FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Tesina presentada para obtener

el grado académico de

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

"COMPACTACIÓN DEL SUELO PRODUCIDA POR EL TRÁFICO DE LA MAQUINARIA Y PISOTEO ANIMAL EN UN ESTABLECIMIENTO MIXTO EN QUEHUÉ, LA PAMPA, ARGENTINA".

AUTOR: ANABELLA LOZZA.

DIRECTOR: PROF. DR. GUIDO FERNANDO BOTTA.

CODIRECTORA: PROF. MSC. SILVIA BEATRIZ AIMAR.

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2012

PREFACIO

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniera en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la Cátedra de "Maquinaria Agrícola", dependiente de la Facultad de Agronomía de la UNLPam, durante el período comprendido entre el 1º de abril de 2011 y el 31 de agosto de 2012, bajo la dirección de BOTTA, Guido Fernando; y bajo la codirección de AIMAR, Silvia Beatriz.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar por medio de estas líneas mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de este trabajo, en especial al Dr. Guido F. Botta, director de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este estudio.

Especial reconocimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas de la profesora y codirectora del presente, Silvia B. Aimar, con la que me encuentro en deuda por el ánimo infundido. También me gustaría agradecer la infinita ayuda recibida del señor José V. Lozza, mi papá, quien fue parte fundamental de los muestreos de campo.

También quiero dar las gracias a David E. Rivero, por su colaboración en esta investigación.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia (mamá, Agus y abuela), amigas (Agus, Tuti, Ro, Fer y Nati) y Manuel, siempre presentes con sus palabras de apoyo.

A todos ellos, muchas gracias.

LOZZA, Anabella

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

UNIVESIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

RESUMEN

La compactación del suelo es un proceso de degradación física, que produce una disminución del espacio poroso estructural. Los objetivos fueron: 1) Estudiar la compactación en un suelo agrícola, bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) que permitan seleccionar la alternativa de formación del conjunto tractor - implemento, compatible con una producción sustentable; y 2) Estudiar la magnitud y variación vertical de la resistencia a la penetración y la infiltración de un suelo agrícola bajo tráfico y pisoteo animal. Los ensayos se realizaron en un Haplustol éntico en Quehué (Utracán), provincia de La Pampa, sobre dos condiciones de suelo: LC y SD, que recibieron, además del pisoteo animal, cuatro intensidades de tránsito: 1, 5 y 7 pasadas de tractor, repetidas sobre la misma huella para inducir compactación. El tratamiento de 0 pasada fue considerado como testigo. Las variables medidas fueron: penetrometría, profundidad de huella e infiltración. Los resultados obtenidos indicaron que a) al aumentar el número de pasadas, se induce a la compactación subsuperficial del suelo. b) El sistema de SD no fue capaz de limitar la compactación inducida por tráfico ante situaciones de alta intensidad de tránsito combinadas con alta y baja carga animal. c) La SD es incompatible con la práctica ganadera. d) La alta presión en la zona de contacto rueda/suelo junto al número de pasadas produjo compactación superficial del suelo. e) Las tres intensidades de tráfico generaron condiciones inadecuadas para la germinación y emergencia óptima de la semilla.

Palabras clave: Compactación del suelo – siembra directa – capacidad portante del suelo.

ABSTRACT

Soil compaction is a degradation of physical properties, producing a decrease of the pore space structure with the consequent reduction in crop yields. We worked on two mechanical condition of soil: conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), which also received the animal trampling, four traffic intensities: the lowest intensity in the system (1-pass of tractor), the greater intensity record the real system (5 tractor passes) and above this (fixed at 7 passes of tractor). Such treatment was compared with a witness who represented the original characteristics of the soil. The independent experimental variables were two ways to generate traffic intensity: 1) with a low weight tractor as an adjustment variable using the number of passes on the same path 2) with a heavy tractor and

decreasing the number of passes. The experimental variables related to soil compaction were penetrometry, tread depth and infiltrometry. The main results of this study was obtained for the two mechanical conditions of the soil, a traffic measurement and incidence of machinery and animal trampling evidenced by the decrease in soil infiltration and increased penetration resistance, being more pronounced when the traffic was combined with animal trampling.

Key words: Soil compaction - no-tillage - soil bearing capacity.

INDICE

Página

1 - Introducción……..1

2 - Objetivos……...3

3 - Antecedentes…….3

4 - Hipótesis……..……...8

5 - Materiales y métodos……8

5.1 - El lugar……..8

5.2 - Diseño del ensayo……..…….9

5.3 - Procedimiento experimental: Características de los tractores…….....11

5.4 - Determinación de los parámetros vinculados a la compactación del suelo.....13

5.5 - Análisis estadístico……..….....16

6 - Resultados…….….....17

6.1 - Consideraciones generales para los dos sistemas de producción…….…...17

6.2 - Consideraciones de las variables experimentales de los dos sistemas: SD y LC…18

6.2.1 - Suelo bajo Labranza Convencional…….……..20

6.2.2 - Suelo bajo Siembra Directa.…….23

7 - Discusión.…….....26

7.1 - Suelo bajo Labranza Convencional…….26

7.2 - Suelo bajo Siembra Directa……29

8 - Consideraciones finales y conclusiones……..……33

8.1 - Consideraciones finales……...……33

8.2 – Conclusiones……...33

9 - Bibliografía……...……..34

1. – INTRODUCCIÓN

Una parte importante de la actividad agropecuaria de la República Argentina se realiza en la pampa arenosa. La pampa arenosa posee una extensión de 8 Mha, de las cuales 1,1 Mha son destinados a la agricultura, en la que predominan suelos Haplustoles (S.A.G. y P; 1995).

Por otro lado, en dicha región, en los últimos 30 años, se ha pasado desde una agricultura con alta remoción del suelo, lo que se denomina labranza convencional, a una agricultura sin remoción del suelo o siembra directa, con una gran utilización de productos químicos para el control de malezas. En esta situación el monocultivo de soja surge como el principal protagonista a tal punto que ya son, aproximadamente, más de 11 Mhas de dicho cultivo en el país.

En este contexto, el aporte de insumos, maquinaria y capacidad de trabajo que se hace a los distintos agrosistemas, ha permitido aumentar el rendimiento promedio de los cultivos. El problema es que para lograr esto se aumentó el tamaño, peso y potencia de los tractores del actual mercado argentino. Es así como se pasó a un tractor agrícola modal en zona cerealera de 90 kW a una oferta en la gama de mayor potencia del orden de 260 kW (Asociación Argentina Fabricantes De Tractores, 2001). Además de los motivos citados, esta tendencia ha generado, en lo últimos años, la presencia de contratistas en el medio rural donde la capacidad operativa cobra especial relevancia.

Como contrapartida, el tráfico agrícola con estos tractores y máquinas de gran peso por eje trae aparejados problemas de compactación a nivel subsuperficial, y en muchos casos superficial. La compactación definida en términos muy generales, es el aumento de la densidad aparente del suelo y es causada por diversos factores como: la compresión de las partículas durante los procesos pedogenéticos, la contracción natural en el proceso de humedecimiento - secado, el pisoteo generado por los animales, las labranzas continuas, la acción del agua causada por la implementación de sistemas de riego y las presiones generadas por el tráfico y el peso de los vehículos e implementos agrícolas. Estos cuatro últimos factores son de origen antrópico, siendo el hombre quien puede decidir su manejo racional.

El suelo 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).

Desde hace más de treinta años se citaron problemas en el suelo por compactación. Panigatti (1964) afirmó que la compactación del suelo es una limitante al desarrollo del cultivo. Más tarde, Mazzuco (1978), citó que el peso de la maquinaria y las labranzas sucesivas son algunos de los factores que inciden en la formación de las capas compactadas.

Botta et al. (2002) indicaron que debido a la compactación se produce en el suelo la merma del espacio poroso, principalmente de los macroporos, esto trae aparejado una menor aireación a nivel de las raíces y una mayor impedancia para el desarrollo de las mismas.

Las propiedades físicas del suelo determinan la capacidad edáfica para suministrar agua a las plantas; las químicas la capacidad de suministrar nutrientes y juntas actúan sobre la extensión de las raíces y el volumen del suelo que sirve como reservorio de agua y nutrientes esenciales (Ibáñez y Botta, 2004). Los sistemas de labranzas modifican estas propiedades provocando diferencias en el desarrollo de las plantas (Jorajuría, 2001). Uno de los agentes que induce sobrecompactaciones es el tráfico con alta carga por eje. En un trabajo realizado por Botta et al. (2004), en un cultivo de soja (*Glicine max* L.), bajo el sistema de siembra directa se comprobó al inducir compactación que, a medida que aumenta el número de pasadas, mayores son los incrementos de la densidad aparente e índice de cono en todo el perfil del suelo, y por sobre todo al incrementar el número de pasadas, menores son los rendimientos de dicho cultivo. Dichos autores citaron valores de pérdida en el rendimiento de soja *(Glycine max.* L.) del orden de: 9.8, 22.6 y 38.8 % para 6, 8 y 10 pasadas de tractor respectivamente.

En una primera distinción de efectos corresponde diferenciar compactación superficial de subsuperficial. La primera 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. La compactación subsuperficial es la que se trasmite hasta el subsuelo, en profundidades de alrededor de 40 cm pudiendo profundizarse bastante más por efecto del peso, numero de pasadas y la potencia de los equipos.

El fenómeno de compactación producido por el tráfico agrícola es de compleja solución y/o prevención, ya que se realiza con independencia de que se haya logrado dotarlo de suficiente tamaño de rodado, u otro mecanismo motriz de alta flotación, que le permita el tráfico con baja presión superficial en el área de contacto rueda/suelo. Se ha

demostrado que si bien la compactación superficial es principalmente dependiente de la presión en el área de contacto rueda/suelo, la subsuperficial lo es de la masa de los equipos, dicha compactación es de muy difícil solución, en ocasiones con resultados permanentes y acumulativos (Håkansson & Reeder, 1994 y Botta et. al, 2007, 2008, 2009 y 2010). De allí la importancia de evitarla, mediante el uso sustentable de un recurso de fundamental relevancia para la economía Argentina como lo es el suelo, sustento de la producción agraria.

Bajo labranza convencional, el suelo, una vez removido, alcanza su máxima posibilidad a ser compactado, en dicho estado posee una baja densidad aparente y una muy baja resistencia a la penetración. Según Taylor et al. (1982) en dicha situación, una sola pasada del tractor genera el 90% de la huella definitiva y algo más del 75% de la compactación total del suelo. Las consecuencias de esto son un gran hundimiento y deformación del suelo al ser traficado por una rueda u oruga, aumentando el patinamiento, el esfuerzo de rodadura y el consumo de combustible del tractor. Mientras que el suelo bajo siembra directa al no ser removido soporta más el tráfico o pisoteo animal que los anteriores. Sin embargo, autores tales como Botta et al. (2010), comparando siembra directa y labranza con cincel, encontraron en estos últimos un 62-64 % más de longitud de raíces que en siembra directa, hecho que atribuyen a una mejor aireación del suelo.

2. - OBJETIVOS:

El objetivo del presente trabajo fue:

1. Realizar un aporte en cuanto a la distribución de la compactación en el suelo agrícola, bajo siembra directa y labranza convencional que permitan seleccionar la alternativa de formación del conjunto tractor - implemento, compatible con una producción sustentable.

2. Estudiar la magnitud y variación vertical de la resistencia a la penetración y la infiltración de un suelo agrícola bajo tráfico y pisoteo animal con el objetivo de generar condiciones compatibles con una producción sustentable.

3. – ANTECEDENTES

La siembra directa comenzó a difundirse en forma sostenida a mediados de la década del 80 en Argentina, debido a la creciente difusión y abaratamiento del costo de los

agroquímicos, y a la simplificación que implica la reducción del número de operaciones y del parque de maquinaria. Actualmente se realizan, en forma efectiva, más de 22 Mhas en este sistema (Botta et. al., 2012), generalizándose con escasas modificaciones en muy diversos tipos de suelos. En base a lo mencionado, puede esperarse que la adecuación de los sistemas de labranza a los distintos tipos y condiciones de suelo resulte en una mejora de los niveles productivos, en función de su contribución a la optimización de los factores de producción y de la limitación al deterioro del suelo.

Los suelos de la región Pampeana, evolucionaron sobre pastizales de gramíneas, lo que hace que en su constitución haya abundante presencia de fitolitos ricos en sílice amorfa. La presencia de este mineral genera en los suelos de esta región una mayor susceptibilidad a la degradación y un acelerado deterioro de las propiedades físicas como resultado del uso agrícola (Puricelli, 1985).

Por otro lado, las características de estos suelos con buenos porcentajes de arcilla illítica con característica adhesiva y expansiva le confieren condiciones de difícil laboreo, transformándose la siembra directa en una herramienta con excelente adaptación para el manejo de los mismos, fundamentalmente asociada a una mejor oportunidad de labranza. La adopción de este tipo de tecnología implica una mayor dependencia de los agroquímicos, especialmente de fertilizantes y herbicidas. Otra problemática es la tendencia del crecimiento del tamaño de la maquinaria agrícola en la amplia mayoría de los sistemas reales de producción, justificada por un aumento en la capacidad de trabajo, en la reducción de costos en jornales por operador y en una mayor facilidad para encontrar la oportunidad de labor dentro del calendario agrícola.

La información disponible en sistemas de siembra directa comparados con otros sistemas de labranza indica, en general, una mayor compactación en los estratos superiores del perfil. Su comportamiento en el tiempo dependerá de las interacciones del sistema productivo, por ejemplo el grado de cobertura dejado por los cultivos, con las características del suelo en cuestión y con la evolución de la parte biótica edáfica, especialmente de la mesofauna. Según Senigagliesi y Ferrari (1993) los sistemas que no remueven el suelo pueden ayudar a la compactación del mismo, mientras que la labranza combinada evita la compactación. Para estos autores, los suelos bajo siembra directa presentan menores valores de macroporosidad y de porosidad total. Leiva y Hansen (1984) encontraron tendencias hacia una mayor producción de raíces, en peso seco, en tratamientos con mayor remoción de suelo. El patrón de distribución de raíces con la

profundidad también cambia: el tratamiento con reja tiene un 77 % del peso seco en los primeros 0,2 m, mientras que con cincel sólo hay un 67 % en ese estrato, siendo éste a su vez, el tratamiento con una mayor uniformidad en la distribución a lo largo del perfil. En siembra directa en cambio, se concentran las raíces en los primeros 0,1 m. Esto coincide con los patrones de resistencia a la penetración y densidad aparente encontrados por algunos autores. Sin embargo, Lal et al. (1994) encontraron en un ensayo de 28 años, menores valores de densidad aparente en los primeros 0,18 m de suelo en siembra directa, comparado con reja y cincel, lo que atribuye a la acción de las lombrices como formadoras de canales.

En el mismo sentido, Veihmeyer & Hendrickson (1948) indicaron que valores de densidad aparente de 1.46 Mg m^{-3} constituyen el umbral crítico para el desarrollo radical de gramíneas, mientras que Daddow y Warrington (1984) establecieron que 1.65 Mg m^{-3} es el umbral de crecimiento radical. En tal sentido, Botta et al. (2006 a) informaron que los sistemas que no remueven el suelo pueden ayudar a la compactación del mismo. Domínguez et al. (2000) han registrado una mayor acumulación de compactación superficial y una mayor capacidad portante en suelos bajo siembra directa. Incluso, el mismo autor asevera que el uso continuado de la siembra directa puede llegar a provocar problemas de compactación. El tránsito con las diversas máquinas que se utilicen, desde la pulverizadora, sembradora, fertilizadora hasta cosechadora y carritos, entre otros, y la no remoción del suelo, puede generar una densificación del mismo. Aunque se ha comprobado que en los sistemas bajo siembra directa presentan en general, una mayor disponibilidad de agua en el suelo, comparados con los labrados con reja y vertedera, en años secos. Según Senigagliesi & Ferrari (1993) esto, lo atribuyeron a un menor escurrimiento, mayor infiltración y menor evaporación debido a la presencia de restos vegetales.

En cambio Quiroga et al. (1999) indicaron que en suelos Haplustoles énticos, de la Región Semiárida Pampeana suelen presentarse compactaciones subsuperficiales (debajo del horizonte arable) originadas por las repetidas labores agrícolas y los distintos manejos a los que son sometidos. Según Andrade et al. (1996) la compactación del subsuelo produce disminución del crecimiento de cultivos, tales como girasol, en forma similar a un suelo compactado totalmente.

Soza et al. (2003) concluyeron que la utilización durante 4 años sucesivos de la técnica de siembra directa (SD) genera compactación en el suelo. La evaluación de la

compactación superficial inducida por 4 años de SD jugó un rol principal en los descensos de rendimientos, ya que los aumentos de resistencia a la penetración, bajo SD, excedieron los 2 Mpa. Según Botta (2000) ese es el umbral crítico por encima del cual se detiene la proliferación radicular. Jorajuria (2001) encontró mayor índice de cono en SD comparado con otros métodos de labranza. A la vez determinó una relación inversa entre índice de cono y rendimiento de los cultivos. Por otro lado, el tráfico de las máquinas apareció como la variable con mayor responsabilidad en la reducción de la tasa de infiltración, siendo en las situaciones de SD y el tráfico aleatorio en toda la superficie, las combinaciones que más afectaron negativamente la infiltración.

Es importante destacar la influencia del rodado y la presión de inflado en la compactación del suelo. Sobre esto, Lancas et al. (1996), tuvieron en cuenta utilizar presiones de inflado mínimas en cubiertas radiales para comparar con los valores máximos de inflado, en un suelo labrado con una rastra de discos y con baja humedad edáfica. Los resultados obtenidos evidenciaron positivamente al equipo con menor presión de inflado, no solo por un ahorro de combustible del 6 %, mas un incremento en la capacidad de trabajo de 4,6 %; sino también destacando principalmente que el aumento de la compactación superficial fue de 23,4 %, incrementándose en un 119,4 % en el rodado con la mayor presión. Siendo este trabajo citado en un ensayo por Botta et al. (2002) en el cual sobre un Argiudol típico con un tractor convencional (2WD) en dos condiciones, arado no consolidado y cama de siembra, para cuatro tamaños de rodados, afirmaron que la compactación superficial es independiente de la carga normal sobre el suelo, con posibilidad de disminuirla con variaciones del rodado convencional.

En referencia al tráfico, la compactación superficial del suelo está determinada por la presión superficial en la zona de contacto rueda/suelo (Botta et al. 2006 b). Los vehículos con orugas como los que se utilizan en desmonte, tienen una mayor superficie de contacto con el suelo, permitiendo disminuir la presión sobre el mismo (Soane et al., 1982). 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 et al. 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 consideraron 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. Para dichas condiciones, la compactación en las capas profundas del subsuelo puede considerarse permanente.

En cuanto al número de pasadas, Botta (2000) comprobó sobre suelos no labrados, que luego de la quinta pasada el incremento de la compactación del suelo respondió en forma lineal al número de pasadas y al peso total del tractor. En cuanto a la presión en el área de contacto, el mismo autor, señala que, ésta fue la causante de la compactación superficial cuando los tractores circularon 1 y 5 veces.

Botta et al. (2006 a) sobre un suelo Argiudol típico bajo SD con alta humedad, encontraron que al ser traficado por tractores 6, 8, 10 y 12 veces con un peso de 2.1 Mg/eje se produce compactación subsuperficial del suelo, hasta 600 mm. Al mismo tiempo los autores indicaron que hubo incrementos en el parámetro densidad aparente solamente cuando ese mismo suelo fue traficado entre 10 y 12 veces por un tractor de 3.1 Mg/eje de peso. Soane et al. (1982) señalaron que el daño al suelo producido por tractores con un peso de 30 Mg a 50 Mg es incalculable, principalmente en suelos de textura fina cuando se encuentran húmedos.

En un trabajo realizado en 1976, Taylor y Burt encontraron que el peso total del equipo es el responsable de la compactación subsuperficial del suelo, produciéndose ésta en forma independiente de la presión en el área de contacto rueda/suelo. Los mismos autores sostienen que la labranza altera la estructura del suelo y al ser traficado en forma inmediata a la misma le produce una alta compactación.

Sin embargo, Botta et al. (2002) trabajando sobre un Argiudol típico bajo labranza convencional comprobaron que los tractores que portaban los neumáticos más anchos, ya sea con o sin lastre produjeron los menores incrementos de densidad aparente y de índice de cono, afirmando que el factor determinante de la compactación superficial es la presión en el área rueda/suelo, dentro del horizonte superficial. De esta manera, concluyeron que la compactación superficial es independiente de la carga sobre el suelo y que puede disminuirse variando la implementación del rodado convencional.

Draghi et al. (1989) sostienen que es común considerar, que el primer pasaje de una rueda en un suelo agrícola cause una mayor compactación que las subsiguientes. Sin embargo el tipo de respuesta al tráfico dependerá marcadamente de la resistencia inicial del suelo (capacidad portante) y de su distribución con la profundidad.

Los parámetros físicos para determinar la compactación del suelo, y los más utilizados, son la resistencia a la penetración y la densidad aparente, 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) sugierieron 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) indicó 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) aseguró 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) sostuvo que valores mayores a 1,5 Mg m^{-3} producen reducción del crecimiento radical.

Según Neme (2000), la impedancia mecánica o resistencia a la penetración es un parámetro apropiado para inferir condiciones mecánicas del suelo registradas a partir de distintos tratamientos de labranza. Empero, la resistencia a la penetración depende estrechamente del contenido de humedad del suelo durante las determinaciones.

Ante esta situación es necesario conocer la evolución y alteración de los parámetros resistencia a la penetración, la densidad aparente, la infiltración y la humedad del suelo, sometido a distintas intensidades de tráfico, sobre dos sistemas de trabajo del mismo: labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) a modo de entender hasta que punto el trafico de vehículos comunes a las labores agrícolas atenta contra la sustentabilidad del sistema.

4. HIPÓTESIS

1. El tráfico sobre suelos bajo la técnica de siembra directa reiterada determina una distribución en profundidad de la compactación compatible con una producción sustentable.
2. El impacto del tráfico del tractor y pisoteo animal es menor en suelos bajo siembra directa que en el laboreado en forma convencional.

5. MATERIALES Y METODOS:

5.1. - Sitio:

Se trabajó en dos lotes de los establecimientos “San Carlos y San José” ubicados en la localidad de Quehué, Departamento de Utracán, provincia de La Pampa, Argentina, sobre un suelo Haplustol entico (Soil Taxonomy, 1994) localizado a, 37º 08’ Sur, 64º 24’ Oeste, a una altitud de 300 m sobre el nivel del mar, con pendiente de 0 a 0,5 %, relieve subnormal; escurrimiento lento; permeabilidad moderadamente rápida; algo excesivamente drenado; con presencia de rocosidad y pedregosidad.

5.2. – Diseño del ensayo:

Los diferentes tratamientos de tránsito vehicular fueron realizados sobre dos parcelas con diferente condición mecánica:

- Suelo laboreado en LC y,
- Suelo bajo SD.

La historia de los lotes donde se estableció el ensayo es la siguiente: la parcela bajo el sistema de SD estaba en el sexto año de esta técnica, todas las campañas han sido de maíz. Desde el año 2005 los trabajos se realizaron bajo el sistema de SD, es decir, sin remoción del suelo. El lote en LC fue trabajado, históricamente, bajo este sistema de labranza; siendo todas las campañas de verdeos invernales (avena y centeno).

Sobre estas condiciones de suelo se implementaron cuatro intensidades de tránsito, que incluyen el testigo; sobre la base de probar las dos alternativas posibles de alcanzar las intensidades propuestas (Mg km ha^{-1}) en base a usar como variable de ajuste el mayor número de pasadas de un tractor pequeño versus el menor número de pasadas de un equipo de mayor peso. Se realizó un arreglo factorial completo con tres repeticiones, totalizando de esta manera 48 parcelas por condición mecánica de suelo. Las parcelas tuvieron una dimensión de aproximadamente 30 por 4 metros.

Los tratamientos quedaron conformados como se puede ver en la Tabla 1 donde las repeticiones fueron distribuidas al azar:

Tabla 1: Parcelas experimentales de tráfico aplicado en el ensayo.

	LABRANZA CONVENCIONAL				**SIEMBRA DIRECTA**			
TL	0TLACA	1TL ACA	5TL ACA	7TL ACA	0TLACA	1TL ACA	5TL ACA	7TL ACA
TP	0TPBCA	1TP BCA	5TPBCA	7TP BCA	0TPBCA	1TP BCA	5TPBCA	7TP BCA
TL	0TLBCA	1TL BCA	5TL BCA	7TL BCA	0TLBCA	1TL BCA	5TL BCA	7TL BCA
TP	0TP ACA	1TP ACA	5TP ACA	7TP ACA	0TP ACA	1TP ACA	5TP ACA	7TP ACA

Donde: TP = Tractor Pesado, TL= Tractor Liviano, LC= Laboreo Convencional, SD = Siembra Directa, BCA = Baja Carga Animal, ACA = Alta Carga Animal 1= baja intensidad de tráfico, 5= media intensidad de tráfico y 7= máxima intensidad de tráfico.

En las parcelas de ensayo bajo SD y LC, hubo dos cargas de pastoreo diferentes, alta y baja carga animal (Figuras 1 y 2) en estas figuras se pueden ver las huellas resultantes de la aplicación de los diferentes tratamientos de tráfico.

Los pastoreos fueron rotativos definidos por la velocidad de crecimiento del cultivo, con cargas instantáneas de 300 y 600 kg ha^{-1} constituyendo las dos antes mencionadas. Estas cargas se produjeron dentro del lote utilizando alambrado eléctrico variando la superficie asignada, la cual fue la variable de ajuste para mantener las cargas instantáneas deseadas y no el número de animales. Los criterios de rotación del pastoreo fueron por la disponibilidad de forraje y no por tiempo fijo; iniciándose el pastoreo al momento de producirse un disponibilidad de 1500 kg de materia seca ha^{-1} para rotar cuando se produzcan rastrojos de aproximadamente 800 kg de materia seca ha^{-1}. El manejo de cargas instantáneas diferentes provocó que los tiempos de ocupación sean distintos, así las variables de compactación fueron registrada antes del ingreso y al egreso de los animales con la finalización del ciclo del los cultivos. En cada sitio de pastoreo se dejó una zona sin acceso a los animales a modo de testigo.

Figura 1: Parcela de ensayo con alta carga animal.

Figura 2: Parcela de ensayo con baja carga animal.

5.3. – Procedimiento experimental: Características de los tractores.

Las características de los dos tractores utilizados se muestran en las Tablas 2 y 3, adjuntándose sus respectivas Figuras 3 y 4.

Tabla 2: Características del tractor J. Deere 4420 (Liviano) utilizado en el ensayo.

	Tractor: John Deere 4420
Tracción	2WD
Potencia en el motor (IRAM 8005) CV	110
Peso total (kN)	52,92
Peso sobre el eje trasero (kN)	35,46
Peso sobre el eje delantero (kN)	17,46
Neumático delantero	1100 x 16
Presión de inflado neumático delantero (kPa)	180
Presión de inflado neumático trasero (kPa)	140
Neumático trasero	23.1 x 30

Figura 3: Tractor J. Deere 4420 utilizado durante el ensayo.

Tabla 3: Características del tractor Pauny–Zanello 500c (Pesado) utilizado en el ensayo.

	Tractor: Pauny- Zanello
Tracción	4WD
Potencia en el motor (IRAM 8005) CV	200
Peso total (kN)	99,62
Peso sobre el eje trasero (kN)	34,86
Peso sobre el eje delantero (kN)	64,76
Neumático delantero	18.4 x 34
Presión de inflado neumático delantero (kPa)	160
Presión de inflado neumático trasero (kPa)	160
Neumático trasero	18.4 x 34

Figura 4: Tractor Pauny – Zanello 500 c utilizado durante el ensayo.

El área de contacto rueda/suelo fue medida sobre cada una de las condiciones de suelo a traficar, para esto se realizó el siguiente procedimiento: 1) entrando el tractor marcha atrás sobre la superficie de la parcela en estudio se marcó con pintura en aerosol el perímetro de pisada del neumático trasero, 2) se levantó el tractor con un crique hidráulico, 3) se colocó una plancha de acrílico debajo del neumático levantado y se calcó la superficie delimitada por la pintura 4) se procedió a medir con planímetro esta superficie, según propuesta de Botta et al. (1997).

5.4. – Determinaciones de los parámetros vinculados a la compactación del suelo.

Los parámetros relevados vinculados a la compactación del suelo, luego de someterlo a los distintos tratamientos, fueron:

1) Resistencia a la penetración: Este parámetro se midió utilizando un penetrómetro de cono (ASAE S 313, 2002) marca SCOUT900, de principio electrónico y data-logger, con medición del posicionamiento hasta una profundidad de 450 mm entregando un dato cada 25 mm. Las mediciones de resistencia a la penetración (20 muestras para cada parcela) se realizaron, en el centro de la huella, inmediatamente después del tráfico del tractor según propuesta de Smith y Dickson (1990). En el testigo control (0 pasada) se midió para definir la condición mecánica de suelo previo a la aplicación de los tratamientos de tráfico. El número de repeticiones de penetrometría por las 96 parcelas totales, fue de 20 obteniéndose un total de 34560 datos. (Figura 5).

Figura 5: Detalle del penetrómetro SCOUT 900.

2) Infiltración: Para la medición de la infiltración se empleó el método del doble anillo de Müntz (Burt, 1995) tomando tres muestras por cada tratamiento, realizando las mediciones cada hora trascurrida (Figura 6)

Figura 6: Instrumento para medir infiltración.

3) Profundidad de huella: Este parámetro se midió con vara rígida y regla para cada tractor utilizado (Figura 7).

Figura 7: Medición de la profundidad de huella.

4) Humedad gravimétrica: En cada parcela del ensayo se determinó la humedad gravimétrica de 0 a 150 mm, de 150 a 300 mm y de 300 a 450 mm de profundidad, tomando 20 repeticiones por intervalo de profundidad (Figura 8).

Se realizó por medio del secado de muestra de suelo a horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110º ± 5º C. 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:

$$w = (Ww / Ws) * 100 \quad (\%)$$

donde:

w = contenido de humedad expresado en %

Ww = peso del agua existente en la masa de suelo

Ws = peso de las partículas sólidas.

Figura 8: Toma de muestra para la medición de humedad.

5.5. – Análisis estadístico:

El análisis de las variables fue realizado mediante un modelo de ANOVA independiente, con el programa Statgraf versión 7.1. Las diferencias entre tratamientos se realizaron utilizando el test de Duncan, que es uno de los más potentes cuando se usa el mayor nivel de significancia ($P<0,01$) o sea que empleando este test la probabilidad de aceptar una hipótesis cuando es falsa se minimiza (Little y Hills, 1990).

6. –RESULTADOS

6.1.- *Consideraciones generales para los dos sistemas de producción.*

En forma inmediata a la aplicación de los diferentes tratamientos de tráfico se tomaron, en las dos condiciones mecánicas del suelo, los datos de humedad para todo el perfil (Tabla 4). Esto incluyó, también, a la parcela testigo sin tráfico. Lo cual se realizó para independizar el parámetro resistencia a la penetración de la humedad del suelo, que pudiera enmascarar densificaciones en el momento de tráfico.

Tabla 4: Humedad gravimétrica en todo el perfil del suelo al momento del tráfico para las dos condiciones de suelos (LC y SD)

Intervalo de profundidad (mm)	Suelo bajo Labranza Convencional		Suelo bajo Siembra Directa	
	Humedad (%, p/p)	Coeficiente de Variación	Humedad (%, p/p)	Coeficiente de Variación
0 –150	13 a	12	7 a	8
150 – 300	10 a	13	9 a	9
300 – 450	9 a	16	8 a	8.5

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

En las dos condiciones de suelos traficadas se comprobó que el mayor área de contacto medido, para cada rodado, se produjo en el suelo bajo LC, esto causó una menor presión sobre el suelo de ambos tractores para los tratamientos realizados sobre esa condición de suelo (LC) (Tabla 5, Figuras 9 y 10). Los mismos rodados sobre suelo bajo SD arrojaron áreas de contacto rueda/suelo siempre inferiores a la condición de LC, resultando en una mayor presión para el suelo bajo SD. Esta tendencia hacia una presión diferencial en función del área de contacto rueda/suelo fue corroborada por el comportamiento de cada tratamiento en lo relativo al parámetro profundidad de huella.

Tabla 5: Valores de área de contacto de los neumáticos y de presión en el área rueda/suelo

Variables explicativas medidas	Tractor Pauny-Zanello. (TP)	John Deere 4420. (TL)
Presión área de contacto rueda trasera suelo bajo SD (kPa)	33,33	43,2
Área de contacto rueda trasera suelo bajo SD (m²)	0,52	0,41
Presión área de contacto rueda trasera suelo bajo LC (kPa)	30	38,9
Área de contacto rueda trasera suelo bajo LC (m²)	0,58	0,46
Presión área de contacto rueda delantera suelo bajo SD (kPa)	57,8	100,3
Área de contacto rueda delantera suelo bajo SD (m^2)	0,56	0,087
Presión área de contacto rueda delantera suelo bajo LC (kPa)	49	74,7
Área de contacto rueda delantera suelo bajo LC (m^2)	0,65	0,117

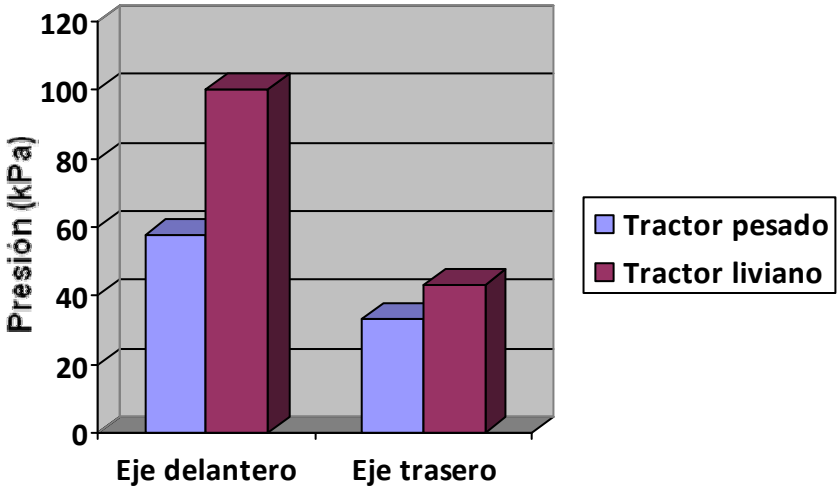

Figura 9: Valores de presión en el área rueda/suelo en SD.

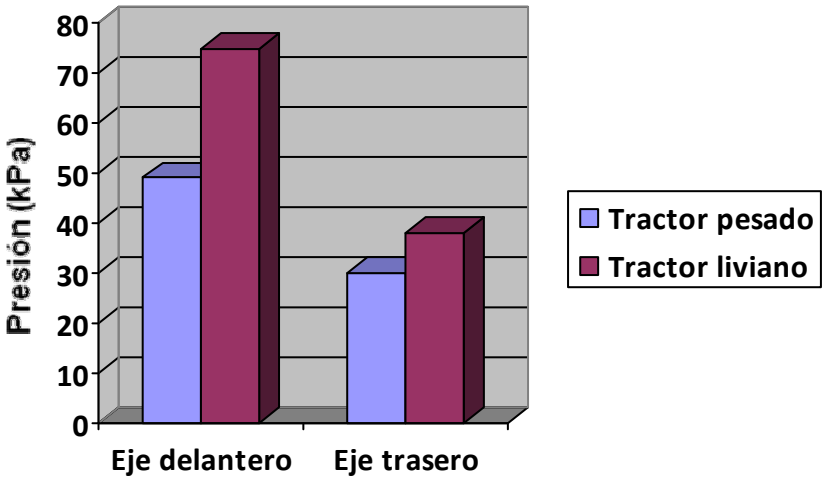

Figura 10: Valores de presión en el área rueda/suelo en LC.

Considerando como básico el manual de neumáticos del NIAE (Dwyer y Febo 1987) resultó que, los tractores utilizados en el ensayo portaban los neumáticos correspondientes a su peso por eje. Es importante aclarar que las presiones de inflado de los neumáticos utilizados en los tractores estaban comprendidas dentro de los intervalos de presiones recomendados por Dwyer y Febo (1987).

6.2. – Consideración de las variables experimentales de los dos sistemas: SD y LC.

La condición de suelo, considerada como testigo, sobre la que se realizó el tránsito, fue mecánicamente diferente. Respecto al parametro infiltrometría (Tabla 6) como se puede ver que hubo diferencias significativas entre las dos condiciones mecánicas del suelo siendo superior para el suelo bajo LC.

Tabla 6: Valores de infiltrometría (cm/h), para los dos testigos sin tránsito LC y SD.

	Infiltración (cm/h)
Testigo LC	17,1 b
Testigo SD	10,4 a

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

Para las dos técnicas de trabajo, la resistencia a la penetración arrojó valores mayores y significativamente diferentes para el suelo bajo SD (Tablas 7, 8, 9 y Figura 11), hasta los 375 mm de profundidad, donde se igualan prácticamente los valores y sus diferencias son despreciables. En LC no se verifica altos valores de resistencia a la penetración por la baja capacidad portante que caracteriza dicho sistema. Apunta su máximo valor a los 250 mm, donde se puede presentar impedancia para el desarrollo radicular. Este aumento en los valores podría denotar la presencia de "piso de arado" por el uso reiterado del implemento a la misma profundidad; y luego de esa profundidad los valores comienzan a disminuir hasta los 450 mm examinados.

En SD se pueden verificar altos valores desde la superficie dado la alta capacidad portante de los suelos trabajados con esta técnica. A los 25 mm y hasta los 125 mm se verifica un aumento en los valores, lo cual puede ser atribuible al pisoteo animal, el cual no se coteja en LC dado que se rompe con el laboreo del suelo.

Esta situación fue predecible al momento de decidir las condiciones mecánicas que se usarían como sustrato para el tráfico. Lo anterior, junto a los objetivos e hipótesis de trabajo determinó que los resultados obtenidos, en los ensayos de tránsito, sobre los dos sistemas se traten por separado.

Tabla 7: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) para los dos testigos sin tránsito LC y SD (0 - 125 mm).

Prof.(mm)	0	25	50	75	100	125
Testigo LC	70 a	140 a	105 a	230 a	328 a	560 a
Testigo SD	1900 b	2842 b	2842 b	3579 b	3404 b	2597 b

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

Tabla 8: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) para los dos testigos sin tránsito LC y SD (150 – 300 mm).

Prof. (mm)	150	175	200	225	250	275	300
Testigo LC	780 a	1230 a	1450 a	2000 a	2630 a	2450 a	2300 a
Testigo SD	3649 b	4176 b	4281 b	3895 b	3334 b	3193 b	2842 b

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

Tabla 9: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) para los dos testigos sin tránsito LC y SD (325 – 450 mm).

Prof. (mm)	325	350	375	400	425	450
Testigo LC	2240 a	2190 a	2100 a	2129 a	2000 a	1970 a
Testigo SD	2842 b	2421 b	2140 a	2200 a	2140 a	2010 a

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

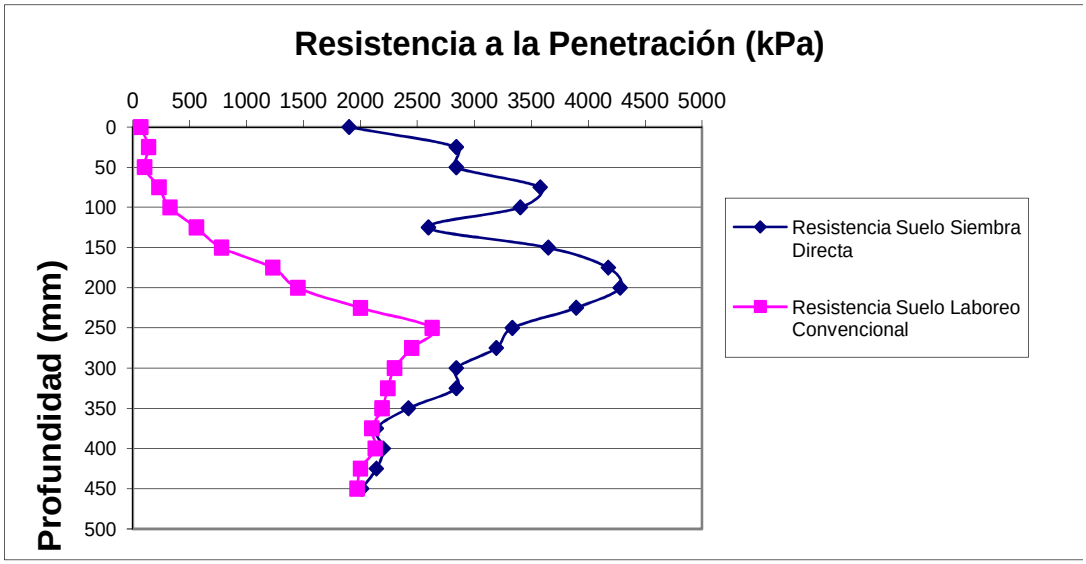

Figura 11: Comparación de valores de resistencia a la penetración (kPa) para los dos testigos sin tránsito SD y LC.

6.2.1. – Suelo bajo Labranza Convencional

Inmediatamente después del tráfico de los tractores y el pisoteo animal propuesto, se tomaron los datos de resistencia a la penetración en el centro de la pisada del neumático, obteniéndose los resultados explicitados en la Tabla 10 con sus correspondientes Figuras 12, 13, 14 y 15.

Tabla 10: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa), respecto al testigo, medidos para 1, 5 y 7 pasadas de tractor Liviano y Pesado, sobre el suelo bajo Labranza Convencional con Alta y Baja carga animal.

Condición de suelo	Labranza Convencional							
Tractor	Tractor Liviano							
Carga animal	Alta Carga animal				Baja Carga animal			
Rango de Profundidad (mm)	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo

0 a 150	1450 b	1700 c	1850 d	875 a	1010 b	1320 b	1570 c	560 a
150 a 300	2240 a	2300 b	2520 c	2170 a	1680 b	1801 c	2001 d	1150 a
300 a 450	2420 a	2490 a	2643 b	2400 a	1920 a	2001b	2300 c	1790 a
Tractor	Tractor Pesado							
Carga animal	Alta Carga animal				Baja Carga animal			
Rango de Profundidad (mm)	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo
0 a 150	1790 b	2268 c	2350 d	875 a	1500 b	1656 c	2000 d	560 a
150 a 300	2380 b	2550 c	2700 d	2170 a	2000 b	2250 c	2500 d	1150 a
300 a 450	2700 b	2890 c	3020 d	2400 a	2230 b	2400 c	2700 d	1790 a

Letras distintas en sentido horizontal, para cada trator y carga animal, denotan diferencias significativas (P < 0,01 Test de Duncan).

En las siguientes figuras se presentan los incrementos de la resistencia a la penetración para cada tratamiento de tráfico con alta y baja carga animal.

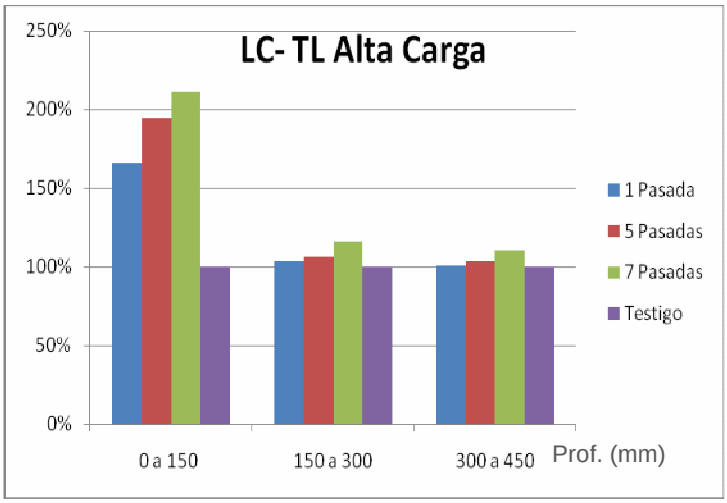

Figura 12: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo, luego del tránsito con el tractor liviano en LC con Alta carga animal.

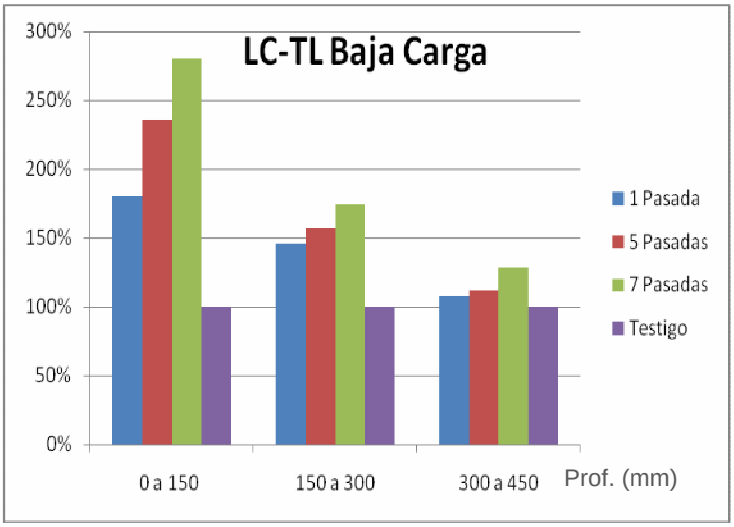

Figura 13: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo luego del tránsito con tractor liviano en LC con Baja carga animal.

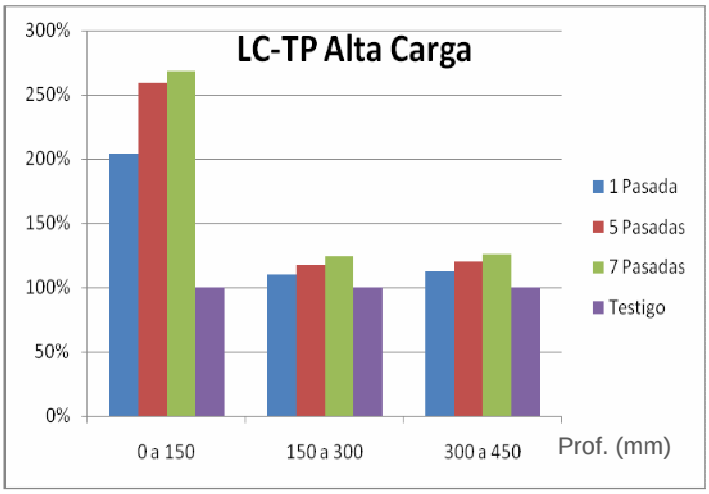

Figura 14: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo luego del tránsito con tractor pesado en LC con Alta carga animal.

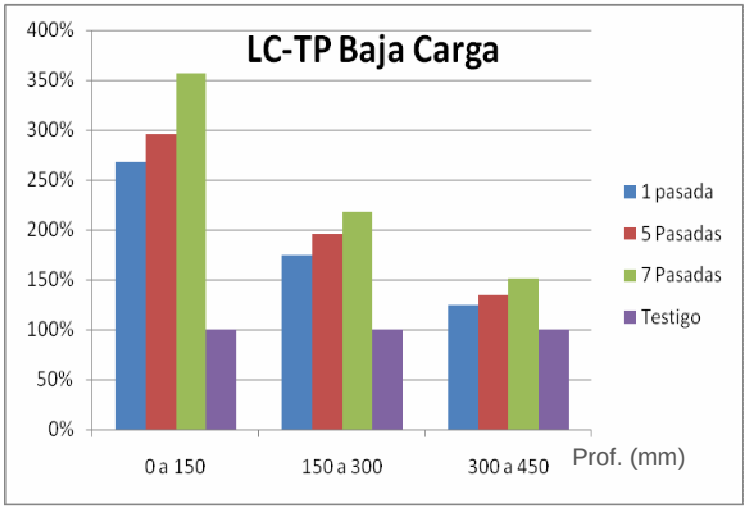

Figura 15: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo luego del tránsito con tractor pesado en LC con Baja carga animal.

Al igual que para el parámetro resistencia a la penetración, inmediatamente después del tráfico de los tractores, se tomaron los datos de infiltrometría mediante el método de los anillos en el centro de la pisada del neumático, obteniéndose los resultados detallados en la Tabla 11.

Tabla 11: Valores de Infiltración (cm/h), para los tractores liviano y pesado en LC para 0, 1, 5 y 7 pasadas, con Alta y Baja carga animal.

	Testigo	Baja Carga Animal		
Tractor	0 Pasadas	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	16,1	9,9 a	6,3 a	3,8 a
TL		14,4 b	7,2 b	6,3 b
	Testigo	Alta Carga Animal		
Tractor	0 Pasadas	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	13,2	7,7 a	5,5 a	2,9 a
TL		11,4 b	6,2 b	5,2 b

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

Finalmente en la Tabla 12 se observan los datos de profundidad de huella para 1, 5 y 7 pasadas de los tractores sobre el suelo bajo LC. Estos datos son promedio de 20 mediciones, 10 de la profundidad del taco y 10 del entre-taco del neumático.

Tabla 12: Valores de profundidad de huella (mm) para los tractores liviano y pesado en LC para 1, 5 y 7 pasadas.

LC	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	43,7 a	39,0 a	47,7 a
TL	41,0 a	38,7 a	42,0 b

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

6.2.2. – Suelo bajo Siembra Directa

De la misma forma que en el sistema bajo LC, luego del tránsito de los tractores, se tomaron los datos de resistencia a la penetración con penetrómetro en el centro de la pisada del neumático. Los datos, así obtenidos, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Valores medios de resistencia a la penetración (kPa), respecto al testigo, medidos para 1, 5 y 7 pasadas de tractor Liviano y Pesado, sobre el suelo bajo Siembra Directa con Alta y Baja carga animal.

Condición de suelo	Siembra Directa							
Tractor	Tractor Liviano							
Carga animal	Alta Carga animal				Baja Carga animal			
Rango de Profundidad (mm)	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo
0 a 150	3190 b	3700 c	3860 d	3000 a	2830 b	3010 b	3350 c	2709 a
150 a 300	3630 a	3710 a	3892 b	3605 a	3030 a	3092 a	3480 b	2990 a
300 a 450	2720 a	2779 a	2801 a	2700 a	2600 a	2670 a	2700 a	2560 a
Tractor	Tractor Pesado							
Carga animal	Alta Carga animal				Baja Carga animal			
Rango de Profundidad (mm)	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas	Testigo
0 a 150	3390 b	3780 c	4001 d	3000 a	2900 b	3200 c	3400 d	2709 a
150 a 300	3900 b	4000 b	4200 c	3605 a	3200 b	3320 b	3600 c	2990 a
300 a 450	3000 b	3100 b	3500 c	2700 a	2890 b	2999 c	3220 d	2560 a

Letras distintas en sentido horizontal, para cada carga animal, denotan diferencias significativas (P < 0,01 Test de Duncan).

En las Figuras 16, 17, 18 y 19 se presentan los incrementos de la resistencia a la penetración, respecto al testigo sin tráfico, para cada tratamiento de tráfico con alta y baja carga animal.

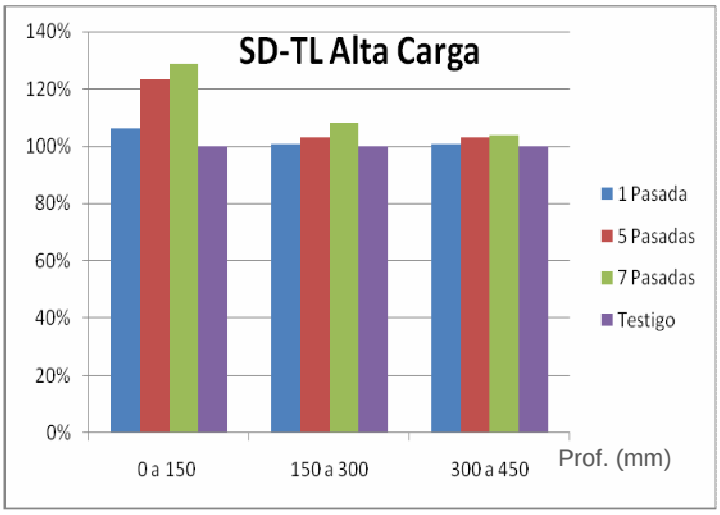

Figura 16: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo, luego del tránsito con tractor liviano en SD con Alta carga animal.

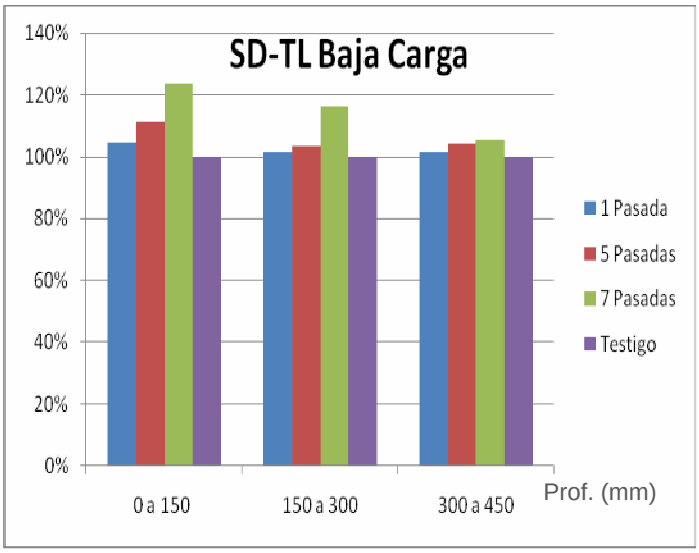

Figura 17: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo, luego del tránsito con tractor liviano en SD con Baja carga animal.

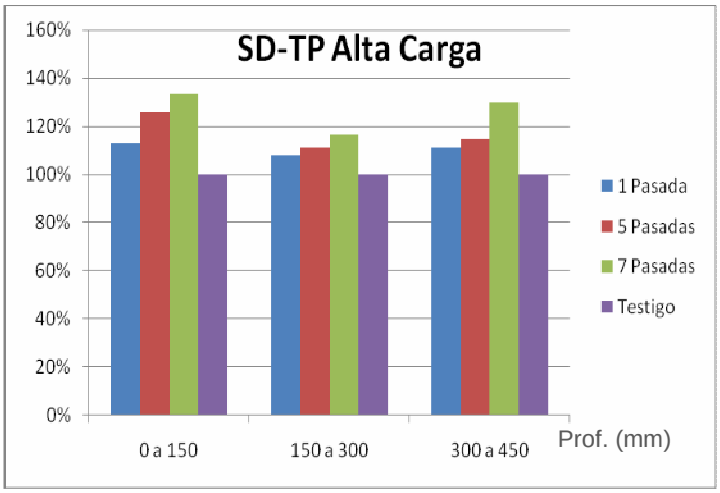

Figura 18: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo, luego del tránsito con tractor pesado en SD con Alta carga animal.

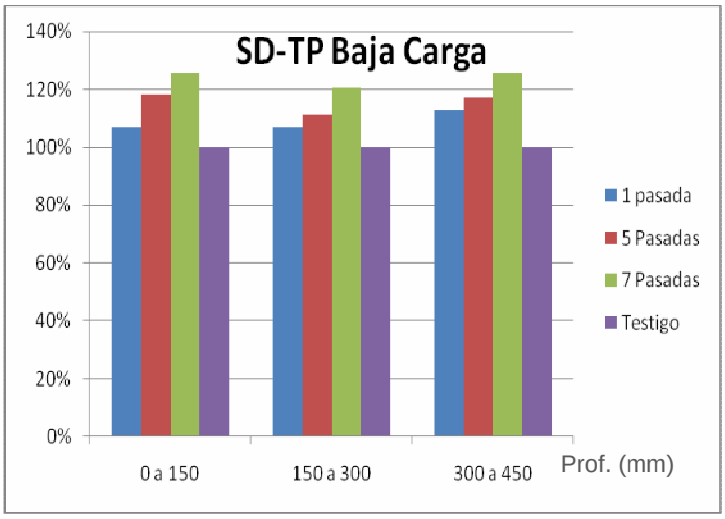

Figura 19: Valores incrementales de resistencia a la penetración respecto al testigo, luego del tránsito con tractor pesado en SD con Baja carga animal.

Al igual que para el parámetro resistencia a la penetración, inmediatamente después del tráfico de los tractores, se tomaron los datos de infiltrometría mediante el método de los anillos en el centro de la pisada del neumático (Tabla 14).

Tabla 14: Valores de Infiltración (cm/h), para los tractores liviano y pesado en SD para 0, 1, 5 y 7 pasadas, con Alta y Baja carga animal.

	Testigo	Baja Carga Animal		
Tractor	0 Pasada	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	9,4	6,9 a	4,2 a	2,5 a
TL		8,5 b	7,8 b	6,3 b
	Testigo	Alta Carga Animal		
Tractor	0 Pasada	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	8,1	5,6 a	3,7 a	2,1 a
TL		7,3 b	4,5 b	3,7 b

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

Finalmente en la Tabla 15 se pueden ver los datos de profundidad de huella para 1, 5 y 7 pasadas de los tractores sobre el suelo bajo SD.

Tabla 15: Valores de profundidad de huella (mm) para los tractores liviano y pesado en SD para 1, 5 y 7 pasadas.

SD	1 Pasada	5 Pasadas	7 Pasadas
TP	23,7 a	22,5 a	24,7 a
TL	9,7 b	11,0 b	8,0 b

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

7. – DISCUSIÓN

De acuerdo a los objetivos e hipótesis de trabajo, en este apartado, se continuará la temática adoptada para tratar los resultados, es decir, se realizará la discusión de los dos sistemas por separado.

7.1.- Suelo bajo Labranza Convencional

La Tabla 4 muestra los valores de humedad del perfil del suelo hasta los 450 mm de profundidad. Como se puede ver no hubo diferencias significativas para todo el perfil del suelo bajo estudio. Esto es muy importante ya que los resultados obtenidos luego del tráfico del tractor, en el parámetro resistencia a la penetración (Tablas 7 a 9), desde el punto de vista estadístico, se deben al impacto del mismo y no al factor humedad del suelo. Al mismo tiempo coinciden, en parte, con las conclusiones alcanzadas por Botta (2000), en cuanto a que, en forma independiente del peso en el eje, el pasaje reiterado induce compactación subsuperficial del suelo. Pese a que el peso en los ejes de ambos tractores, superan los 30 kN delantero y los 40 kN en el trasero, solo el tractor Zanello (Pesado), en su eje delantero supera los 50 kN sugeridos por Håkansson y Danfors (1981) para limitar la compactación al nivel superficial del suelo. La compactación no pudo limitarse a dicho nivel, tal como fuera sugerido por Van den Akker (1998). Sin embargo, el mismo condiciona dicha posibilidad a la utilización de rodados de gran superficie de apoyo, como es el caso del tractor pesado. Las presiones medidas, en el área de contacto rueda/suelo (Tabla 5), fueron superiores a las estimadas en el trabajo antes citado y podrían también, en parte, ser responsables del problema de compactación superficial del suelo. La presión en el área de contacto para el rodado delantero en ambos tractores, fue superior también a las indicadas por Sánchez-Girón Renedo (1996), quien recomendó no superar 45 kPa, cuando el número de pasadas que se realizan sobre el terreno se encuentra entre 5 y 10; y mayor a los 50 kPa sugeridos por Alakukku (1996) para el tránsito de tractores en inadecuadas condiciones del suelo.

Los efectos de la compactación, producidos por el tránsito de los tractores, llegaron a los horizontes subsuperficiales, aún con cargas en el eje inferiores a las indicadas por Håkansson y Danfors (1981). La humedad presente en los horizontes, al momento de la realización del tránsito, unido a la textura de los mismos (Meek, 1996), pudieron haber favorecido que la compactación se produjese ante las sucesivas pasadas no solamente a nivel superficial, como sugieren Botta et al. (2002), sino también en estratos más profundos del perfil.

En este tipo de condición de suelo, el tránsito de la maquinaria tiene mayor afectación, por el hecho de que el mismo se encuentra menos estructurado dado el tipo de secuelas que produce la LC. Agronómicamente, a lo antes mencionado, se define con el término de baja capacidad portante del suelo. De ahí, que se observen diferencias significativas en cada pasada de los tractores.

La reacción del suelo, ante el aumento del número de pasadas y las diferentes cargas animales, determinó que los mayores incrementos en el parámetro resistencia a la penetración se produjeran en el intervalo de 0 – 150 mm de profundidad (Figuras 12, 13, 14 y 15), luego de una sola pasada de los tractores. Este resultado, no coincide con lo encontrado por Botta (2000) quien señala que, independientemente del peso en el eje, el pasaje reiterado induce compactación subsuperficial del suelo.

El tráfico de los tractores y el pisoteo animal produjo resultados diversos, en los parámetros resistencia a la penetración y la infiltración, según el número de pasadas realizado, para 1, 5 y 7 pasadas, y la carga animal utilizada. Los testigos difieren, en dichos parámetros, entre las diferentes cargas animales, por el hecho de que éstas fueron una fuente de compactación, per sé. Los valores más elevados de resistencia a la penetración correspondieron a la parcela con alta carga animal.

Al utilizar el tractor pesado, se hallaron diferencias altamente significativas en todos los tratamientos, tanto para una carga animal alta como baja, respecto al testigo.

Con el tractor liviano, en tanto, dichas diferencias se verifican, en todo el perfil, cuando se efectuaron 7 pasadas de maquinaria.

Los mayores efectos del tráfico fueron en el intervalo de 0 a 150 mm de profundidad (Figura 12) con picos incrementales, citando valores máximos para el tractor liviano de 66% en alta carga animal y 80% en baja carga animal; y de 105% y 168% para el tractor pesado en alta y baja carga animal respectivamente. Los efectos del tráfico disminuyen a medida que aumenta la profundidad, y el número de pasadas adquiere relevancia. Para el tratamiento de alta carga animal, esto se verifica con la diferenciación de los valores respecto al testigo recién luego de 5 pasadas en los 150 a 300 mm de profundidad y luego de 7 pasadas recién a los 300 a 450 mm. Lo que comprueba que el número de pasadas influye en la compactación subsuperficial. Puede verificarse que al haberse sometido al suelo previamente, a una alta carga animal, aumentó su capacidad portante, por lo cual el paso del tractor no tuvo mayores consecuencias. A diferencia del tratamiento con baja carga animal donde las variaciones se constatan a mayor profundidad

a medida que aumenta el número de pasadas del tractor, generando diferencias en todas las pasadas hasta los 300 mm. Sucediendo lo mismo con los dos tipos de tractores utilizados, solo que el tractor pesado afecta en toda la profundidad explorada, lo que comprueba que la compactación subsuperficial depende del peso del equipo y su profundidad de afectación es directamente proporcional a dicha variable y al número de pasadas.

Esto se podría explicar de la siguiente manera, es probable, que luego de las 5 pasadas, el número de pasadas reemplace al factor peso en la responsabilidad de la compactación subsuperficial del suelo, tal como fue concluido por Botta et al. (2002) y Jorajuría (2001).

En todos los tratamientos de tráfico se superaron, a nivel superficial, el valor de 800 kPa, mencionado por Collis-George (1985), como posible de afectar la emergencia de cultivos. Con tractor liviano, en baja carga animal, el tratamiento 7 pasadas sobrepasó el valor de 1500 kPa, al igual que el de 1 pasadas para tractor pesado; sin embargo, para el tractor liviano la excepción fue para 5 pasadas en baja carga animal. Mientras que 1 pasada superó el valor crítico en el intervalo de 150 – 300 mm (Tabla 10) para baja carga animal. Debe aclararse que estos valores fueron superados en alta carga animal en toda la profundidad analizada. Es necesario destacar que el valor de 1500 kPa, generalmente es indicado como capaz de producir una disminución en la tasa de crecimiento radical (Carter, 1988). Los diferentes niveles de profundidad, para 1, 5 y 7 pasadas de tractor, donde se supera este valor crítico, podrían estar muy relacionados a la profundidad de huella de cada tratamiento de tráfico. En la Tabla 12, se puede ver que las medidas de profundidad de huella que arrojó cada tratamiento de tráfico se diferenciaron significativamente solamente al pasar 7 veces. Los valores más profundos se verifican en el tractor pesado, habiendo arrojado un valor de 47,7 mm para las 7 pasadas, contra los 42 mm que arrojo en las mismas pasadas el tractor liviano.

La infiltración en el suelo testigo sin tránsito, tuvo registros elevados cotejándose un valor promedio de 16,1 cm/h en Baja carga animal, diferenciándose del tratamiento de Alta carga animal de menor valor, explicado por la compactación que produce el ganado (Tabla 14). La homogeneidad en el estado mecánico del testigo, con un coeficiente de variación del 1,2 %, podría indicar que los efectos del paso de la maquinaria previo a la realización de este ensayo afectan en el largo plazo a la totalidad de la superficie del suelo bajo cultivo, tal como afirmaron Gaultney et al. (1982).

Siguiendo con el parámetro infiltración, los tratamientos con ambos tipos de tractores se diferenciaron estadísticamente entre sí tanto en Alta como en Baja carga animal, siendo los mayores valores de infiltración para el tractor liviano. Con tractor pesado en alta carga animal, se pueden cotejar valores notablemente inferiores. Verificándose un decrecimiento de la infiltración de 5 a 7 pasadas. Pareciera ser que este parámetro se comportó metodológicamente con menor sensibilidad para detectar las alteraciones producidas en el terreno por el tránsito del tractor, que la resistencia a la penetración. Esta mayor sensibilidad del valor de resistencia a la penetración para buscar una vinculación al incremento de la compactación, podría deberse a que los intervalos considerados en la medición son mucho menores en el caso del penetrómetro usado (25 mm) que en el del cilindro para la infiltración (150 mm).

Según los resultados obtenidos, el número de pasadas tiene una relación muy marcada con la profundidad a la cual manifiestan los efectos del tránsito reiterado en una misma senda tal como lo indicara Danfors (1994). Coincidiendo con Jorajuría (2001) y Botta et al. (2002) 5 pasadas surge como el número crítico a partir del cual, el número de pasadas reemplaza al factor peso, como causante de la compactación subsuperficial del suelo.

7.2.- Suelo bajo Siembra Directa.

Al analizar resistencia a la penetración (Tabla 13) los dos tratamientos de tránsito arrojaron diferencias significativas respecto al testigo, pero hasta distintos niveles de profundidad. Es importante destacar que, para el testigo sin tránsito, en los niveles de 0 a 300 mm, se obtuvieron valores de resistencia a la penetración muy altos, explicados por la alta capacidad portante de dicha condición de suelo. Esto se incrementa con la actividad ganadera comprobando la incompatibilidad de ejercer ambas prácticas en conjunto, la cual genera aún más compactación. Los valores fueron desde 2700 hasta más de 4000 kPa (entre 175 y 200 mm), superando ampliamente los 1000 kPa, citados por Narro Farias (1994) como causantes de la reducción del crecimiento radical. Este dato, no es menor, ya que dicha profundidad es crítica para la germinación y emergencia de la semilla. Igualmente dichos valores son muy elevados para una zona del perfil del suelo (0 a 350), donde proliferan las raíces de un gran número de cultivos. En toda la profundidad estudiada, se superó el valor de 1.500 kPa, mencionado por Threadgill (1982) como factor de detención en el crecimiento radical.

Si se tienen en cuenta, para el testigo, los valores de humedad (Tabla 4) e

infiltrometría (Tabla 14) en conjunto con los resultados de resistencia a la penetración, podría aseverarse que el testigo presenta un grado de pre-compactación que resultaría limitante para el desarrollo radical 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 podría atemperar, junto a los residuos de cosecha de maíz sobre la superficie del suelo (Torbert y Reeves, 1995), los efectos negativos del tráfico de vehículos. Los tratamientos con tractor pesado, en ambas cargas animales, aumentaron significativamente los valores del testigo en todo el perfil de suelo bajo estudio. Por otra parte, los incrementos de la resistencia a la penetración, para este tratamiento, fueron en valores absolutos relativamente uniformes, sin que se detectaran zonas de incremento diferencial. Los tratamientos de 1 y 5 pasadas solo produjeron diferencias significativas hasta los 150 mm de profundidad con tractor liviano en ambas cargas animales. Sin embargo con tractor pesado, tuvo implicancias a mayor profundidad con 1 y 5 pasadas, verificándose incrementos hasta los 450 mm.

Esto corrobora, que a pesar de la alta capacidad portante de dicha condición de suelo, el peso del tractor es capaz de generar aun más compactación.

Estos resultados confirmaron lo informado por Jorajuría (2001) en lo referente a la posibilidad de inducir compactación a nivel subsuperficial con tractores de bajo peso/eje, menores a 50 kN/eje. Sin embargo, no se comprueba claramente que la profundidad del horizonte del suelo que reacciona con un mayor incremento de resistencia a la penetración, disminuya en la medida que aumenta el número de pasadas. Lo antedicho no ocurre al comparar los tres tratamientos de 1, 5 y 7 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 50kN/eje. 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 que determinaron que las presiones de contacto estimadas fueran muy elevadas para el tractor liviano.

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 maíz. Esto implica que las máquinas sembradoras tendrán que trabajar sobre un sustrato que ofrecerá un alto grado de

resistencia a la penetración 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, coincidiendo con lo mencionado por Jorajuria (2001).

La infiltrometría del suelo en el testigo sin tránsito (Tabla 9) registró valores bajos de 10,4 cm/h, respecto de la condición de suelo de LC; determinado las diferentes condiciones mecánicas del suelo. Además se pueden encontrar diferencias entre los testigo para Baja y Alta carga animal, siendo esta última de valores menores, corroborando la compactación generada sólo por el ganado. En general, ambos tractores, para los tres tratamientos de tráfico disminuyeron la infiltración respecto al testigo en ambas cargas animales. Hay que destacar que la disminución de este parámetro, producidos por el tránsito, principalmente del tractor pesado, fue siempre mayor para el tratamiento de 7 pasadas (Tabla 14). Sin embargo en este tipo de condición mecánica del suelo, la infiltración presentó valores bajos en todos los tratamientos, lo que permite diagnosticar una alta compactación; sin que refleje valores tan sensibles como la penetrometría.

En referencia a la profundidad de huella (Tabla 15) sucede igual que para el suelo bajo LC, el tractor pesado produce mayor profundidad de huella que el liviano ($P < 0,01$) siendo la mayor para el tratamiento de 7 pasadas (24,7 mm). Es fácil entender que las menores profundidades de huella, respecto de LC, en esta condición de suelo se deben a la alta capacidad portante del mismo.

Desde este punto de vista, la roturación del suelo en la línea de siembra y la limitación del ganado en estos lotes constituyen, según lo visto, dos factores de fundamental importancia para el éxito en la utilización de la técnica de SD. Para la roturación existe un buen número y variedad de cuchillas labrasurcos que deben ser utilizadas según el tipo de rastrojo y el suelo a trabajar. Finlay et al. (1994) señalaron que el suelo debe ser roturado por debajo de la profundidad de siembra, para lograr, de esta manera, las condiciones óptimas para la germinación y emergencia de la semilla.

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 sólo disco plano angulado que resuelve las funciones de corte de residuos y apertura del surco. Al considerar el

parque de maquinaria utilizado en la técnica de SD (tractor, sembradoras pulverizadoras y cosechadoras) es muy importante disminuir la presión en el área de contacto rueda/suelo de estas maquinarias. Esto se logra aumentando el ancho de pisada del neumático (cambiándolo) o utilizando la presión de inflado que corresponda según el peso que soporta el mismo, tanto en tractores como en sembradoras y pulverizadoras. En este trabajo surge claramente que los altos valores de presión en el área de contacto rueda/suelo y la profundidad de huella fueron los determinantes del incremento en el índice de cono en los primeros 150 mm del perfil. Puesto que los tractores poseen una carga sobre el eje trasero superior a los 30 kN, la única alternativa posible es el incremento del tamaño de los neumáticos, junto a la disminución del número de pasadas del tractor.

8. – CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

8.1.- Consideraciones Finales

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

Para el sistema bajo SD, la tendencia que siguieron los valores de resistencia a la penetración e infiltrometría, luego del tránsito, fue bastante similar para los tres tratamientos. Sin embargo los tres tratamientos 1, 5 y 7 pasadas, se diferenciaron significativamente del testigo hasta niveles diferentes de profundidad. Al mismo tiempo los valores de dichos parámetros, generados por los tres tratamientos de tránsito, estuvieron siempre por encima de los recomendados para realizar una producción sustentable en el tiempo. Esto significa que no existe evidencia que permita validar la hipótesis 1 pero existen datos suficientes para refutar esta hipótesis. Por los antes mencionado, se aporta suficiente evidencia para refutar la **hipótesis 1.**

Al comparar los valores e incrementos de la resistencia a la penetración y de la infiltración luego del tránsito con alta y baja carga animal, en los dos sistemas bajo estudio, se encontró que el impacto del tránsito y el pisoteo animal fue siempre menor en el suelo trabajado bajo SD, siendo mayor en el suelo bajo LC; proporcionándose suficiente evidencia como para validar la **hipótesis 2.**

8.2- Conclusiones.

- Al aumentar el número de pasadas, con tractores de más de 50 kN de peso total, se induce compactación subsuperficial del suelo.
- El sistema de siembra directa no es capaz de limitar la compactación inducida por tráfico ante situaciones de alta intensidad de tránsito.
- El sistema de siembra directa es incompatible con la práctica ganadera.
- La alta presión en la zona de contacto rueda/suelo junto al número de pasadas produce compactación superficial del suelo.
- Las tres intensidades de tráfico ensayadas compactaron el suelo superficialmente generando condiciones inadecuadas para la germinación y emergencia óptima de la semilla.

9. -BIBLIOGRAFÍA

1. ALAKUKKU, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. Short term effects on the properties of clay and organic soils. Soil & Tillage Research 37: 211-222.
2. ANDRADE, F., CIRILO, A., UHART, S., OTEGUI, M. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. La Barrosa, Argentina, 55 pp.
3. ASAE STANDARDS. 2002. ASAE S313.2 Soil Cone Penetrometer. St. Joseph. Mich.: ASAE. 611 pp.
4. ASOCIACIÓN ARGENTINA FABRICANTES DE TRACTORES. 2001.
5. BLANCHER, G.R., NELSON, W.W., ALIMARAS, R.R., 1978. Persistence of subsoil compaction in a mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 943 - 948.
6. BOLETÍN 1881. 1977. Universidad de California. "Compaction of soil by Agricultural Equipment". Division of Agricultural Scienses. UCA. pp. 59.
7. BOTTA G. 2000. Distribución subsuperficial de la compactación inducida por el tráfico agrícola. Tesis Doctoral, Dpto. de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Luján, Argentina 201 pp.
8. BOTTA G., JORAJURIA D., BALBUENA R., ROSATTO H., 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.
9. BOTTA G., JORAJURÍA D., BALBUENA R., RESSIA M., FERRERO C. 2006 a. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the rolling pampas region of Argentina. Soil and Tillage Research 86/1 9 – 14.
10. BOTTA G., JORAJURÍA D., BALBUENA R., RESSIA M., FERRERO C., ROSATTO H., TOURN M. 2006 b. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (Helianthus annus L.) yields. Soil and Tillage Research 91/ 164 – 172.
11. BOTTA G., JORAJURIA D., DRAGHI L. 1997. Responsabilidad del peso y la presión en la compactación de suelos labrados Parte II Cama de siembra. En Congreso Brasileiro de Engeneria Agrícola, 6 pp.
12. BOTTA G., POZZOLO O., BOMBEN M., ROSATTO H., RIVERO D., RESSIA M., TOURN M., SOZA E., VÁZQUEZ J. 2007. Traffic alternatives in harvest of soybean

(*glycine max* l.): effect on yields and soil under direct sowing system. Soil and Tillage Research 96/145 – 154.

13. 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.

14. BOTTA, G., RIVERO, D., POZZOLO O., TOURN M., BELLORA MELCON F., NARDON G., BALBUENA R., TOLÓN BECERRA A., ROSATTO H., STADLER S. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and bias - ply tyres in two soil conditions: conventional tillage and direct sowing. Soil and Tillage Research 101/44 – 51.

15. BOTTA, G., TOLÓN BECERRA, A., BELLORA MELCON F. 2009. Effect on soil compaction produced by traffic on four tillage regimes. Soil and Tillage Research 105/128 – 134.

16. BOTTA, G., TOLÓN BECERRA, A., LASTRA BRAVO X., M. TOURN. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean *(glycine max l.)* yields in Argentinean Pampas. Soil and Tillage Research 110/167 – 174.

17. 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.

18. BURT, CM. 1995. El Manual de riego por superficie – Una guía completa para el diseño y operación de sistemas de riego superficial. Industrias Waterman. Exeter, CA. 373 p.

19. CARTER, M. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening tillage studies. Canadian Journal of Soil Science 68 (4): 657-668.

20. CASSELL, D., K. y 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.

21. COLLIS-GEORGE, N., YOGANATHAN, P. 1985. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat (Triticum aestivum L.) II. High shear strenght conditions. Aust. J. Soil Research 23, 589-601.

22. DADDOW, R., WARRINGTON, G. 1984. 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.

23. DANFORS, B. 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. Soil and Tillage Research 29: 135-144.

24. DOMÍNGUEZ, J., RESSIA, J., JORAJURÍA, D., BALBUENA, R., MENDIVIL, G. 2000. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. Avances en Ingeniería Agrícola. II Congreso Americano de Ingeniería Agrícola. pp. 110-115.

25. DRAGHI, L., JORAJURÍA, D., BALBUENA, R. 1989. La compactación superficial y subsuperficial de un perfil debida al tráfico repetido. Rivista di Ingenería Agraria, 20 (2): 93-98.

26. DWYER, M., FEBO, G. 1987. Agricultural Tyre Hanbook. Editor: Institute of Agricultural Engineering. West Road, Silsoe, Bedford, UK. 32 pp.

27. 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 and Tillage Research 29, 215-225.

28. GAULTNEY, L., KRUTZ, G., STEINHARDT G., LILJEDAHL. J. 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. Transactions of the ASAE 25: 563-569, 575.

29. HÅKANSSON, I. 1994 Subsoil compaction caused by heavy vehicles. A long-term threat to soil productivity. Soil and Tillage Research 29: 105-110.

30. 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.

31. HÅKANSSON, I., REEDER C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. Soil and Tillage Research. 29: 277-304.

32. IBÁÑEZ, G., BOTTA G. 2004. Compactación del suelo producida por el tránsito del tractor agrícola. Trabajo final de aplicación, UNLu. Pp 53.

33. JORAJURÍA D., 2001. Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular agrícola. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España. 135 pp.

34. LAL, R., MAHBOUBI, A., FAUSEY N. 1994. Long-term tillage and rotation effects on properties of a Central Ohio soil. Soil Science Society of America Journal. Vol 58: 517-522.

35. LANCAS, K., SANTOS FILHO, A., UPADHYAYA, S. 1996. Energy and time savings using “low-correct” inflation pressure in radial ply tractors tyres. Euro. Ag. Eng. Paper 96A-021.

36. LEIVA, P., HANSEN, D. 1984. Las resistencias mecánicas del suelo y el desarrollo radicular con distintos sistemas continuos de labranza. Carpeta de producción vegetal. Estación Experimental de Pergamino INTA. Argentina. 4: 181-185.

37. LITTLE, T., HILLS, M.1990. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura, pp 276. Trillas, México.

38. MAZZUCO, L., A. 1978. El piso de arado un problema de suelo que afecta el rendimiento del cultivo. Comunicación de Extensión AER INTA, Bolívar, Pcia. de Bs.As., Argentina. pp. 10.

39. MEEK, P. 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. Technical report Forest Eng. Res. Inst. of Canada. N° TR117, 12 pp.

40. NARRO FARIAS, E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola, pp 201. Trillas, México.

41. NASR, H.M., SELES F. 1995. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. Soil & Tillage Research 34, 61-76.

42. NEME, A., M. 2000. Compactación de suelos en el cultivo de tabaco. Revista de la UNJU. pp 66.

43. PANIGATTI, J., L. 1964. "Aspectos del uso y la conservación del suelo en el Departamento de Castellanos, Santa Fe: Revista IDIA suplemento Nro. 13. pp. 25 -36.

44. PURICELLI, C.A. 1985. Los recursos naturales en el norte de Buenos. Aires. Jornadas Nacionales de Manejo y Conservación de Suelos - Pergamino, Argentina. P 1 – 172.

45. QUIROGA, A.R., BUSCHIAZZO, D.E., PEINEMANN, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. Soil Till. Res. 52, 21- 28.

46. SÁNCHEZ-GIRÓN RENEDO, V., 1996 Dinámica y Mecánica de suelos. Ed: Agrotécnicas, Madrid, España, 426 pp.

47. SECRETARÍA DE AGRICULTURA GANADERÍA Y PESCA. 1995. El deterioro de los suelos en la República Argentina. pp 203.

48. SENIGAGLESI, C., FERRARI, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. Crop Science. 33: 27-35.

49. SMITH, D.L., DICKSON, J.W. 1990 Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research 46: 13-29.

50. SOANE, B.D., DICKSON, J. W., CAMPBELL, D. J. 1982. Incidence and control in crop production. Soil and Tillage Research, 2: 3 – 36.

51. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1994. Keys to Soil Taxonomy. 6th. edition, Soil Survey Staff, USDA, USA.

52. SOZA, E., BOTTA, G., TOURN, M. 2003. Eficiencia de implantación en relación a la compactación del suelo al momento de la siembra. Revista Agro-Ciencia, Chile 19: 121 – 128.

53. TAYLOR, J., BURT, E.C. 1976. Radial Tire Performance in Firm and Soft Soils. ASAE, St. Joseph, MI 49085. ASAE Paper No. 76-1036, pp. 1062–1064

54. TAYLOR, J., TROUSE, C., BURT, E., BAILEY, A. 1982. Multipass Behavior of a Pneumatic Tire in Tilled Soils. Transactions of ASAE. Vol. 25 1229 – 1236.

55. THREADGILL, D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. Transactions of the ASAE 25, 859-863.

56. TORBERT, H., REEVES, D. 1995. Traffic and residue management systems: effects on fate of fertilizer N in corn. Soil & Tillage Research. 33, 197-213.

57. VAN DEN AKKER, J. 1998. Prevention of subsoil compaction by defining a maximum wheel load bearing capacity. En: Soil compaction and compression in relation to sugar beet production. Editors: Märländer, B., Tijink, F.J., Hoffman, C. & Beckers, R. 1, 55-66.

58. VEIHMEYER, J., HENDRICKSON A. 1948. Soil density and root penetration. Soil Science 65, 487-493.

59. 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.