

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

TITULO
LOS NEUMÁTICOS AGRÍCOLAS COMO CAUSANTES DE LA
COMPACTACIÓN DEL SUELO

AUTOR:
FEDERICO PELIZZARI

DIRECTOR:
DR. GUIDO FERNANDO BOTTA

CARRERA: INGENIERO AGRÓNOMO
FACULTAD DE AGRONOMÍA-UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA
PAMPA
AÑO 2015

Contenido

Resumen	3
Introducción y Antecedentes	5
Objetivos	10
Hipótesis de trabajo	10
Materiales y métodos	11
Resultados y discusión	18
Consideraciones finales y conclusiones	26
Conclusiones	27
Bibliografía.....	28

Resumen

En las últimas décadas se han producido cambios significativos en las técnicas de producción agrícola de los países industrializados. La mejora de la productividad del trabajo de campo se vio favorecida por los continuos incrementos en la potencia y peso de la maquinaria utilizada. Hoy en día, por ejemplo, los equipos mas pesado de uso agrícola cargados pueden pesar más de 170 kN. Ruedas con mucha carga y altas presiones de inflado, cuando se utiliza en la agricultura, pueden provocar daños por compactación severa en las tierras de cultivo. En Europa se recomienda un rango de presión de 40-50 kPa para evitar compactación perjudicial del suelo en condiciones de alta humedad. En nuestro medio, las presiones de inflado de los neumáticos, lo que representa la operación de campo típica, y aplicaciones de transporte por carretera están entre 100-150 kPa y 150-200 kPa, respectivamente. La compactación del suelo se determina a partir de resistencia a la penetración y la profundidad de huella. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el efecto sobre la compactación superficial en un suelo agrícola producido por la presión en el área de contacto rueda/suelo de distintos rodados de uso común en la producciones agrícolas de la Argentina. El tráfico fue realizado con una sola pasada de las maquinarias con sus respectivos neumáticos que tuvieron las siguientes medidas: 23.1 R 30, 23.1 – 30, 18.4 – 38 y 18.4 R 38. El ensayo se realizó sobre un suelo Argiudol Típico. Los parámetros vinculados a la compactación fueron: 1) Índice de cono (IC) de 0 a 450 mm, 2) la humedad del suelo al momento del tráfico (H) y 3) la profundidad de huella (PFH). Las conclusiones obtenidas fueron: a) Los neumáticos radiales como los convencionales ensayados produjeron compactación subsuperficial del suelo (debajo de los 200 mm), b) la profundidad de huella tuvo una reilación directa con la presión en el área de contacto rueda/suelo y c) Pesos < 26.6 kN produjeron compactación subsuperficial, luego de una sola pasada de maquinaria.

Palabras clave: huellas – cultivo – presión rueda/suelo

Introducción y Antecedentes

Varios estudios han demostrado que la presión, en el área de contacto rueda suelo, generalmente aumenta con la presión de inflado (por ejemplo, Rivero 2012 y Botta et al, 2015). Sin embargo, en la mayoría de los estudios de la presión de inflado y la carga sobre la rueda, las mismas, tienden a confundir, en este punto, a quien le cabe la mayor responsabilidad como lo destacaron Arvidsson y Keller (2007).

Un suelo agrícola se deforma bajo el tránsito de una rueda debido a la debilidad del mismo para soportarla. El valor total de la deformación del suelo puede estar relacionado a la compactación del mismo, la cual debe reducirse al mínimo en el caso de los tractores agrícolas y maquinaria. Esto se puede lograr mediante el uso de neumáticos anchos o ruedas duales, los cuales reducen la presión en el área de contacto rueda/suelo; o bien, mediante la reducción de la masa de los vehículos agrícolas (Rivero, 2012).

Desde el punto de vista del suelo, este se compacta cuando la proporción del volumen total de poros ocupados por el aire en relación al suelo, es inadecuado para permitir el máximo crecimiento de los cultivos (Boletín 1881 Universidad de California, 1977).

Uno de los signos visibles más importantes que indican que el suelo está siendo compactado por el tráfico de vehículos es la excesiva deformación del mismo por la aparición de una huella. La huella ocurre a menudo cuando al momento de producirse el tráfico, el suelo se encuentra en una condición de alta compactabilidad (labrado, cama de siembra, etc.). Sin embargo, debido al alto peso de la maquinaria, la huella se produce también en suelos agrícola que no han sido laboreados por años (Lanatti, 2012).

Por ejemplo, Botta et al., (2008), en un extenso trabajo en donde compararon el desempeño de neumáticos de construcción radial y convencional, con distintas cargas o pesos sobre ellos (entre 19.4 y 30 kN por rueda) en dos condiciones de suelos, obtuvieron como resultado, que,

luego de una pasada de neumático en el suelo bajo 9 años de realizar la técnica siembra directa, se producía deformación del mismo y, por lo tanto, una huella. En efecto, los valores de profundidad de huellas fueron de 40 y 133 mm para los neumáticos convencionales y 25 y 107 mm para los radiales. Esto muestra claramente que sobre suelos “duros” y, debidos al alto peso, se produce hundimiento y formación de huella, principales causas junto al peso del equipo de la compactación del suelo.

Para entender mejor, el modelo y evitar la compactación del suelo, tenemos que ser capaces de distinguir el efecto de las tensiones en la interfaz rueda/suelo generadas por la presión de inflado del neumático, la carga sobre la rueda, el tipo de neumático y las condiciones del suelo. Debido a problemas significativos con la medición de tensiones mecánicas en suelo no perturbado, muchos modelos de compactación del suelo, se basan suposiciones inciertas y reglas simples para distribución de tensiones en la zona de contacto con el suelo del neumático, así como su propagación en el perfil del suelo (Keller 2005).

En un estudio anterior, probando dos neumáticos de estructura radial con una carga constante sobre la rueda, pero con las presiones de inflado que se encontraban por debajo, igual y por encima de la presión recomendada por los fabricantes de neumáticos (Schjønning et al., 2008) encontraron una mayor compactación superficial en las ruedas infladas con las mayores presiones de inflado.

En cuanto a la presión en el área de contacto rueda/suelo Victor y Cartwright (1993) discuten la misma sobre la compactación y la performance de una rueda agrícola. Estos autores concluyeron que la baja presión sobre el suelo ejercida por neumáticos anchos produce una reducción de la compactación superficial, una mejora en la tracción y un menor hundimiento del vehículo.

Siguiendo con la presión en el área de contacto rueda suelo Botta et al., (2009) encontraron que, para 2 tractores de 58 y 42 kN de peso total, luego de 5 pasadas sobre la misma huella los valores de compactación superficial no respondieron a la presión en el área de contacto rueda suelo, pero sí fueron afectados por el peso total de los mismos.

En condiciones de operación de la máquina sobre rastrojos, pasturas o suelos bajo siembra directa, la compactación del suelo puede reducirse disminuyendo la presión de inflado de la rueda y carga sobre la misma mediante el aumento de tamaño de los neumáticos, y mediante el uso de neumáticos radiales en vez de neumáticos de estructura diagonal (Botta et al, 2004). También sobre suelo en labranza convencional, la profundidad de la huella y la compactación superficial del suelo disminuyen con menor presión de inflado. Es muy importante minimizar el hundimiento ruedas mediante la reducción de la presión de inflado y la elección de un dibujo de la banda de rodadura no agresivo (Botta et al. 2002).

El problema de la compactación superficial del suelo es muy importante, el aumento del misma, cumple un rol principal en el descenso del rendimiento de los cultivos, ya que los aumentos de la resistencia a la penetración, en los primeros 20 cm de profundidad son señalados, cuando exceden valores de 2 Mpa de resistencia a la penetración, como críticos para la proliferación radicular (Botta et. al., 2012). Es en este sentido, que a pesar de la simpleza con que se toma el dato, uno de los parámetros más utilizados para diagnosticar la compactación del suelo es el índice de cono.

Los parámetros físicos más utilizados para determinar la compactación del suelo son: la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la profundidad de huella, siendo los que más directamente se relacionan con la limitación del crecimiento radical y con una baja aireación (Cassell y Nelson 1982). Blancher et al. (1978) sugieren que es más apropiado el uso del penetrómetro que la densidad aparente para determinar el crecimiento radical

puntualizando valores mayores o iguales a 2 Mpa para limitar el desarrollo radical. Threadgill (1982) indica que valores por encima de 1,5 Mpa disminuyen el desarrollo radical mientras que desde 2,1 a 2,5 Mpa pueden detener su crecimiento. Narro Farías (1994) asegura que valores superiores a 1 Mpa ya son suficientes para producir disminución de los rendimientos de los cultivos. En cuanto a la densidad aparente Voorhes (1986) sostiene que valores mayores a 1,5 Mg/m³ producen reducción del crecimiento radical.

Según Neme et al. (2000) citado por Rossi (2012), la impedancia mecánica o índice de cono es un parámetro apropiado para inferir condiciones mecánicas del suelo registradas a partir de distintos tratamientos de labranza. Empero, este parámetro, depende estrechamente del contenido de humedad del suelo durante las determinaciones.

El problema no termina con la compactación superficial, el problema se agudiza cuando pasa a la zona por debajo del horizonte arable, es decir la zona subsuperficial. La compactación subsuperficial es causada por el peso por eje, a menos que la presión sobre el suelo sea extremadamente baja (Smith y Dickson, 1990; Håkansson 1994; Botta 1997). Håkansson y Reeder (1994) establecieron que a mayor peso, mayor es la profundidad a la que es esperable encontrar la compactación: hasta una profundidad de 0,3 m para un peso por eje de 4 Mg, 0,4 m para 6 Mg, 0,5 m para 10 Mg y 0,6 m para 15 o más Mg (conduciendo un vehículo sobre suelo arable, húmedo). También consideran que la compactación subsuperficial persiste por décadas, siendo presumiblemente más persistente en suelos de texturas arenosas, no expandibles o en regiones donde no se congelan y que para dichas condiciones, la compactación en las capas profundas del subsuelo puede considerarse permanente

En este punto, es importante recordar que Botta et al., (2002) definen, para la Argentina, al horizonte superficial (150 mm) como el horizonte que se remueve todos los años por las labores

de labranza, siendo el horizonte subsuperficial el que se encuentra inmediatamente por debajo del anterior.

Finalmente, ante una situación productiva como la nuestra, con un horizonte superficial mucho más estrecho que en otras regiones agrícolas del mundo (Botta et al. 2002) es necesario conocer la evolución y alteración de los parámetros índice de cono, profundidad de huella, la cohesión y la humedad del suelo, cuando este es traficado con neumáticos con diferentes presiones de inflado, banda de rodadura, tipo constructivo y presión de contacto rueda/suelo.

Objetivos

El objetivo del trabajo será presentar los resultados de la investigación sobre la formación de huella e índice de cono producidos por neumáticos radiales y convencionales sobre un suelo arcilloso en tres diferentes condiciones mecánicas.

Hipótesis de trabajo

La hipótesis del trabajo que se pretende verificar o refutar es la siguiente: la profundidad de huella producida por neumáticos radiales y convencionales tiene relación directa con la compactación superficial del suelo.

Materiales y métodos

El sitio

El experimento se llevó a cabo en un establecimiento agrícola de Luján, partido de Luján, provincia de Buenos Aires, sobre un Argiudol típico, fase inclinada fino, illítico, térmica (Soil Conservation Service 1994), perteneciente a la serie Solís, y cuyas características generales son las que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Datos del perfil del suelo sobre el que se realizará el ensayo.

HORIZONTE	Ap	A12	B1	B21t	B22t	B23t	B3	Cca
Nivel de profundidad (cm)	0 – 15	16 – 22	23 – 35	35 – 60	65 – 80	90 - 110	120-150	160 - 220
Carbono Organico (%)	1.74	1.35	0.93	0.63	0.50	0.31	0.22	0.14
Nitrogeno total (%)	0.24	0.14	0.10	0.085	0.075	0.058	0.042	-
Clay (<2 μ)	21.2	25.5	24.9	33.2	47.5	33.0	23.0	15.8
Silt (2-20 μ)	32.3	34.7	29.8	29.3	20.8	31.2	32.9	28.7
Silt (2-50 μ)	75.6	70.8	67.2	61.3	50.0	63.0	72.7	79.9
Arena Fina (100-250 μ)	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Humedad Equivalente (%)	26.6	28.5	26.8	28.7	35.2	31.9	27.0	23.5
Ph	5.4	5.3	5.5	5.5	5.8	6.0	6.0	7.5
pH en H ₂ O (1: 2.5)	5.8	5.8	6.0	6.2	6.5	6.4	6.4	7.9
Cationes de cambio (m.e. 100g ⁻¹)								
Ca ⁺⁺	11.4	12.7	12.0	13.8	18.3	17.2	16.5	-
Mg ⁺⁺	2.9	2.5	3.1	4.5	6.5	6.4	3.8	-
Na ⁺	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5
K ⁺	1.4	1.0	0.9	1.3	2.3	2.4	2.3	2.4

El lote de ensayo tiene por historia cultivos agrícolas desde hace 22 años, trabajados bajo siembra directa y con rotaciones definidas de: trigo-soja de segunda y maíz / soja de primera.



Figura 1: Sitio del ensayo, 22 años bajo siembra directa

Los Tratamientos de tráfico y parámetros a medir

El ensayo se realizó sobre 20 parcelas de 100 m x 70 m (7000 m².) con 4 repeticiones para cada tratamiento, las parcelas fueron separadas a 20 metros una de otra como zonas de amortiguamiento o buffer y, así, evitar interacciones. De los 5 tratamientos, uno de ellos fue utilizado como testigo sin tráfico (Figura 2). La modificación de cada tratamiento estuvo determinada por el neumático a utilizar y el peso de la maquina. Se hizo circular cada maquina sobre el suelo; cada ensayo con ruedas diferentes como se puede ver en la figura 2.

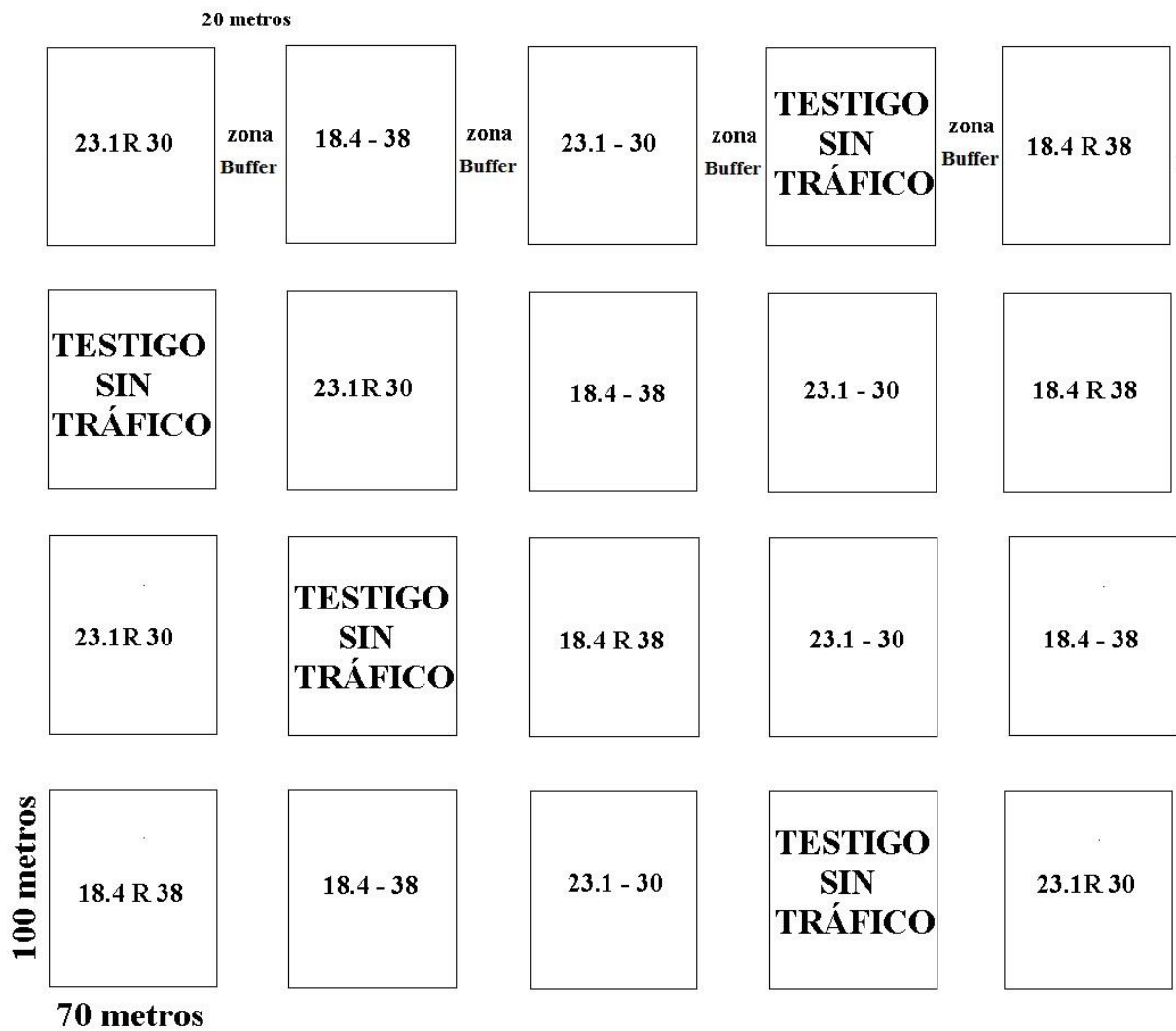


Figura 2: Disposición de las parcelas de ensayo, detallando los neumáticos a estudiar.

La presión en el área de contacto rueda/suelo, se obtuvo a partir de la siguiente relación: peso sobre el neumático/área de contacto del neumático.

El área de contacto se obtiene del producto entre el ancho del neumático y el largo de pisada medido a campo como lo muestra la figura 3 según el método de Botta et. al., (2002).



Figura 3: Medición del largo de pisada del neumático.

El contenido de agua del suelo (w/w) y el índice de cono (IC) se midieron el mismo día del tráfico.

Para determinar el contenido de agua del suelo (CAS) se utilizó el método tradicional por medio del secado de cada muestra de suelo en horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$. (Figura 4).



Figura 4: Horno para la medición de la humedad gravimétrica del suelo.

Fuente: ELE Internacional Ltda.

La muestra del suelo para determinar el contenido de agua del suelo (Humedad de suelo) se midió mediante el método de cilindro. Donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, o sea:

$$w = (W_w / W_s) * 100 \quad (\%)$$

donde:

w = contenido de humedad expresado en %

W_w = peso del agua existente en la masa de suelo

W_s = peso de las partículas sólidas.

Para esto, en cada parcela del ensayo se determinó la humedad gravimétrica cada 150 mm de profundidad (0 – 150, 150 – 300 y 300 – 450 mm) tomando 20 repeticiones por intervalo de profundidad.



Figura 5: Medición del I.C. en la huella del neumático.

El índice de cono se determinó con un penetrometro Scout 900 con grabación de datos (Figura 5). El cono cumple con las medidas según el estándar de ASAE S 313 (1992). Cada dato representa el promedio de 25 muestras tomadas de cada parcela en el rango de profundidad de 0 a 450 mm a intervalos de profundidad de 25 mm.

Los datos recogidos de IC antes del tráfico (parcela control o testigo) proporcionaron una clara indicación de la condición inicial del suelo en cada tratamiento (Propuesta de Rossi 2013). Los efectos de los tratamientos de tráfico en el suelo se midieron en las líneas centrales de la huellas de los neumáticos debido a los efectos de compresión tienden a concentrarse en este punto (Söhne, 1958).

La profundidad de huella fue medida, como lo muestra la figura 6, con vara rígida y regla graduada, según propuesta de Botta et al., (2006)



Figura 6: Medición de la profundidad de huella.

Como variable explicativa se realizó la curva de compactibilidad características Proctor (1933) entre 0 y 250 mm de profundidad.

Todos los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), y las medias fueron analizadas por la prueba de rangos múltiples de Duncan utilizando el programa Statgraf 7.1 (Botta et al., 2010).

Resultados y discusión

Contenido de agua del suelo, condiciones iniciales del suelo del ensayo

El contenido de agua del suelo (w/w), el día del ensayo del presente estudio fue del 18.0 % del peso seco desde los 0 hasta los 150 mm de profundidad de 16.7 % de 150 a 300 mm.

Tabla 1: Contenido de agua del suelo al momento del ensayo (w/w)

Profundidad (mm)	Ws	Ww	Humedad (%)
0 – 150	969.0	175.0	18.0 a
150 – 300	985.0	185.0	16.7 a
300 – 450	985.0	185.0	16.7 a

En general, el contenido de agua en el suelo no difirió significativamente en el estrato de profundidad considerado (Tabla 1). Por lo tanto, las diferencias que se encontraron en índice de cono se pueden considerar también como un indicador efectivo del grado de compactación del suelo durante el tratamiento.

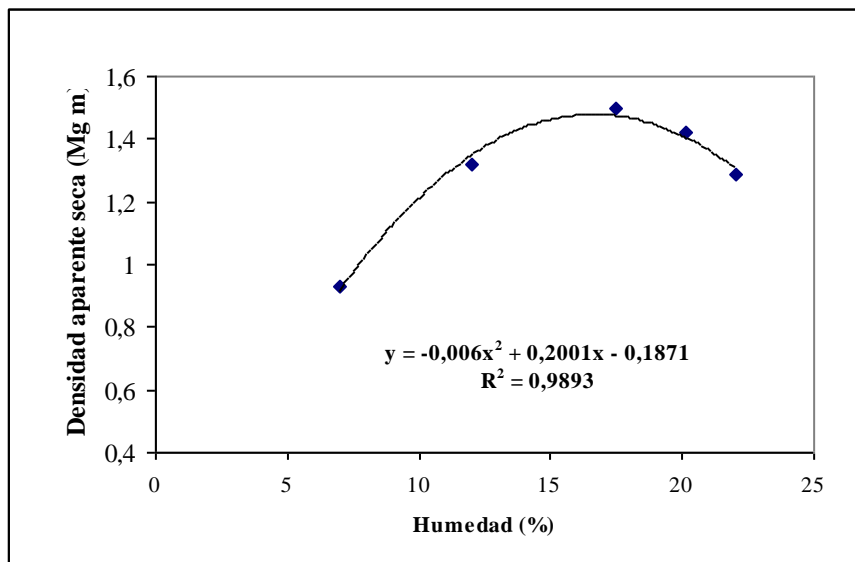


Figura 7: Curva de compactabilidad característica Proctor para el intervalo de 0 a 250 mm de profundidad.

En la figura 7 se puede ver la curva de compactibilidad característica Proctor realizada, sobre el suelo del ensayo, para el intervalo de 0 a 250 mm de profundidad, la curva muestra que, en el suelo bajo estudio, se producirá la máxima compactación prácticamente a la misma humedad edáfica en la que se realizó el ensayo. Esto es muy importante al momento de analizar resultados de compactación por tráfico ya que, será el peor panorama de trabajo, para realizar tareas sobre el suelo agrícola, sin embargo se está en valores normales de trabajo para el suelo agrícola.

Área de contacto y presión en el área de contacto rueda/suelo

En las Tabla 2 se pueden ver los valores pesos sobre las ruedas y la presión de inflado de cada una de las mismas. Es importante indicar que la presión de inflado de todos los neumáticos utilizados estaba comprendida dentro de los intervalos de presiones recomendados por el manual del fabricante, en este caso, Firestone Agricultural Tyres (2013).

Tabla 2: Rodados, peso por rueda y presión de inflado

Rodados	Pesos sobre los rodados (kN)	Presión de inflado (kPa)
18.4 – 38	25.6	142
18.4 R 38	25.6	100
23.1 – 30	26.6	100
23.1 R 30	26.6	110

La Tabla 3 muestra los valores de área de contacto obtenidos por el método de Botta et. al., (2002), y de presión sobre el suelo.

La mayor área de contacto medida sobre el suelo correspondió al neumático 23.1 R 30 y esto, redundó, en una menor presión en el área de contacto rueda/suelo, coincidiendo con Victor y Cartwright (1993) y Rivero 2008. Esta situación se refleja, claramente, por el desempeño de los neumáticos respecto a la profundidad de huella (ver tabla 4). En ambos tamaños ensayados, es importante destacar que, los neumáticos de construcción radial (18.4 R 38 y 23.1 R 30),

produjeron la menor presión en área de contacto rueda/suelo y la mayor área de contacto (sombreado en la Tabla 3).

Tabla 3: Rodados, peso, área de contacto y presión sobre el suelo

Rodados	Pesos sobre los rodados (kN)	Áreas de contacto (m²)	Presión de inflado (kPa)	Presión sobre el suelo (kPa)
18.4 – 38	25.6	0.33	142	77.5
18.4 R 38	25.6	0.56	100	45.7
23.1 – 30	26.6	0.50	100	53.2
23.1 R 30	26.6	0.72	110	36.9

También, luego de observar, en la tabla 3, los valores de presión de inflado, se puede ver que el factor determinante sobre los valores presión en el área de contacto rueda/suelo, fue el tipo de neumático (radial o convencional) y no la presión de inflado.

Refleja lo anterior que los neumáticos 23.1 – 30 y el 18.4 R 38 contaron con la misma presión de inflado pero, la presión sobre el suelo fue de 0.50 y 0.56 kPa respectivamente.

En cuanto al peso, se puede ver en la tabla 3 que los neumáticos de 23.1 – 30 y 23.1 R 30 son los que soportan el mayor peso y, por el contrario, es el neumático que ejerce la menor presión sobre el suelo esto, indudablemente, se debe a la mayor área de contacto de los mismos.

Lo discutido, hasta aquí, nos indica que es fundamental al de “engomar” una maquinaria agrícola, tener en cuenta el tipo constructivo del neumático, además, de las transferencias de peso antero-posterior dinámica que sucede, según Botta et al., (2012) al moverse el vehículo sobre suelo agrícola.

En la tabla 3, se puede ver que los neumáticos ensayados producen presiones sobre el suelo que son menores a los 80 kPa citados por Raper (2005) como posible causante de pérdidas de rendimientos de los cultivos debido a la compactación superficial del suelo. Se debe destacar que Botta et al., (2002) definen, para la Argentina, al horizonte superficial (entre 150 a 200 mm de profundidad) como el horizonte que se remueve todos los años por las labores de labranza,

siendo el horizonte subsuperficial el que se encuentra inmediatamente por debajo del anterior. Finalmente, según lo expresado en el párrafo anterior, los neumáticos radiales 18.4 R 30 y 23.1 R 30 resultaron ser, por su baja presión en el área de contacto rueda/suelo (menor a las ensayadas convencionales), la combinación más armónica de peso y rodado para realizar labores en forma sostenible causando una compactación aceptable para no afectar el normal desarrollo de las raíces de los cultivos extensivos.

Profundidad de huella

En cuanto al parámetro profundidad de huella de los neumáticos, los radiales 23.1 R30 y 18.4 R 38 resultaron ser la combinación más armónica, respecto al neumático convencionales 18.4 – 38 y 23.1 – 30 ya que produjeron menor profundidad de huella. En tal sentido la profundidad de huella respondió directamente a la presión en el área de contacto rueda/suelo (Tabla 4).

Tabla 4 Valores de profundidad de huella de la maquina (PHM) para todas los neumáticos ensayados

Tratamientos	Profundidad de Huella (mm)
18.4 R 38	12.2 b
18.4 – 38	25.2 d
23.1 – 30	17.2 c
23.1 R 30	10.5 a

Letras distintas en sentido horizontal denotan diferencias significativas ($P < 0,01$ Test de Duncan).

De los resultados del análisis de profundidad de huella se desprende que los neumáticos de tracción de construcción convencional 18.4 – 38 y 23.1 – 30 fueron las mayores, y

estadísticamente diferente ($P < 0.01$) de los otros dos neumáticos. Esto, quizás, se debió al tipo constructivo.

Índice de Cono

Los resultados de índice de con (IC), luego del tráfico de cada tratamiento, para todo el perfil bajo estudio (0 a 450 mm de profundidad) se muestran en la tabla 5. Los mismos respondieron a la presión en el área de contacto rueda/suelo.

En la tabla 5 se puede ver que a los 150 mm se superó el valor de 1500 kPa, mencionado por Botta et al., (2004), como el valor crítico como para afectar la emergencia de cultivos. Esto es lógico ya que, en la zona del ensayo, la profundidad modal de trabajo de las máquinas de labranza es aproximadamente de 150 a 200 mm.

Además, se debe destacar que, los neumáticos que produjeron los valores mayores de presión en el área de contacto rueda/suelo (23.1 – 30 y 18.4 – 38) superaron los 1500 kPa desde los 100 mm de profundidad, este valor fue sugerido por Botta et al. (2008) como limitante del desarrollo radical de los cultivos extensivos.

Señalando que Threadgill (1982) indica que valores por encima de 1500 kPa disminuyen el desarrollo radical mientras que desde 2100 a 2500 kPa pueden detener su crecimiento. En referencia a lo anterior los 2100 kPa no fueron superados en todo el perfil de suelo estudiado por todos los neumáticos, esto no coincide con lo estudiado con Rossi 2013.

A partir de los 100 y hasta los 300 mm de profundidad, todos los neumáticos ensayados, sobrepasaron el valor de 1700 kPa, este valor, es indicado por Botta et al., 2008 como capaz de producir una disminución en la tasa de crecimiento radical en cultivos de la región pampeana argentina.

Tabla 5: Análisis de los valores de IC (kPa) de los tratamientos respecto al testigo sin tráfico para el intervalo de 0 a 450 mm de profundidad.

Prof. (mm)	Testigo	23.1 R 30	23.1 – 30	18.4 – 38	18.4 R 38
0 – 150	1030 a	1300 b	1540 d	1570 d	1410 c
150 – 300	1500 a	1790 c	1790 c	1700 b	1680 b
300 – 450	1700 a	1840 b	1860 b	1840 b	1820 b

Letras distintas en sentido horizontal denotan diferencias significativas ($P < 0,01$ Test de Duncan).

Al referirnos al incremento del parámetro IC, para el intervalo de 0 150 mm de profundidad los incrementos fueron entre 52 y 26 % (Figura 8), siendo el menor incremento para el neumático 23.1 R – 30, que ejerció la menor presión en el área de contacto rueda/suelo. El mayor incremento se correspondió con el neumático 18.4 - 38, el cual produjo una presión en el área de contacto rueda/suelo de 77.5 kPa.

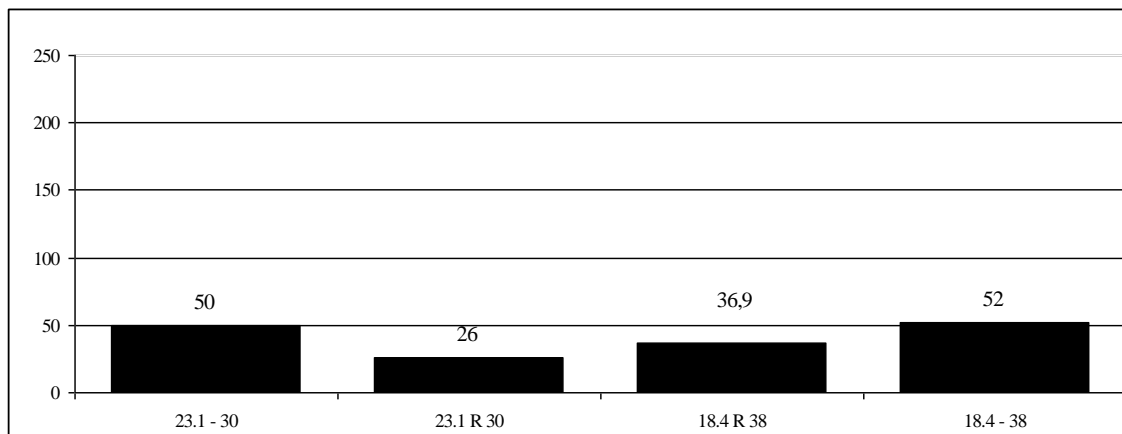


Figura 8: Incremento del (IC) luego del tránsito para cada tratamiento para el intervalo de 0 - 150 mm de profundidad.

En el intervalo de 150 a 300 mm (Figura 9) de profundidad los neumáticos 23.1 R 30 y 23.1 – 30 que consistieron en las ruedas de mayor peso sobre el eje produjeron incrementos del IC de 19.3 %. Mientras que, los otros dos neumáticos, produjeron los menores incrementos en el IC de este intervalo superficial. Siendo el inferior para el neumático 18.4 R 38 .Coincidiendo nuevamente con los autores ya citados Håkansson (1988), Smith y Dickson (1990) y Van den

Akker (1998) respecto a que la compactación subsuperficial del suelo se debe al peso sobre el eje de la maquina y no a la presión en el área de contacto rueda/suelo.

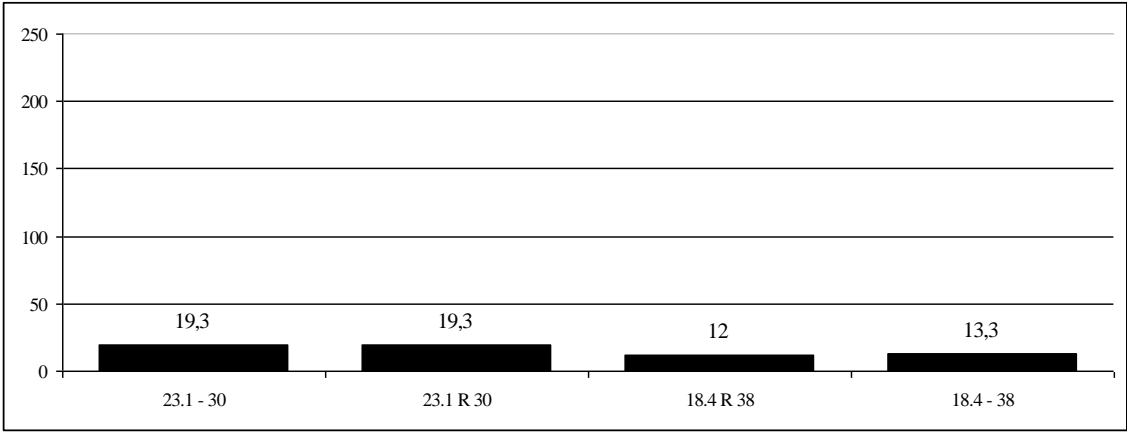


Figura 9: Incremento del (IC) luego del tránsito para cada tratamiento para el intervalo de 150 a 300 mm de profundidad.

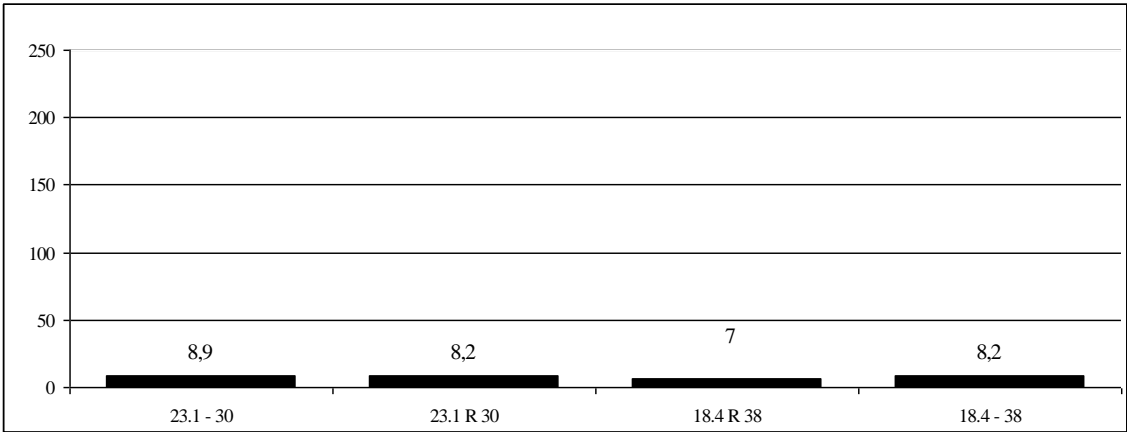


Figura 10: Incremento del (IC) luego del tránsito para cada tratamiento para el intervalo 300 a 450 mm de profundidad.

En la figura 10, en el intervalo de 300 a 450 mm de profundidad se puede ver que el incremento del IC es muy parejo y no supera el 9%, esto se corresponde con lo expresado por Botta et al., (2002) y Raper (2005) en referencia al incremento de la compactación del subsuelo, en este caso demostrado a través del IC, producido por el peso total de la maquinaria que es evidencia del problema ya que se produjo en una sola pasada del neumático.

En las figuras 8 a 10 se puede ver que todos los neumáticos ensayados produjeron, en una sola pasada incrementos en el IC por debajo de los 150 mm, es decir, en acuerdo con (Botta et. al., 2002) la compactación superficial involucra a la capa que se remueve todos los años con la labor, siendo producida por ciclos anuales de aflojamiento y preparación de la cama de siembra, a lo que se agregan las operaciones posteriores de desmalezado, cultivo, aplicación de agroquímicos y cosecha. En nuestro país, debido a la forma de trabajo empleada, el horizonte superficial mencionado es de, aproximadamente, 200 mm. La compactación subsuperficial es la que se trasmite hasta el subsuelo, en profundidades por debajo de la profundidad normal de labor (Rossi 2013).

Consideraciones finales y conclusiones

De la discusión generada en los apartados anteriores quedó demostrado que:

-De los neumáticos ensayados en este trabajo, solamente en los de construcción radial (23.1 R30 y 18.4 R 38), hubo una respuesta directa entre la presión en el área de contacto rueda/suelo y la profundidad de huella de los mismos. Es decir cuanto menor fue la presión en el área de contacto rueda/suelo menor fue la profundidad de huella. Esto es muy importante, al momento que el productor elige la presión de inflado del tractor, ya que, en caso de sobre-inflado en estos neumáticos se produciría una mayor profundidad de huella, una mayor compactación del suelo y por ende una mayor pérdida de tracción.

-Los otros dos neumáticos ensayados fueron de construcción convencional y su respuesta a la presión de inflado en relación a la compactación (IC) del suelo fue muy errática, es decir, no se pudo establecer un patrón entre ambos parámetros. Lo que sí quedó muy claramente demostrado, a través de los resultados de IC, es que todos los neumáticos produjeron incremento de dicho parámetros más allá de los 150 mm de profundidad (subs superficial).

-Entonces, de la discusión de resultados, y de las presentes consideraciones, se encontró, que no existe evidencia válida para rechazar la hipótesis de trabajo y sin embargo si hay datos suficientes como para ser considerados como evidencia para aprobar la hipótesis. Se proporcionó entonces, suficiente evidencia como para validar la **hipótesis de trabajo**.

Recordando que la Hipótesis de trabajo fue: la profundidad de huella producida por neumáticos radiales y convencionales tiene relación directa con la compactación superficial del suelo.

Conclusiones

Dentro de los límites de este trabajo, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Tanto los neumáticos de construcción radial como los de construcción convencional ensayados en este trabajo produjeron compactación subsuperficial del suelo (debajo de los 200 mm).
- La profundidad de huella tuvo una relación directa con la presión en el área de contacto rueda/suelo.
- Para los pesos ensayados < 26.6 kN se produjo compactación subsuperficial, luego de una sola pasada de maquinaria.

Bibliografía

1. ASAE Standards, 1992. Soil cone penetrometer S 313.2. Am. Soc. Agric. Eng. 611.
2. Arvidsson, J., Keller, T., 2007. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. Soil Till. Res. 96, 284–291.
3. Blancher, G.R., Nelson W.W. Allmaras, R.R. 1978. Persistence of subsoil compaction in a mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 943 - 948.
4. Boletín 1881. 1977. Universidad de California. "Compaction of soil by Agricultural Equipment". Division of Agricultural Sciences. UCA. pp. 59.
5. 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, 47-54.
6. Botta G.F., Jorajuria D., Balbuena R., H. Rosatto., 2004. Mechanical behavior of an agricultural soil under different traffic intensities: effect on soybean (glycine max l.) yields. Soil and Tillage Res. 78/1: pp. 53-58. Ed. Elsevier.
7. Botta, G., Rivero, D., Tourn, M., Bellora Melcon, F., Pozzolo, O., Nardon, G., Balbuena, R., Tolón Becerra, A., Rosatto, H., Stadler, S. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. Soil Till. Res. 101, 44–51
8. Botta, G.F., A. Tolón-Becerra , X. Lastra-Bravo, R. Hidalgo, D. Rivero, D. Agnes. 2015. Alternatives for handling rice (Oryza sativa L.) straw to favor its decomposition in direct sowing systems and their incidence on soil compaction. Geoderma Vols. (239 – 240) 213–222.
9. Botta. G.F., 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 and Tillage Research 120/92 – 98.
10. Cassel, D., K. Nelson, L.. 1982. Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. Soil and Till. Res. vol. 5: 5-17.
11. Firestone URL: http://www.firestoneag.com/agricultural_tires.asp. Last accessed: March 2013.

12. Keller, T., 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosyst. Eng.* 92, 85–96.
13. Lanatti, J. C., 2012. Efectos de la presión de inflado de los neumáticos de las cosechadoras sobre el suelo agrícola. Tesis de grado, Universidad Nacional de Luján, Argentina 29 pp.
14. Narro Farias, E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola, pp 201. Trillas, México.
15. Neme, A., M. 2000. Compactación de suelos en el cultivo de tabaco. *Revista de la UNJU.* pp 66.
16. Proctor, R., 1933. Fundamental principles of soil compaction. *Eng. News Rec.* 111., pp. 245–248, 286–289, 348–351.
17. Rivero, E., R., D. 2008, El tráfico del tractor sobre un suelo bajo siembra directa y labranza convencional. Esp. Tesis, Facultad de Agronomía de la Facultad Universidad de Buenos Aires, Argentina 47 pp.
18. Rivero, E. R. D. 2012. La compactación del suelo y la resistencia a la rodadura en relación al diseño del tractor y a la condición mecánica del suelo. Maestría en Mecanización Agrícola. Tesis, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, La Plata Argentina 60 pp.
19. Rossi F. 2013. Efectos de la presión en el área de contacto rueda/suelo sobre la compactación superficial del suelo, Trabajo Final de Aplicación UNLu. 31 pp.
20. Schjøning, P., Lamandé, M., Tøgersen, F.A., Arvidsson, J., Keller, T., 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst. Eng.* 99, 119–133.
21. Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractors tyres. *Agric. Eng.* 39, 276–281.
22. Soil Conservation Service, 1994. Keys to Soil Taxonomy, 6th edition. Soil Survey Staff, USDA, Washington DC, USA.
23. Threadgill, D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE* 25, 859-863.
24. Voorhes, W.,V. 1986. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel induced soil compaction. *Soil Science Society of American Journal* 47 (2): 129 – 133