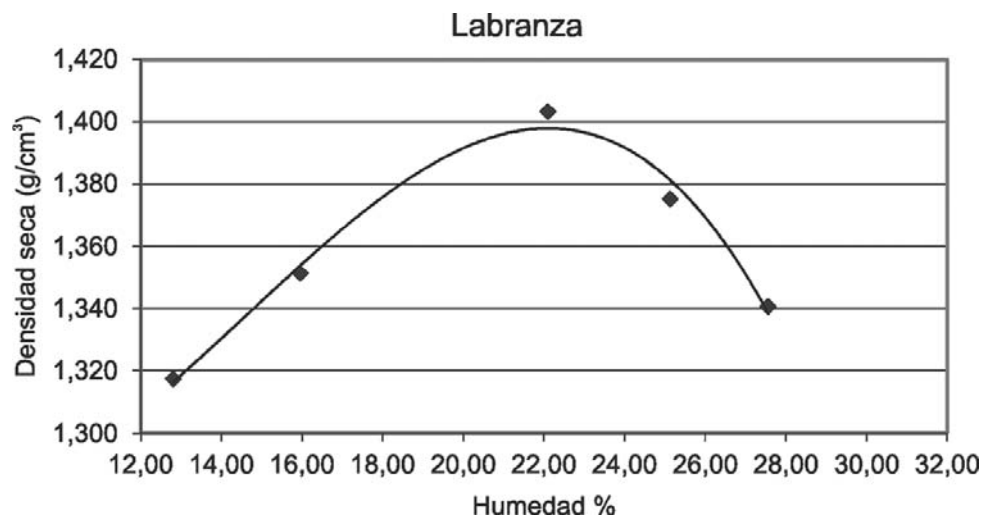
Letras diferentes según columnas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ .

En siembra directa hubo mayor resistencia a la penetración y menor densidad aparente. Podría ser que el manejo convencional tuviese menor resistencia al corte por una menor unión entre las partículas individuales por haber sido labrado previamente y esto generase una menor resistencia a la penetración.

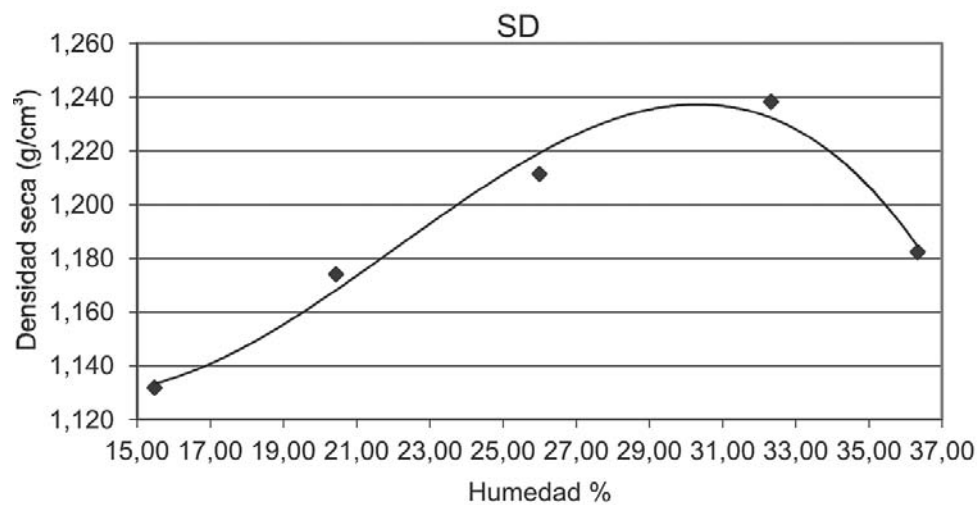
La humedad de máxima compactación Proctor fue mayor para siembra directa posiblemente debido al mayor contenido de carbono orgánico total y carbono particulado y mayor estabilidad estructural (Cuadro 14), pero el valor de densidad aparente máximo alcanzado fue menor (Figura 1 y Figura 2). Estos resultados coinciden con los encontrados por Díaz-Zorita y Álvarez (2010) y Krueger (1996), quienes también hallaron mayor porcentaje de materia orgánica, menor densidad y mayor diámetro ponderado medio de partículas en los suelos con labranza cero, en concordancia con Hernández *et al.* (2000), quienes concluyeron acerca de la mayor estabilidad estructural de los agregados superficiales de suelos bajo siembra directa. Ekwue y Stone (1995) también encontraron en suelos con alto contenido de materia orgánica un incremento de la humedad óptima y una disminución de la densidad máxima. Según Quiroga *et al.* (1999) la pendiente de la parte ascendente de la curva de Proctor expresa la susceptibilidad a la compactación, con lo cual los suelos con labranza serían más sensibles a ser compactados que los del suelos bajo siembra directa. Se observa que en siembra directa, si bien los incrementos entre subtratamientos de tráfico no arrojaron diferencias, los valores finales de densidad aparente alcanzados superan en todos los casos el 93 % de la máxima densidad Proctor para ese suelo, mientras que en el suelo con labranza se parte de una situación alejada de la máxima densidad Proctor y se necesitan

**Cuadro 14.** Carbono orgánico total, carbono particulado (%) y estabilidad estructural.

	Con labranza	Clausura sin tráfico	Siembra directa
Carbono orgánico total %	2,89	3,62	3,83
Carbono particulado %	0,08	0,11	0,21
Estabilidad estructural			
Diámetro medio ponderado I (mm) método 1	1,03	2,62	2,54
Diámetro medio ponderado II (mm) método 2	2,48	2,92	2,98
Diámetro medio ponderado III (mm) método 3	2,48	3,21	3,25
Promedio DMP (mm) por los tres métodos	1,99	2,92	2,92



**Figura 1.** Curva proctor para el tratamiento con labranza.



**Figura 2.** Curva Proctor para el tratamiento siembra directa.



10 pasadas para acercarse al mismo porcentaje de densidad máxima Proctor.

Al final del ciclo de cultivo de moha se evaluó el rendimiento no encontrándose diferencias entre tratamientos (siembra directa y con labranza).

### Consideraciones finales

A la luz de los resultados obtenidos y analizados no existen datos suficientes como para falsar las dos hipótesis de trabajo.

Por otro lado entendemos que existe respaldo suficiente de los datos obtenidos como para considerar validadas ambas hipótesis de trabajo.

### Conclusiones

El suelo bajo siembra directa fue capaz de retener el agua almacenada durante un periodo de tiempo más prolongado.

Los suelos sometidos a labranza fueron más compactables a nivel superficial que los que se mantuvieron en siembra directa.

La menor impedancia de los suelos labrados incrementó la profundidad de la huella de los equipos agrícolas.

Los cambios en las propiedades físicas mesuradas fueron más evidentes en el suelo labrado.

### Bibliografía

- ASAE. 1992. Standards. St. Joseph : ASAE. 781p.
- Begenisic F. 2004. Recopilación de la técnicas de laboratorio vigentes y reconocidas por el SAMLA, en proceso de revisión y actualización en el marco del convenio IRAM-SAGPyA : Resolución Nro. 478/98 y 238/03 [Cd- Rom].
- Botta GF, Tolon-Becerra A, Tourn M, Lastra-Bravo X, Rivero D. 2012. Agricultural traffic : Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. *Soil & Tillage Research*, 120: 92 - 98.
- Botta GF, Tolon-Becerra A, Lastra-Bravo X, Tourn M. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max*L.) yields in Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research*, 110: 167 - 174.
- Botta GF, Tolon Becerra A, Bellora F, Tourn M. 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 103: 381 - 386
- 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. *Journal of Terramechanics*, 39 (1): 47 - 54.
- Canarache A, Colibas I, Colibas M, Horobeanu I, Patru V, Simota H, Trandafirescu T. 1984. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. *Soil & Tillage Research*, 4(2): 199 - 213.
- Daddow RL, Warrington GE. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Fort Collins : Watershed Systems Development Group, USDA Forest Service. 162p.
- Davies D, Finney J, Richardson S. 1973. Relative effects of tractors weight and wheel slip in causing soil compaction. *Journal of Soil Science*, 24: 399 - 409.
- Diaz-Zorita M, Álvarez C. 2010 Evaluación de compatibilidad «in situ» con muestras disturbadas en diferentes sistemas de producción : Memoria Técnica 2005-2006. General Villegas : EE INTA.
- Ekwue E, Stone RJ. 1995. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *Transactions of the ASAE*, 38(2): 357 - 365.
- Hamza MA, Anderson WK. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121 - 145.
- Hernandez RM. 1998. Transformaciones del nitrógeno y carbono y su distribución en agregados de un suelo tropical bajo dos tipos de labranza [Tesis Doctoral]. Caracas : Universidad Central. Facultad de Ciencias. 229p.
- Hernández RM, Florentino A, López-Hernández D. 2000. Efectos de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de Ultisoles en el estado Guarico- Venezuela. *Agronomía Tropical*, 50(1): 9 - 29.
- Jorajuria Collazo D. 2005. Compactación del suelo agrícola bajo tráfico vehicular : Una revisión. En: Reología del suelo agrícola bajo tráfico. La Plata: EDULP. pp. 39 - 55.
- Krueger HR. 1996 Compactación del Haplustoles en el sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del suelo*, 14: 104 - 106.
- Narro Fariás E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Buenos Aires : Trillas. 181p.
- Pabin J, Lipiec J, Wodek S, Biskupski A, Kaus A. 1998. Critical soil bulk density and strength for pea seeding root growth as related to other soil factors. *Soil & Tillage Research*, 46: 203 - 209.
- Proctor RR. 1933. Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News-Record*, 111: 245 - 248.
- Raghavan GSV, McKyes E, Chassé M, Mérineau, F. 1976. Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil. *Canadian Journal of Plant Science*, (56): 505-509.
- Quiroga AR, Busquiazzo DE, Peinemann N 1999. Soil compaction in related to management practices in the semi-arid argentine pampas. *Soil & Tillage Research*, 52(1-2): 21 - 28.
- Sánchez Girón-Renedo V. 1996. Dinámica y Mecánica de Suelos. Madrid : Agrícola Española. 426p.
- Stenitzer E. 1988. A Numerical Model for Simulation of Soil Moisture Regimes and of Crop Yields. Petzenkirchen : Institute for Land Water Management Research. (Mitteilung ; N°32).
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. Washington : USDA. 332p.
- Threadgill ED. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE*, 25(4): 859 - 963.
- Tolon-Becerra A, Tourn M, Botta GF, Lastra-Bravo X. 2011. Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays*L.) seedling emergence and yields in the Eastern Argentinean Pampas region. *Soil and Tillage Research*, 117: 184-190.
- Unger PW, Cassel DK. 1991. Tillage implements disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation: a literature review. *Soil and Tillage Research*, 19: 363 - 382.