

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
“Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo”

**EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN EDAFICA
CAUSADA POR EL TRANSITO BAJO SIEMBRA
DIRECTA EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO
DEL SUELO**

Alumno: JUAN JOSE GLAMUZINA
D.N.I: 27.871.197

Director: CARMEN CHOLAKY
Co-director: JOSE CISNEROS

Río Cuarto-Córdoba
Agosto/2008

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN EDAFICA
CAUSADA POR EL TRANSITO BAJO SIEMBRA
DIRECTA EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO
DELSUELO**

**Autor: JUAN JOSE GLAMUZINA
D.N.I: 27.871.197**

Director: CARMEN CHOLAKY

Co-director: JOSE CISNEROS

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del
Jurado Evaluador:**

.....
(Nombres)
.....

Fecha de presentación:/...../.....

Aprobado por Secretaría Académica:/...../.....

.....
Secretario Académico

INDICE

<u>Índice de texto</u>	Página
Resumen	1
Summary	2
Introducción	3
Problema a estudiar	3
Antecedentes.....	4
Origen de la compactación.....	4
Efectos del tránsito sobre la compactación	6
Efectos de la compactación sobre los cultivos.....	7
Hipótesis.....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos.....	10
Materiales y métodos	11
Área de estudio	11
Tratamientos.....	11
Variables estudiadas	14
Caracterización del suelo	14
Morfología del perfil.....	14
Curvas de capacidad hídrica	15
Constantes de atterberg.....	15
Materia orgánica.....	16
Máxima compactación.....	16
Cobertura superficial y peso del rastrojo	16
Evaluación de los tratamientos.....	16
Densidad aparente.....	16
Porosidad total.....	17
Compactación relativa.....	17
Resistencia mecánica.....	18
Humedad.....	18
Análisis estadísticos de los resultados	18

Resultados y discusión	19
Contenidos hídricos de los distintos tratamientos al momento de realizarse el tránsito.....	19
Densidad aparente.....	21
Análisis del comportamiento de la DAP, en cada tratamiento, según diferentes estratos de profundidad.....	23
Intervalo 0-5 cm.....	23
Intervalo 5-10 cm.....	24
Intervalo 10-15 cm.....	25
Intervalo 15-20 cm.....	26
Intervalo 20-25 cm.....	27
Intervalo 25-30 cm.....	28
Porosidad total.....	28
Compactación relativa.....	29
Resistencia mecánica.....	31
Análisis del comportamiento de los distintos tratamientos frente al tránsito de la maquinaria teniendo en cuenta la variable resistencia mecánica.....	33
Intervalo 0-5 cm.....	33
Intervalo 5-10 cm.....	34
Intervalo 10-15 cm.....	34
Intervalo 15-20/20-25/25-30 cm.....	35
Análisis comparativo entre el comportamiento de la DAP y RM.....	35
Conclusión	37
Recomendaciones	38
Bibliografía	39
Anexo	46

Índice de tablas

Análisis estadístico sobre los distintos contenidos hídricos del suelo en cada estrato estudiado, al momento de realizar los tratamientos.....	20
Comportamiento de la DAP, frente a los distintos tratamiento, frente a los distintos tratamientos y profundidades estudiadas	22

Comportamiento de la RM, frente a los distintos tratamientos y profundidades estudiadas.....	32
--	----

Índice de gráficos y esquemas **Página**

Diseño experimental.....	14
Perfil de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos.....	19
Perfil de la DAP, en función de la humedad al momento del tránsito, en los distintos tratamientos bajo estudio.....	21
Valores alcanzados de PT, en función de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos bajo estudio.....	29
Valores alcanzados de CR, en función de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos bajo estudio.....	30
Perfil de RM en función de la humedad al momento del tránsito.....	31
Perfil de la DAP y RM expresados en valores porcentuales hasta la profundidad de 20 cm	36

Índice de fotos **Página**

Estado del lote en el cual se realizó la experiencia.....	11
Aplicación del tratamiento.....	12
Detalle de la huella.....	12
Tractor utilizado en la experiencia.....	13
Caracterización del perfil.....	15
Caracterización del perfil.....	15
Sonda de rayos gamma para la medición de la DAP.....	17
Penetrómetro computadorizado para la medición de la RM.....	18
Nivel de cobertura que presentaba el lote y huellas producidas por el transito.....	24

Índice del anexo **Página**

Características edáficas del sitio experimental hasta la profundidad estudiada.....	46
Datos para la estimación del nivel de cobertura superficial por el método de la Transecta.....	47

Datos para la estimación del nivel de cobertura superficial por el método del peso.....	47
Determinación del límite líquido con el cascador de casagrande.....	47
Análisis estadístico sobre la variable RM como respuesta a los tratamientos.....	48
Análisis estadístico sobre los distintos contenidos hídricos del suelo en el momento de realizar los tratamientos.....	48
Análisis estadístico sobre la variable DAP como respuesta a los tratamientos.....	49
Datos de la DAP obtenidos como resultados de los distintos tratamientos.....	49
Datos de PT obtenidos como resultado de los distintos tratamientos.....	50
Datos de la CR obtenidos como resultado de los distintos tratamientos.....	50
Resultados graficados del ensayo PROCTOR para los horizontes A y AC.....	51

RESUMEN

EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN EDAFICA CAUSADA POR EL TRANSITO BAJO SIEMBRA DIRECTA EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO

El objetivo de este trabajo fue evaluar la incidencia del tránsito agrícola sobre las propiedades físicas de un suelo bajo siembra directa, en función del contenido hídrico del mismo, al momento de realizarse el tránsito. La compactación se cuantificó a través de la densidad aparente (DAP), resistencia mecánica (RM), compactación relativa (CR) y porosidad total (PT), posteriormente al tránsito del tractor, dejando un testigo sin transitar. Los tratamientos consistieron en realizar ocho pasadas de tractor sobre una misma senda en tres condiciones de humedad edáfica: seco (S), con un contenido hídrico próximo a 15 Bares (11 \% g g^{-1}), capacidad de campo (CC), con una humedad próxima a 0,3 Bares (21 \% g g^{-1}) y mojado (M), cuando la humedad fue superior a la de 0,3 Bares (26 \% g g^{-1}). La DAP y la RM alcanzaron valores umbrales para el desarrollo radicular en M hasta los 20 cm y 15 cm de profundidad, respectivamente. En CC este incremento se manifestó sólo hasta los 5 cm de profundidad, mientras que S se comportó de manera similar al Testigo. La CR y la PT siguieron igual tendencia que la DAP, alcanzando sólo la primera, valores críticos para el desarrollo vegetal. Se concluye que a medida que aumenta el contenido hídrico del suelo al momento de realizarse el tránsito, aumentan los valores de las variables en estudio. Además el aumento obtenido en la resistencia mecánica es mayor que el obtenido en la densidad aparente, por lo que la resistencia mecánica es la variable más sensible frente al tránsito agrícola.

Palabras claves: compactación superficial, densidad aparente, resistencia mecánica, siembra directa, tránsito.

SUMMARY

EVALUATION OF COMPACTACIÓN EDAFICA CAUSED BY THE TRANSIT SEEDING DIRECT IN RELATION OF THE CONTENT HÍDRICO SOIL

The aim of this study was to evaluate the incidence of agricultural traffic on the physical properties of soil under tillage, depending on the water content of the same, at the time of the transit. The compaction is quantified through the bulk density (DPA), mechanical resistance (MR), compaction on (CR) and total porosity (PT), subsequent to passage of the tractor, leaving a witness without transiting. Treatments were conducting by eight tractor passed on the same path in three dry soil moisture conditions (S), with a water content near 15 Bars (11% g g⁻¹), field capacity (CC), with a moisture close to 0.3 Bars (21% g g⁻¹) and wet (M), when the humidity was higher than that of 0.3 Bars (26% g g⁻¹). The DAP and MR reached critical for root development at M to 20 cm and 15 cm respectively. In CC said this increase is only up to 5 cm depth, while S behaved in a manner similar to Witness. The CR and the PT followed the same trend as DAP, reaching only the first, critical values for the plant development. It is concluded that with the increasing water content of soil at the moment of the transit, increase the values of the variables under study. Furthermore, the increase obtained in the mechanical resistance is bigger than obtained in bulk density, and the mechanical resistance is the variable most sensitive than agriculture transit.

Keywords: surface compaction, bulk density, mechanical resistance, direct seeding, agriculture transit.

INTRODUCCION

1 Problema a estudiar

En la Republica Argentina la producción de granos es del orden de 95.000.000 Tn, las exportaciones de granos constituyen uno de los pilares de la economía del país, ya que le aportan u\$s 9.500.000.000 (AAPRESID, 2007).

El deterioro de los suelos de nuestro país cubre un 40% de la superficie total y esta afectada por distintos procesos de degradación (INTA, 1998). Los procesos de degradación química y particularmente la física, son los mas comunes y difundidos de la Región Pampeana como consecuencia de la agricultura rutinaria y no restitutiva, resultado de la intensificación de los sistemas de producción (Gerster et al., 2005).

Actualmente, más de 26 millones de hectáreas se encuentran bajo el sistema de siembra directa, lo cual representa el 43% de la superficie cultivada Argentina (AAPRESID, 2007).

Si bien la concepción de esta práctica es que tiende a mejorar la conservación del recurso suelo, coexisten resultados contradictorios en cuanto a la evolución y persistencia de la compactación que sufren los mismos.

En este sentido, Unger (1996) indicó que se debe tener particular interés en el seguimiento de la densidad aparente (DAP) y la resistencia mecánica (RM), puesto que ambos factores pueden modificar la infiltración, el crecimiento radical y el rendimiento de los cultivos.

De igual manera (Liebij et al., 1993) encontraron que los sectores traficados por los implementos agrícolas presentaban incrementos en la DAP y la RM.

La compactación es un proceso de degradación estructural de suelos agrícolas con incidencia en diversas regiones del mundo (Soane y Van Ouwerkerk, 1994).

Para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil es función de la carga aplicada, la presión ejercida por el rodado, el estado de humedad y la intensidad de tránsito recibida (Rapper □□Erbach, 1990).

El suelo puede sufrir más daño por su contenido de humedad que por el efecto de las diferencias en el peso de los tractores, el tamaño de los neumáticos o

las presiones sobre el terreno (Bryan et al., 1982), los mismos citan que cambios en el contenido de humedad de un 2 a un 3 por ciento influyen considerablemente sobre el daño que sufre el suelo.

Según estudios realizados, sobre un Argiudol ácuico Serie Armstrong, las mermas de rendimientos ocasionadas luego del tránsito en húmedo, son de 8 qq/ha en soja, 10 qq/ha en maíz y 6 qq/ha en trigo (Bacigaluppo y Gerster, 2002).

2 Antecedentes

2.1 Origen de la compactación

Los suelos de la provincia de Córdoba se caracterizan por presentar granulometrías con predominio de partículas esqueléticas finas (70% entre 20-100 micras) (Bricchi et al., 1993). Con relación a esto, Carter (1988) sostiene que los suelos con elevada relación arena fina/gruesa y bajo índice de plasticidad, son inestables y fácilmente compactables.

La degradación física es un proceso generalizado en el sur de la provincia de Córdoba; ya en 1987 se mencionaba la necesidad de mejorar la condición física de 760.000 ha del departamento de Río Cuarto, (Cantero et al., 1987)

Cisneros et al. (1997) midieron el grado de deterioro físico de los suelos maniceros de esta región, y al compararlo con una situación no alterada encontraron que presentaban un nivel de alteración de su condición física de entre un 85 y el 95%, manifestándose por la presencia de panes antropicos.

Las presiones aplicadas sobre un suelo que exceden a su preconsolidación inducen a cambios químicos, físicos y biológicos (Hartge y Acornea, 1999).

Gaultney et al. (1982) atribuyen la compactación del suelo en parte al paso de rejas o discos sobre el mismo, pero principalmente al paso de las maquinarias, que según ellos cubren al menos una vez la superficie, durante un ciclo de cultivo.

En el pasado, el uso de tracción animal y tractores a vapor fueron causantes principales de la compactación de suelos. Con el desarrollo de los motores de combustión interna, la carga sobre los suelos decreció progresivamente hasta la década de los 60, cuando comenzó un proceso de incremento en el tamaño y peso de las máquinas agrícolas. En el presente, el uso de grandes tractores con ruedas

proporcionalmente más pequeñas que en el pasado, está generando importantes problemas de compactación de suelos (Freitag, 1979).

El tráfico agrícola con tractores y máquinas de gran peso por eje trae aparejados problemas de compactación a nivel subsuperficial, 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 (Hakansson y Reeder, 1994).

En los suelos saturados la transmisión de las presiones producida con una carga es más isotrópica, debido a la presencia de presiones neutras, es decir, el agua libre del suelo soporta parte de la carga. En estos casos la distribución espacial de las tensiones es homogénea semejante a las presiones hidrostáticas. Pero una vez desplazado el agua debido a un gradiente hídrico, la distribución de las tensiones es anisotrópica porque la propagación de las tensiones se efectúa por los puntos de contacto entre los sólidos (Horn, 1988) (Horn y Lebert, 1994), la distribución de las tensiones producidas por una misma carga depende de la humedad y las propiedades físicas del suelo.

Baver et al. (1982) plantean que la friabilidad es la facilidad del suelo para desmenuzarse y es el estado de humedad que representa la mejor condición para la labranza. La cohesión es baja y la humedad resulta suficiente para minimizar el efecto cementante que domina la consistencia dura y por otro lado no hay agua suficiente para la formación de películas en los contactos entre las partículas y producir la adhesión existente en el estado plástico.

Sin embargo, la compactación subsuperficial, observada en un suelo franco arenoso, fue explicada, en parte, por la coincidencia de los estados de humedad óptimos para la labranza, con los que producen la máxima compactación (Cisneros et al., 1997).

Cholaky, (2003) al estudiar la eficiencia de una labor de descompactación con reja cero sobre un suelo Haplustol típico encontró que cuando esta labor se realiza sobre suelo mojado (contenido hídrico mayor a capacidad de campo) produce un menor grado de aflojamiento y fractura del suelo, a la vez que incrementa la compactación de las capas superficiales.

Håkanson et al. (1988) y (1994), hacen una distinción entre compactación superficial y subsuperficial, la primera involucra a la capa arable y normalmente ocurre por el empleo de maquinaria de bajo peso y presión sobre el suelo (acción agregativa remanente) utilizadas en condiciones de alta humedad o sobre suelos con mayor susceptibilidad a la compactación, y la segunda es la que se trasmite hasta el subsuelo, en profundidades de alrededor de 40 cm pudiendo profundizarse mas por efecto del peso y la potencia de los equipos, su vibración en la marcha, el elevado valor de inflado de sus cubiertas, la alta presión de contacto suelo-cubiertas (lastre agregado), como también el patinamiento.

Alakukku (1997), recomendó que el transito debiera reducirse al mínimo indispensable en condiciones de elevada humedad y los vehículos debieran portar ruedas que le permitan limitar su presión de inflado a una máxima de 50 kPa.

Domínguez et al. (2000) registraron una mayor acumulación de compactación superficial en suelos bajo siembra directa.

Por otra parte, los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo colaboraron en la disminución de los efectos perjudiciales del transito (Torbert y Reeves, 1995).

Meek (1996) indico que en suelos arcillosos son mayores tantos los riesgos de compactar el suelo a niveles que limiten la producción agrícola, como mayor será también la persistencia del daño realizado.

2.2 Efectos del transito sobre la compactación

El desarrollo de condiciones físicas del suelo desfavorables es atribuido, entre otros factores al transito de vehículos asociados con las operaciones del cultivo, indicándose el tipo de equipamiento, la presión en el área de contacto rueda/suelo y la humedad del mismo, como las variables que inciden sobre la profundidad a la cual la DAP y la RM se ven incrementadas (Upadhyaya et al., 1994). El aumento en la magnitud de estas variables depende del tipo y estado del suelo, del número de pasadas y de la carga por eje del vehículo (Botta et al., 2002).

La susceptibilidad a la compactación depende de factores externos e internos del suelo. Los externos se relacionan con el tipo, intensidad, frecuencia y tiempo de aplicación de una carga. Los internos con la distribución granulométrica, tipo de arcilla, contenido de materia orgánica, densidad aparente, agregación, contenido de humedad y propiedades mecánicas (Horn, 1988).

Si se parte de un terrón de suelo fuertemente compactado, no es posible observar a simple vista grandes poros, fisuras o grietas y se considera que este efecto es provocado por el pasaje de las ruedas de un implemento, maquinaria o por el pisoteo animal en condiciones de elevada humedad (Pecorari, 1988), este mismo autor cita que el tenor de humedad que posee el suelo en el momento de efectuarse la compactación es fundamental lográndose una compactación máxima a una determinada humedad del suelo llamada humedad óptima y que este valor representa la mayor compactación que puede llegar a tener este suelo.

El tránsito en húmedo, principalmente durante la cosecha, afecta notablemente las propiedades físicas de los suelos, generando limitaciones al crecimiento de raíces y afectando la movilidad y disponibilidad de agua y nutrientes. Según estimaciones, en nuestro país en años húmedos, el área agrícola con problemas de piso en el momento de la cosecha es de 3 a 4 millones de ha (Bragachini et al., 2000).

Dentro de un lote, la proporción de la superficie del suelo afectada durante la cosecha es alta, solamente los rodados de las cosechadoras cubren entre un 20 y 28% del mismo, si se considera además el tránsito de las monovolvas el área afectada por los rodados puede alcanzar el 40% de la superficie (Gerster et al., 2005).

En cuanto a los efectos del tránsito con altas cargas por eje y el pasaje reiterado en una misma senda, Riley (1994) observó que no existen grandes diferencias en la reducción de rendimientos sobre cebada (*Hordeum vulgare*) entre un solo pasaje con una carga de 26 Mg/eje, con respecto al pasaje repetido cuatro veces de una carga de 14 Mg/eje. Además, informo que la compactación del suelo producto del pasaje repetido cuatro veces del tratamiento de 26 Mg/eje persistió por dos a tres años.

Jorajuría y Draghi (2000) en relación con el pasaje repetido de tractores de baja carga/eje, concluyeron que el pasaje repetido sobre la misma senda puede reemplazar al factor peso sobre el eje con respecto a la responsabilidad de inducir compactaciones en el subsuelo. Jorajuría (2001) indicó, además, que la profundidad del horizonte del suelo que reacciona con un mayor incremento de la DAP, tiende a hacerse más superficial a medida que aumenta el número de pasadas. Por otra parte, identificó diez pasadas como el número crítico de rodadas con las que se pierden las ventajas de traficar con un tractor liviano, como alternativa al trabajo de uno más pesado con menor número de pasadas.

En este mismo sentido, Botta et al. (2002) concluyeron que, en forma independiente del peso y de la superficie de contacto rueda/suelo, el número de pasadas reiteradas en una misma senda inducen compactación subsuperficial del suelo.

Oskoui y Voorhees (1990) demostraron efectos negativos del tráfico como pérdidas de rendimiento de los cultivos debido a la compactación del suelo, reducción del drenaje e incrementos en las pérdidas del agua utilizable, aumento de la erosión del suelo debido a la reducción de la infiltración y mayores costos energéticos producto del incremento en la reacción del suelo ante los trabajos de labranza.

2.3 Efectos de la compactación sobre los cultivos

Bonadeo (1997) evaluó el efecto de diferentes niveles de compactación de un suelo Hapludol típico sobre los componentes del rendimiento del cultivo de maní. Observó que en la situación de alta compactación, la densidad y distribución de raíces en profundidad fue menor que en la condición de baja compactación produciendo disminución en el rendimiento en grano y en el tamaño de los mismos.

El incremento de la RM y la DAP del suelo, puede disminuir el rendimiento de los cultivos, debido a la generación de impedimentos para el crecimiento de raíces, (Erbach, 1982) (Bonadeo, 1997), pudiendo persistir durante varios años (Woorhees et al., 1986)

Los parámetros usualmente utilizados para la medición de los efectos del tráfico con altas cargas sobre las propiedades del suelo son la DAP y la RM

(Alakukku, 1997); de los mismos, el primero ha sido indicado como menos sensible para la determinación de la compactación inducida por tránsito. La compactación inducida por el tránsito de vehículos se detecta con mayor claridad utilizando la evolución de la RM que la DAP (Alakukku, 1996).

Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate. Por ejemplo, para suelos arenosos una densidad aparente de $1,759 \text{ Mg.m}^{-3}$ limita el crecimiento de las raíces de girasol, mientras que en suelos arcillosos, ese valor crítico es de $1,460$ a $1,630 \text{ Mg.m}^{-3}$, para la misma especie (Jones, 1983).

Vepraskas (1988) afirma que a partir de $1,55 \text{ Mg.m}^{-3}$, la compactación, en combinación con la textura y en particular la proporción de arenas muy finas, puede generar restricciones para el crecimiento radical a tensiones de humedad de $0,1 \text{ MPa}$.

Vehimeyer y Hendrickson (1948) determinaron que valores de DAP de $1,46 \text{ Mg.m}^{-3}$ constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, mientras que Daddow y Warrington (1983) establecieron en $1,65 \text{ Mg.m}^{-3}$ el umbral crítico radical.

Unger (1996) indicó que los incrementos naturales en estos parámetros usualmente están limitados a los 15 cm superiores del perfil del suelo. La condición física del suelo en los estratos superiores del terreno incide también sobre la implantación y el desarrollo inicial de los cultivos, en general el proceso de germinación es más rápido y completo con valores de DAP de $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$ o menores.

Según Nasr y Seles (1995) la DAP afecta la emergencia de plántulas principalmente por cambios en el volumen y continuidad de los poros en la cama de siembra.

Finlay et al. (1994) demostraron la conveniencia de la roturación del suelo por debajo de la profundidad de siembra, disminuyendo la DAP y la RM para alcanzar un mayor porcentaje de emergencia en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum*).

Hadas y Stibbe (1977) indicaron que se producen bajos niveles de emergencia en condiciones de suelo muy seco, muy húmedo o muy duro y, en

general, el proceso de germinación es más rápido y completo con DAP de 1,2 Mg.m⁻³ o menores.

Estudios experimentales han demostrado que la germinación, la elongación de las raíces, la elongación del coleoptile y la emergencia del trigo pueden ser afectadas con estrés en la interfaz mayores a 3; 2,3; 1,7 y 0,8 MPa, respectivamente (Collis-George y Yoganathan, 1985).

Bowen et al. (1994), citan valores entre 0.9 a 1.5 MPa como límites para impedir el crecimiento satisfactorio de las raíces.

Carter (1988) mencionó que valores de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces.

Threadgill (1982) indicó que registros de 2 a 2,5 MPa son capaces de detener el crecimiento en frutales.

Stone (1998) determinó un decrecimiento en el rendimiento de cultivos de habas (*Vicia faba*), puerros (*Allium porrum*), repollos (*Brassica oleracea* var *capitata*) y remolachas (*Beta vulgaris* var *esculenta*) para los tratamientos compactados. El mismo autor cita una reducción de materia seca de alrededor de 1 Tn/Ha por 0,5 MPa de incremento de resistencia mecánica en el intervalo de 1,5 a 2,5 MPa., no encontrando la misma relación con el parámetro DAP. La producción de materia seca de los cuatro cultivos fue escasamente afectada por valores de resistencia mecánica entre 1 y 1,5 MPa, pero notablemente reducida con resistencias mayores.

La máxima presión que las raíces pueden ejercer es entre 0,7 y 1,3 MPa en la dirección axial, y entre 0,4 y 0,6 MPa en la dirección radial (Gill y Bolt, 1955) (Misra et al., 1986). Por consiguiente, si la resistencia del medio supera dichos límites, sería de esperar que no hubiera crecimiento. Sin embargo, el proceso es en la realidad mucho más complejo debido a la naturaleza porosa y a la heterogeneidad de los suelos

El rango de compactación relativa (CR) entre 77-84% esta asociado con los máximos rendimientos de los cereales de primavera (Carter, 1990). Generalmente CR superiores al 85 % producen una reducción en los rendimientos en los cereales y la productividad de una amplia gama de suelos (Hakansson, 1990) (Liepic et al., 1991).

Hakanson y Liepic (2000) establecieron cuatro grupos de cultivos según el grado de compactación de la capa comprometida entre los 4-25cm de profundidad que optimiza el crecimiento. En cultivos del tipo de la cebada (*Hordeum vulgare* L) remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L) vicia (*Vicia faba*) y papa (*Solanum tuberosum* L), el grado de compactación óptimo es de 87, 85, 84 y 82% respectivamente. Cuando el grado de compactación supera el 85% y el suelo se encuentra con un potencial agua próximo al punto de marchites permanente, la RM en la mayoría de los casos puede exceder el valor crítico de 3 MPa que limita el crecimiento radical (Da Silva et al., 1994).

Richard et al. (1999) observaron que la porosidad total (PT) disminuía linealmente, a medida que se incrementaba el contenido hídrico del suelo en el momento de realizarse el tránsito del implemento agrícola, el análisis morfológico del perfil posterior al tránsito, mostró que el volumen y la profundidad del área compactada se incrementaban con el aumento de la humedad al momento del tránsito.

En suelos francos arenosos, valores de PT inferiores al 30% comienzan a ser restrictivos para el crecimiento radical, mientras que en suelos arcillosos similar efecto puede comenzar a manifestarse cuando la PT es inferior al 10% (Hakanson y Liepic, 2000).

3 Hipótesis

El tránsito agrícola sobre un suelo con un contenido hídrico superior a capacidad de campo, genera incrementos en la compactación superficial y subsuperficial de un suelo franco arenoso bajo siembra directa.

Cuando el tránsito se realiza con un contenido hídrico cercano al punto de marchites permanente, y en húmedo con un contenido hídrico próximo a capacidad de campo, no se generan cambios en el grado de compactación superficial y subsuperficial.

4 Objetivo general

Evaluar el efecto del tránsito agrícola en diferentes condiciones de humedad edáfica al momento de realizarse el mismo, sobre la compactación del suelo.

5 Objetivos específicos

Evaluar el efecto del tránsito agrícola sobre las variables densidad aparente y resistencia mecánica, en función de la humedad edáfica al momento de realizarse el tránsito.

Evaluar el efecto de la humedad al momento de realizarse el tránsito sobre el grado de compactación relativa del perfil.

Estimar el efecto del tránsito a diferentes niveles de humedad edáfica, sobre la porosidad total.

MATERIALES Y METODOS

1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada a 40 Km. al oeste de la localidad de Río Cuarto, zona rural próxima a La Aguada, en el establecimiento Pozo del Carril de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UNRC, Departamento Río Cuarto, provincia de Córdoba, Argentina, a 32° 20' 03" latitud sur y 64° 43' 23" longitud oeste.

El relieve regional y local es normal, correspondiendo a la región de las llanuras onduladas, sujetas a severos procesos de erosión hídrica (Cantero et al., 1998). El suelo es un Hapludol éntico, de textura franca (INTA-MAGyRR, 1994). Las características del suelo en donde se realizó la experiencia, se detallan en anexo, (tabla 1).

El clima se caracteriza por presentar un régimen de precipitaciones irregular de tipo monzónico, con un total anual de 863 mm, de los cuales un 82 % de los mismos se producen en un semestre húmedo (octubre – marzo), y un semestre seco (abril – septiembre) con solo el 18%. La situación en estudio provenía de una historia de uso agrícola-ganadera en base a: maíz para silo, girasol, 4 años de pastura en base a alfalfa y finalmente maíz, bajo siembra directa.

2 Tratamientos

Sobre el rastrojo proveniente de cultivo antecesor maíz, se aplicaron los tratamientos de tránsito sobre diferentes condiciones de humedad edáfica. (Foto 1).



FOTO N° 1: Estado del lote en el cual se realizo la experiencia.

El tránsito agrícola consistió en la realización de ocho pasadas de tractor consecutivas sobre la misma huella, sobre el suelo con cobertura de rastrojo de maíz, en tres estados de humedad: seco (S), con un contenido hídrico próximo a 15 Bares ($11 \% g g^{-1}$ promedio de humedad de los primeros 10 cm) capacidad de campo (CC), con una humedad próxima a 0,3 Bares ($21 \% g g^{-1}$ promedio de humedad de los primeros 10 cm) y mojado (M), cuando la humedad fue superior a la de 0,3 Bares ($26 \% g g^{-1}$ promedio de humedad de los primeros 10 cm). Estos niveles de humedad se obtuvieron naturalmente a partir de las precipitaciones producidas. Además hubo un testigo que no fue transitado. (Foto 2 y 3).



FOTO N° 2: Aplicación del tratamiento.



FOTO N° 3: Aplicación del tratamiento. Detalle de la huella.

El número fijo de pasadas de tractor resultó de considerar el tránsito normal en sistemas de siembra directa, en el período comprendido desde siembra a cosecha.

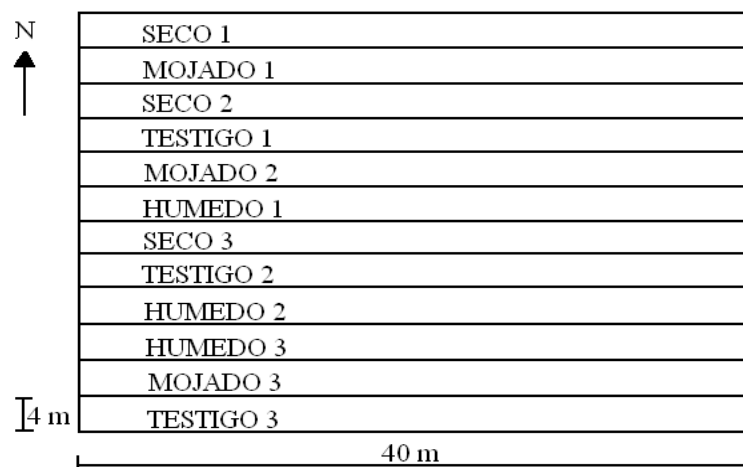
Se utilizó un tractor de diseño convencional de dos ruedas motrices Massey Ferguson modelo 1615 L de 52.25 KW (71 CV) en el motor. (Foto 4).



FOTO N° 4: Tractor utilizado en la experiencia.

El peso total del tractor es de 3020 Kg. distribuidos en 940 sobre el eje delantero y 2080 sobre el eje trasero, con rodado motriz 16.9-34 y rodado directriz 7.5-16. El área de contacto rueda/suelo se estimó de acuerdo con la propuesta para superficies rígidas citada por Sanchez-Giron Renedo (1996), correspondiendo al rodado delantero una superficie de 0.0646 m² y al rodado trasero 0.1844 m². En función de ello, las presiones en el área de contacto rueda/suelo resultaron de 142,65 y 110,65 kPa para los rodados delanteros y trasero, respectivamente.

El diseño experimental consistió en parcelas completamente al azar, realizando tres repeticiones de los diferentes tratamientos. Las parcelas experimentales tuvieron 3 m de ancho por una longitud de 40 m., en cuyo sector medio y sobre la zona media de la huella se realizaron las mediciones de las variables a estudiar, tal como se muestra en el esquema 1.



ESQUEMA N° 1: Diseño experimental.

3 Variables estudiadas

3.1 Caracterización del suelo

Para caracterizar el suelo e interpretar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los tratamientos, previamente a la realización de los mismos, se determinaron las siguientes variables.

3.1.1 Morfología del perfil

La descripción morfológica del perfil se realizó siguiendo las Normas de Reconocimiento de Suelos (Etchevehere, 1976). De esta forma se identificaron los horizontes A y AC de 15 cm cada uno hasta la profundidad seleccionada para el presente estudio y se diagnosticó una (zona más compacta) a los 20 cm de profundidad de 10 cm de espesor. (Foto 5 y 6).



FOTO N° 5: Caracterización del perfil.



FOTO N° 6: Caracterización del perfil.

3.1.2 Curvas de capacidad hídrica

A través del método de la olla de presión (Klute, 1986) en cada horizonte genético del perfil, hasta los 30 cm de profundidad, se obtuvo el valor del contenido hídrico del suelo a una succión de 0.3 y 15 bares. (Anexo, tabla 1).

3.1.3 Constantes de Atterberg

Los límites inferior y superior de plasticidad se obtuvieron mediante, el test de Casagrande (Kézdi, 1980) en cada horizonte genético, hasta los 30 cm de profundidad. A través de la diferencia entre el límite superior de plasticidad (LSP) y el límite inferior de plasticidad (LIP) se obtuvo el número plástico (NP). (Anexo, tabla 1 y 4).

3.1.4 Materia orgánica

En cada uno de los horizontes diferenciados se determinó el contenido de materia orgánica (%), mediante el método de Walkley-Black (Klute, 1986). (Anexo, tabla 1).

3.1.5 Máxima compactación

La máxima compactación se obtuvo mediante el ensayo Proctor (Kézdi, 1980), que consiste en colocar en un cilindro determinado una cierta cantidad de material y luego con un dispositivo se le aplica un número fijo de golpes para compactarlo. Esta operación se repite tres veces; luego se toma el peso del material, de manera tal que conociendo el volumen del cilindro se obtiene la DAP alcanzada en el ensayo. Paralelamente se toma una muestra del material para averiguar la humedad que contiene, a través del método gravimétrico. El proceso completo se repite pero agregándole una cierta cantidad de agua al suelo para aumentar la susceptibilidad a la compactación hasta encontrar el valor más alto de DAP; de esta manera se obtiene el valor de densidad máxima que puede alcanzar un suelo en particular cuando llega a su máximo estado de compactación. (Anexo, tabla 1 y gráfico 1).

3.1.6 Cobertura superficial y peso del rastrojo

La cobertura superficial se evaluó a través del método de la Transecta lineal (Laflen et al., 1981), se realizaron cuatro mediciones en diagonal de modo de formar una “X”, y también se midió el peso del rastrojo recogiendo el material que se encontraba en 1 m² de superficie pesándolo previo secado en estufa hasta peso constante. (Anexo tabla 2 y 3).

3.2 Evaluación de los tratamientos

3.2.1 Densidad aparente

La evaluación de la densidad aparente del suelo (DAP), se realizó a través de la sonda de rayos gamma (Donald et al., 1991). (Foto 7). Las determinaciones se realizaron después de efectuado el tránsito, con cuatro submuestras por repetición de cada tratamiento, a intervalos de 2,5 cm hasta los 30 cm estudiados. Esta variable fue evaluada también en la situación sin tránsito tomada como testigo. (Anexo, tabla 8).



FOTO N° 7: Sonda de rayos gamma para la medición de la Densidad Aparente.

3.2.2 Porosidad total

Se estimó a través de la densidad real de las partículas (DAR) y la densidad aparente del suelo (DAP), mediante la siguiente relación:

$$PT = (1 - DAP / DAR) \times 100$$

Donde PT= porosidad total (%), DAP= densidad aparente, DAR= densidad real de partículas (Danielson y Sutherland, 1986). (Anexo, tabla 9).

3.2.3 Compactación relativa

Se estimó de acuerdo a la metodología propuesta por Carter (1990) a través de la relación entre la densidad aparente actual de cada capa y la máxima compactación obtenida mediante el ensayo Proctor, según la siguiente expresión:

$$CR = \left(\frac{DAP_a}{DAP_{\text{máx}}} \right) \times 100$$

Donde CR es la compactación relativa expresada en porcentaje, DAP_a es la densidad aparente actual y $DAP_{\text{máx}}$ es la densidad máxima. (Anexo, tabla 10).

3.2.4 Resistencia mecánica

Esta evaluación se realizó mediante un penetrómetro computarizado (Eijkelkamp, 1995), provisto de un cono con área basal de 1 cm² y ángulo de 30° y con sensibilidad de lectura de 0,01 m., en cada una de las repeticiones de los respectivos tratamientos con dos submuestras en cada una de ellas, (Foto 8). La evaluación se realizó al finalizar el último tratamiento de modo de asegurar que en todos ellos la condición hídrica del perfil era similar.

Paralelamente a cada evaluación de la RM, se tomaron muestras de suelo en dos puntos de la parcela, a intervalos de 5 cm de profundidad, con las que se determinó el contenido de humedad por el método gravimétrico.



FOTO N° 8: Penetrómetro computadorizado para la medición de la Resistencia Mecánica.

3.2.5 Humedad

Para caracterizar la condición de humedad edáfica (método gravimétrico) al momento de realizar el tránsito, se extrajeron muestras de suelo a intervalos de 5 cm hasta los 30 cm de profundidad, con dos submuestras por repetición de cada tratamiento.

3.2.6 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico se realizó mediante el programa SAS 6.11 (Westfall et al., 1999), utilizando el Test de Comparaciones Múltiples de Tukey y Welsch (Westfall et al., 1999) para la comparación de medias a un nivel de significancia del 95%. (Anexo tabla 5, 6 y 7).

RESULTADOS Y DISCUSION

1 Contenidos hídricos de los distintos tratamientos al momento de realizarse el tránsito.

El gráfico 1 representa el perfil hídrico del suelo al momento de realizar el tránsito en cada uno de las condiciones de humedad estudiadas.

Las diferencias más marcadas entre condiciones de humedad se observaron en los primeros 25 cm de suelo, en los que el tratamiento SECO se separó claramente de los dos restantes. A mayor profundidad, las diferencias entre las situaciones se estrecharon a valores de 20% $g\ g^{-1}$ aproximadamente.

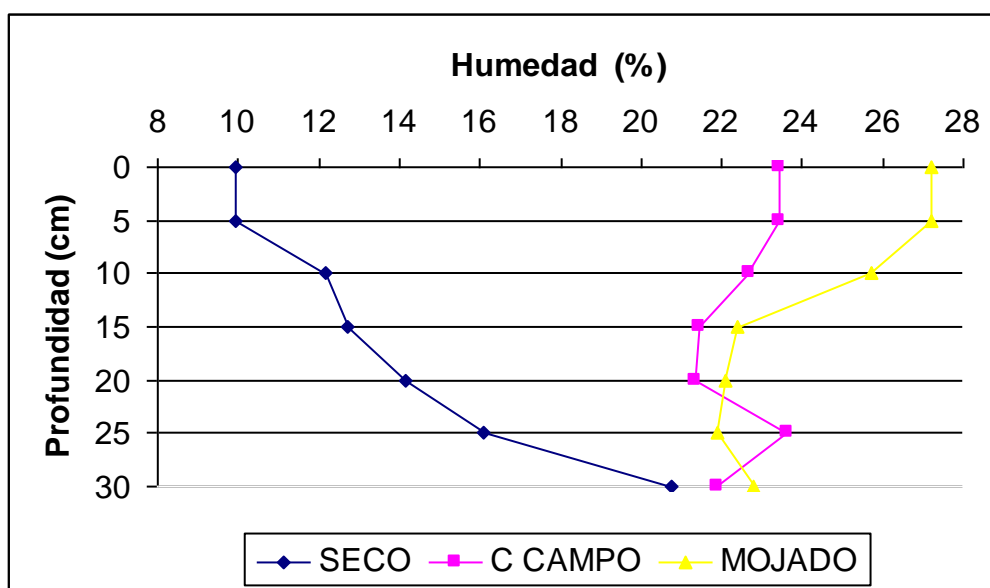


GRÁFICO 1: Perfil de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos.

SECO (11 % $g\ g^{-1}$), CAPACIDAD DE CAMPO (21 % $g\ g^{-1}$), MOJADO (26 % $g\ g^{-1}$)¹⁾

En los primeros centímetros la diferencia entre el contenido hídrico del suelo al momento de realizar el tránsito, fue altamente significativa, entre la condición de suelo SECO y las dos restantes (tabla 1). Entre la condición a CC y M, no hubo diferencias desde el punto de vista estadístico, sin embargo en todos los estratos de profundidad, y de manera más acentuada en los dos primeros, M presentó un contenido hídrico superior al de CC.

En los estratos inferiores las diferencias fueron cada vez menores a medida que se profundizaba en el perfil, sin embargo las diferencias fueron significativas

hasta llegar al último en el cual el análisis estadístico indicó que no había diferencias significativas.

Tabla 1: Análisis estadístico sobre los distintos contenidos hídricos del suelo en cada estrato estudiado, al momento de realizar los tratamientos.

PROFUNDIDAD	0-5 cm		5-10 cm	
TRATAMIENTO	HUM. % (g/g)	IS	HUM. % (g/g)	IS
SECO	9.92	B	12.18	B
C. CAMPO	23.41	A	22.7	A
MOJADO	27.49	A	25.7	A
ANOVA	0.0106		0.0089	
PROFUNDIDAD	10-15 cm		15-20 cm	
TRATAMIENTO	HUM. % (g/g)	IS	HUM. % (g/g)	IS
SECO	12.71	B	14.14	B
C. CAMPO	21.44	A	21.34	A
MOJADO	22.4	A	22.11	A
ANOVA	0.0206		0.0334	
PROFUNDIDAD	20-25 cm		25-30 cm	
TRATAMIENTO	HUM. % (g/g)	IS	HUM. % (g/g)	IS
SECO	16.08	B	20.76	A
C. CAMPO	23.61	A	21.89	A
MOJADO	21.62	A	22.88	A
ANOVA	0.0248		0.6397	

HUM (humedad) IS (índice de similitud)

Letras distintas indican diferencias significativas entre filas. $p = 0,05$.

En el estrato 20-25 cm si bien las diferencias fueron significativas, el valor de humedad obtenido para el tratamiento CC fue superior que el valor del tratamiento M, pudiendo deberse a errores de muestreo, por lo que para el análisis de los resultados los datos obtenidos de los últimos dos estratos no fueron tenidos en cuenta.

El índice de similitud en los cuatro primeros estratos indicó que el tratamiento seco difirió del mojado y capacidad de campo situándolos en dos grupos diferentes por su contenido hídrico. Luego de realizar los tratamientos, cuando se procesaron los datos de DAP y RM obtenidos este mismo índice situó al tratamiento M en grupo distinto al de los otros dos tratamientos en todos los estratos hasta los 20 cm de profundidad. Este hecho podría sugerir que a partir de un contenido hídrico cercano a capacidad de campo, con pequeños incrementos en la humedad del suelo se obtienen grandes incrementos en las variables DAP y RM como consecuencia del tránsito agrícola.

2 Densidad aparente

En general, el contenido hídrico del suelo en el momento de realizarse el tránsito incidió sobre la densidad aparente (DAP) del mismo, produciendo un incremento de esta variable hasta poco más de los 20 cm de profundidad (Gráfico 2).

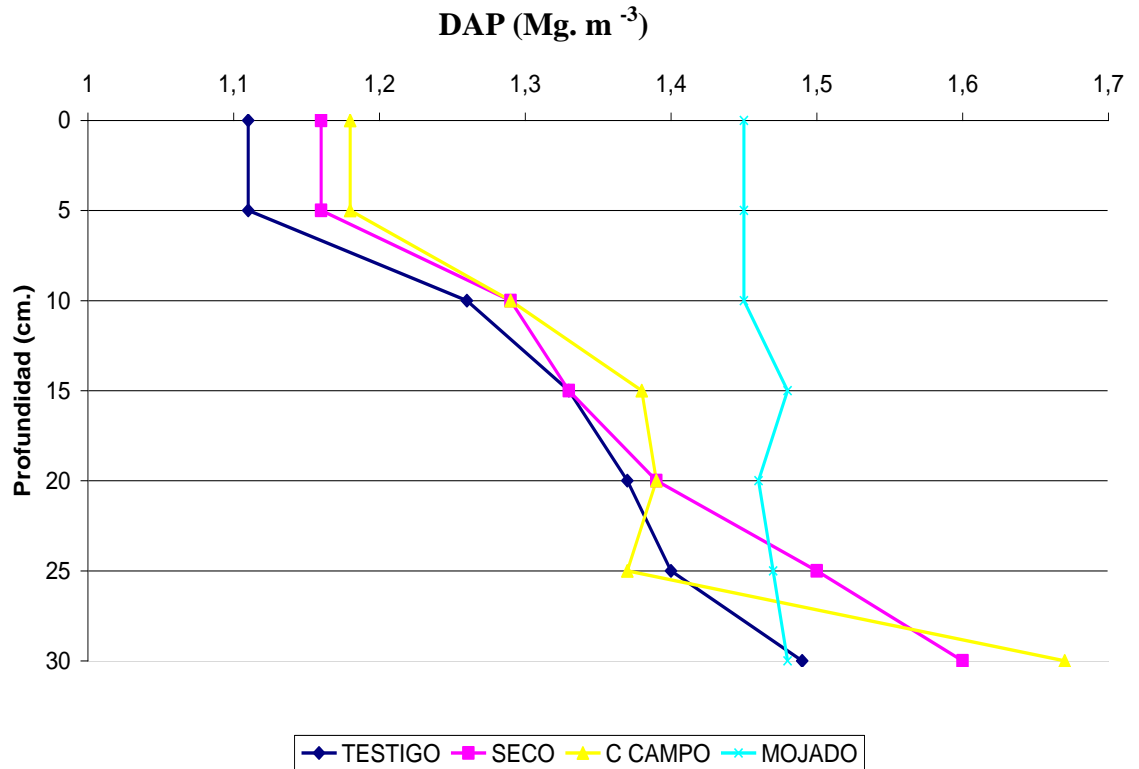


GRÁFICO N° 2: Perfil de Densidad Aparente en función de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos bajo estudio. SUELO SECO (11 % g g⁻¹), SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO (21 % g g⁻¹), SUELO MOJADO (26 % g g⁻¹)

Otro aspecto a tener en cuenta es que todos los tratamientos tuvieron efecto sobre la variable DAP ya que el testigo, que sería la condición sin tránsito, es la situación que mantuvo los valores de DAP por debajo de los valores alcanzados en los restantes tratamientos en todos los estratos de profundidad estudiados.

Estos resultados fueron coincidentes con lo que citan numerosos autores, Bryan et. al. (1982), Dominguez et al. (2000), Upadhyaya et al. (1994), Botta (2000), Jorajuria y Draghi (2000), Pecorari (1988), Liebij et al. (1993), Gaultney et al. (1982), quienes trabajaron en diferentes condiciones de suelo, humedad y tránsito agrícola.

A continuación se presentan todos los datos de DAP agrupados en función de cada estrato estudiado, (tabla 2).

Tabla 2: Comportamiento de la Densidad Aparente, frente a los distintos tratamientos y profundidades estudiadas.

INTERVALO 0-5 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm³)	HUM (%)	I S	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,05	-	C	0,0014
SUELO SECO	1,16	9,92	BC	
SUELO C. CAMPO	1,18	23,41	B	
SUELO MOJADO	1,45	27,9	A	
INTERVALO 5-10 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm³)	HUM (%)	I S	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,26	-	B	0,0052
SUELO SECO	1,29	12,18	B	
SUELO C. CAMPO	1,29	22,7	B	
SUELO MOJADO	1,45	25,7	A	
INTERVALO 10-15 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm³)	HUM (%)	I S	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,33	-	B	0,021
SUELO SECO	1,33	12,71	B	
SUELO C. CAMPO	1,38	21,44	B	

SUELO MOJADO	1,48	22,4	A	
INTERVALO 15-20 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm ³)	HUM (%)	IS	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,37	-	B	0,0489
SUELO SECO	1,39	14,14	B	
SUELO C. CAMPO	1,39	21,34	B	
SUELO MOJADO	1,46	22,11	A	
INTERVALO 20-25 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm ³)	HUM (%)	IS	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,4	-	B	0,0326
SUELO SECO	1,5	16,08	B	
SUELO C. CAMPO	1,37	23,61	C	
SUELO MOJADO	1,47	21,92	A	
INTERVALO 25-30 cm				
TRATAMIENTO	DAP (gr/cm ³)	HUM (%)	IS	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,49	-	A	0,21
SUELO SECO	1,6	20,76	A	
SUELO C. CAMPO	1,67	21,89	A	
SUELO MOJADO	1,48	22,88	A	

DAP (densidad aparente) HUM (humedad) IS (índice de similitud). Letras distintas indican diferencias significativas entre filas. $p = 0,05$

3 Análisis del comportamiento de la densidad aparente (DAP), en cada tratamiento, según diferentes estratos de profundidad.

A continuación se presenta un análisis de la densidad aparente, en función de cada estrato estudiado en intervalos de 5 cm.

3.1 Intervalo 0-5 cm

En este intervalo de profundidad es donde el efecto del tránsito se mostró en forma más marcada, pudiéndose observar que los valores de DAP se van incrementando a medida que aumenta el contenido hídrico del suelo en el momento de realizarse el tránsito. Esto se ve avalado por el resultado que arrojó el ANOVA, 0.0014, indicando que las diferencias son altamente significativas, (tabla 2).

Estos resultados fueron coincidentes con lo reportados por Jorajuria (2001) y Unger (1996), los cuales indican que los aumentos de DAP por tránsito son mayores en los estratos superiores con respecto a los inferiores, generalmente remitiéndose a los primeros 15 cm de suelo.

Por otro lado Bryan et al. (1982), Alakukku (1997), reportan que el contenido hídrico del suelo al momento de realizarse el tránsito es la variable que más influye sobre los incrementos de la DAP coincidiendo con los resultados obtenidos en la experiencia.

Analizando los valores del índice de similitud, se puede decir que cada condición de humedad edáfica respondió en forma distinta a cada tratamiento. Este índice mostró que el tratamiento seco fue similar al tratamiento testigo y al de capacidad de campo, mientras el mojado fue distinto a los demás.

Por otro lado los valores de las variables estudiadas mostraron, que si bien el comportamiento de los tratamientos fue diferente, la condición de suelo mojado se apartó claramente del resto, produciéndose un marcado incremento en la DAP al pasar de un contenido hídrico próximo a capacidad de campo a aquel correspondiente a mojado, aunque el cambio en el contenido hídrico del suelo no fue tan marcado. Este comportamiento está evidenciando que existe un rango de humedad estrecho en el cual la respuesta de la DAP al tránsito agrícola, difiere significativamente coincidiendo con lo citado por Bacigaluppo y Gerster (2002), Gerster et al. (2005) quienes sostienen que cuando el contenido hídrico del suelo se encuentra cercano a capacidad de campo, cambios de un 2% a 3% en el contenido hídrico producen grandes cambios en el valor de DAP obtenido luego de efectuar el tránsito.

En el estrato citado la diferencia del contenido hídrico entre capacidad de campo y suelo mojado es de 4,4 puntos, de esta manera al aumentar un 19% g g^{-1} el contenido hídrico se obtiene un 23% de incremento en la DAP, al realizar el tránsito.

En el caso del tratamiento mojado el valor de DAP, 1.45 Mg.m^{-3} , alcanzó el umbral crítico para el desarrollo radical, 1.46 Mg.m^{-3} , citado por Vehimeyer y Hendrickson (1948) y 1.2 Mg.m^{-3} Hadas y Stibbe (1977), pero no alcanza el valor de 1.5 Mg.m^{-3} citado por Jones (1983) y 1.55 Mg.m^{-3} citado por Vepraskas (1988).

3.2 Intervalo 5-10cm

El segundo estrato estudiado mostró una tendencia similar al anterior. En este caso no se observaron diferencias entre los tratamientos seco y capacidad de campo en todas las variables estudiadas con respecto al testigo (tabla 2).

Se destaca que a pesar de que las diferencias en el contenido hídrico del suelo en estado seco y a capacidad de campo fueron marcadas, no se registraron diferencias en la DAP. Esto se ve reflejado en el índice de similitud que agrupa al testigo con el tratamiento seco y capacidad de campo en un mismo grupo evidenciando que no existieron diferencias significativas entre ellos. El rastrojo presente en superficie alcanzó los 13.974 Kg/ha, generando una cobertura promedió de 91%, aspecto que puede haber amortiguado los efectos del tránsito, tal cual lo citan Torbert y Reeves, (1995). (Foto 9).



FOTO N° 9: Nivel de cobertura que presentaba el lote y huellas producidas por el tránsito.

Sin embargo, sí hubo diferencia estadística entre los tratamientos antes mencionados y el tratamiento de tránsito en suelo mojado, el cual mostró un valor de DAP significativamente superior al resto. Este hecho es importante ya que acusa

que a esta profundidad el efecto del tránsito de la maquinaria ya no se hace presente como en el estrato anterior, cuando el suelo se encuentra a un contenido hídrico próximo al de capacidad de campo, lo que no coincide con lo reportado con Gerster et al. (2005), quienes encontraron bloques masivos sin presencia de macroporosidad hasta los 28 cm. de profundidad, cuando el suelo se encontraba con un contenido hídrico próximo al de capacidad de campo.

Este hecho permite pensar que, con altos contenidos hídricos en el suelo al momento de realizarse el tránsito, el efecto negativo de dicha operación se da hasta profundidades de 10 cm con la misma magnitud que en el estrato superior, volviendo a alcanzar el umbral crítico para el desarrollo radical propuesto por Vehimeyer y Hendrickson (1948), Hadas y Stibbe (1977).

3.3 Intervalo 10-15cm

En el tercer intervalo estudiado se puede ver que las tendencias que toman los valores de las variables estudiadas fueron similares que para el estrato anterior, (tabla 2).

Las variaciones en la DAP no mostraron diferencias estadísticas entre los tratamientos, volviéndose a repetir la similitud entre el testigo, suelo seco y suelo a capacidad de campo.

Nuevamente el tratamiento mojado es el que más incrementó los valores de DAP y de igual manera que en el caso anterior el índice de similitud situó a este tratamiento en un grupo diferente al resto de los tratamientos, siendo estas diferencias significativas desde el punto de vista estadístico. El hecho de que las diferencias fueron significativas y no altamente significativas no se puede atribuir a que el efecto del tránsito sobre el suelo mojado se fue diluyendo a esta profundidad ya que el valor de DAP alcanzado en este caso fue de 1.48 Mg.m^{-3} , siendo mayor que en los estratos superiores, 1.45 Mg.m^{-3} aproximadamente, acercándose al umbral crítico de 1.65 Mg.m^{-3} citado por Daddow y Warrington (1984). La disminución de las diferencias parecen deberse a los valores de DAP superiores, alcanzados en los tratamientos seco, capacidad de campo y testigo respectivamente.

Una consideración a tener en cuenta es que los valores de DAP obtenidos en este estrato en todos los tratamientos y el testigo fueron superiores a los de los

estratos anteriores, lo que indicaría que el sitio elegido ya contaba con capas compactadas antes de iniciar los ensayos, cuestión que fue corroborada con la caracterización morfológica del perfil del suelo.

Uno de los aspectos más importantes que se presentó en el presente estrato es el aumento de DAP logrado en el tratamiento mojado con una diferencia en el contenido hídrico de tan solo 1 punto con respecto al de capacidad de campo. Este dato es lo suficientemente claro como para afirmar lo que se viene dando en los estratos superiores, haciéndose cada vez mas firme la idea de que pequeños cambios en el contenido hídrico a valores elevados de humedad en el momento de realizarse el transito, significan grandes cambios en los valores de DAP y por ende en las variables porosidad total y compactación relativa que tienen incidencia directa en el desarrollo de los diferentes organismos vegetales, y coincidiendo nuevamente con lo propuesto por Bryan et al. (1982), Gerster et al. (2005), Raper y Erbach (1990), Horn (1988).

3.4 Intervalo 15-20 cm

El cuarto estrato en estudio presentó la misma tendencia en los datos de DAP que los estratos anteriormente analizados (tabla 2). No hubo diferencias entre los tratamientos seco, capacidad de campo y el testigo, pero sí entre estos y el tratamiento de suelo mojado.

El valor de DAP del tratamiento mojado nuevamente fue el más elevado, diferenciándose del resto en forma significativa como lo muestra el análisis estadístico.

También se repite el aumento en la DAP de este tratamiento comparado con el de capacidad de campo cuando la diferencia en el contenido hídrico es muy pequeña, reafirmando lo expuesto en el estrato superior.

Por lo analizado hasta aquí se puede inferir que el transito realizado sobre los diferentes tratamientos tuvo incidencia en la variable DAP, solamente en el tratamiento mojado para el estrato 15-20 cm.

Meek (1996) indico que en suelos arcillosos son mayores tanto los riesgos de compactar el suelo a niveles que limiten la producción agrícola, como mayor será también la persistencia del daño realizado, esto puede explicar el comportamiento

del suelo en estudio frente al tránsito, si bien su granulometría es franca arenosa el tránsito produjo elevaciones en el valor de la DAP estadísticamente significativas, solo en el tratamiento mojado en todos los estratos, y probablemente esta característica granulométrica haya podido atenuar el efecto del tránsito en los demás tratamientos, seco y capacidad de campo, salvo en el estrato superior.

En el estado friable, con un contenido de humedad entre los límites de contracción e inferior al del estado de consistencia plástico, la masa del suelo tiene mayor resistencia que los terrones, lo que significa que una herramienta de labranza puede romper los terrones con poca fuerza al mismo tiempo que la resistencia al deslizamiento es baja, facilitando así un buen laboreo. En el estado plástico, entre los límites inferior y superior de plasticidad, aunque la resistencia de los terrones sigue bajando, el deslizamiento requiere mayor fuerza, probablemente las herramientas no alcanzan un restregamiento y existe el peligro de compactar y dañar la estructura del suelo. Obviamente es difícil trabajar con los suelos en este estado, lo que indica la importancia del número plástico para evaluar la facilidad de labranza de los distintos suelos, Bryan et al. (1982).

En este caso se pudo determinar el límite plástico superior a $27\% \text{ g g}^{-1}$ de humedad para el primer horizonte y de $24\% \text{ g g}^{-1}$ para el segundo horizonte, pero no presentó límite plástico inferior en ninguno de los dos casos, indicando que este suelo no es plástico, probablemente por su bajo contenido de arcilla y elevada relación arena fina / gruesa.

El cambio significativo logrado sobre la DAP con un pequeño aumento en el contenido hídrico al momento de realizarse el tránsito, nos está marcando un valor al cual el comportamiento del suelo frente al tránsito se magnifica. El límite inferior de plasticidad no pudo ser determinado con la metodología empleada, siendo un valor de humedad crucial para determinar cuando el suelo pasa de estado friable, óptimo para realizar trabajos, a plástico donde el suelo se vuelve vulnerable a los efectos del tránsito.

Con el ensayo Proctor se determinó que la máxima compactación para este suelo se produce con un contenido hídrico de $18,92\% \text{ g g}^{-1}$ para el horizonte superior y $18,73\% \text{ g.g}^{-1}$ para el inferior. Si se considera que el contenido hídrico de este suelo a capacidad de campo es del $19\% \text{ g g}^{-1}$, se puede inferir que cuando este

suelo tiene un contenido hídrico similar a capacidad de campo es cuando mas se va a incrementar la variable DAP frente al transito. Sin embargo, si se tienen en cuenta los valores de humedad a los cuales se obtuvieron los máximos valores de DAP a campo, se puede ver que estos son superiores al de capacidad de campo, habiendo fijado un valor critico 21% de humedad como limite por en cima del cual la variable DAP tiene incrementos significativos por efecto del transito, esto sale del análisis de los estratos anteriores.

El cambio significativo en el valor de DAP que se presenta a partir del 21% g g^{-1} de humedad, puede utilizarse para decidir en que momento es conveniente entrar al lote para realizar las diferentes labores, tal como lo citan Bryan et al. (1982).

De estos datos, resulta evidente que cuando este suelo tiene un contenido hídrico levemente superior a capacidad de campo se vuelve mas susceptible a los aumentos de DAP como consecuencia del transito, coincidiendo con lo reportado por Cisneros et al. (1997) y Cholaky (2003).

3.5 Intervalo 20-25 cm

Como se puede ver en la Tabla 2, aparentemente los distintos tratamientos han respondido al pasaje del tractor, en este caso el tratamiento seco fue en el cual se registro el valor mas elevado de DAP, no coincidiendo con lo que hasta el momento se venia dando en los estratos superiores. Lo que se puede apreciar en la tabla es que todos los tratamientos presentaron valores elevados de DAP, al igual que el testigo, esto indicaría que este estrato ya contaba con un nivel de compactación, no debido al tratamiento realizado, coincidiendo con la caracterización morfológica inicial del perfil en la que se encontró una capa mas densa a esta profundidad, de unos 10 cm. de espesor.

Al tener el testigo un valor superior al de otros estratos indicaría que antes de realizarse el ensayo ya los valores de DAP eran elevados y que las diferencias observadas fueron debidas principalmente a la heterogeneidad del suelo en lo que respecta a la variable en estudio.

Además como los distintos contenidos hídricos del ensayo se obtenían en forma natural, cuando la condición deseada en los estratos superiores se encontraba

en su punto óptimo, en los estratos inferiores la condición no era tal, esto se puede ver claramente en la tabla 2, donde el contenido hídrico logrado en el tratamiento capacidad de campo fue mayor que en el tratamiento mojado.

Por las razones expuestas anteriormente los resultados obtenidos del presente estrato en estudio no fueron tenidos en cuenta y por lo tanto se infiere que en el estrato 20-25 cm no se obtuvo incremento de la DAP por medio del pasaje de un tractor a diferentes contenidos de humedad edáfica.

3.6 Intervalo 25-30cm

Ya en el último estrato en estudio los datos se encuentran distorsionados por las mismas razones que en el estrato superior. Además en el momento de realizar las mediciones de la DAP se observó que en los últimos centímetros, el vástago de la sonda se encontraba con tierra desmoronada de las paredes, en el fondo del cilindro realizado para tomar las mediciones, por esta razón sumada a las del estrato superior los datos obtenidos del presente espesor de suelo no serán tenidos en cuenta a la hora de arribar a las conclusiones de este trabajo. (tabla 2).

4 Porosidad Total

La Porosidad total (PT) presentó similar tendencia que la DAP, pues al aumentar la DAP disminuye el espacio poroso.

El tratamiento testigo es el que siempre mantiene los valores más elevados de PT, este valor va disminuyendo a medida que se va incrementando la profundidad, tal como lo fueron haciendo los valores de DAP, (Gráfico 3).

Los tratamientos seco y capacidad de campo tomaron valores similares, esto indica que a pesar de haber gran diferencia en el contenido hídrico de ambos tratamientos, la disminución en la PT lograda es muy parecida, por lo que dentro de este rango de humedad el suelo responde de forma similar frente al tránsito agrícola.

El tratamiento mojado tomó los valores más bajos de PT en todas las profundidades, la disminución de este parámetro es más marcada en el estrato superior para ir diluyéndose a mayor profundidad, un hecho importante es que en el

primer estrato se logro una disminuci3n de 15 unidades con respecto al testigo y 10 unidades con respecto al tratamiento seco y mojado.

De todas maneras en ning3n momento se alcanzaron los l3mites que comprometen el desarrollo radical propuestos por Hakansson (1990), Liepic et al. (1991).

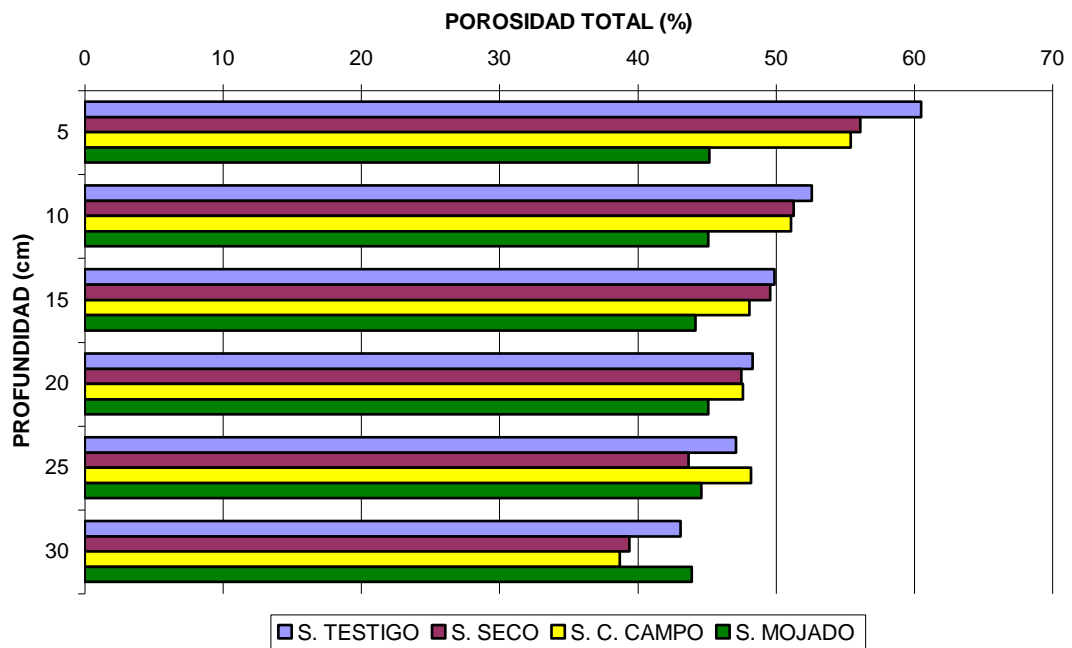


GRAFICO N° 3: Valores alcanzados de Porosidad Total, en funci3n de la humedad al momento del tr3nsito en los distintos tratamientos bajo estudio. SUELO SECO (11 % g g⁻¹), SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO (21 % g g⁻¹), SUELO MOJADO (26 % g g⁻¹)

5 Compactaci3n Relativa

La compactaci3n relativa (CR) presento similar tendencia que la DAP, (Gr3fico 4).

En este sentido, resulta conveniente destacar el incremento en la CR que se evidenci3 con el tratamiento de tr3nsito sobre suelo mojado, alcanzando un 92 %, valor cercano al que algunos autores Hakansson (1990), Liepic et al. (1991) plantean como l3mite para el crecimiento de los cultivos, en este gr3fico y el anterior quedan claros los cambios producidos en estas variables con el transito.

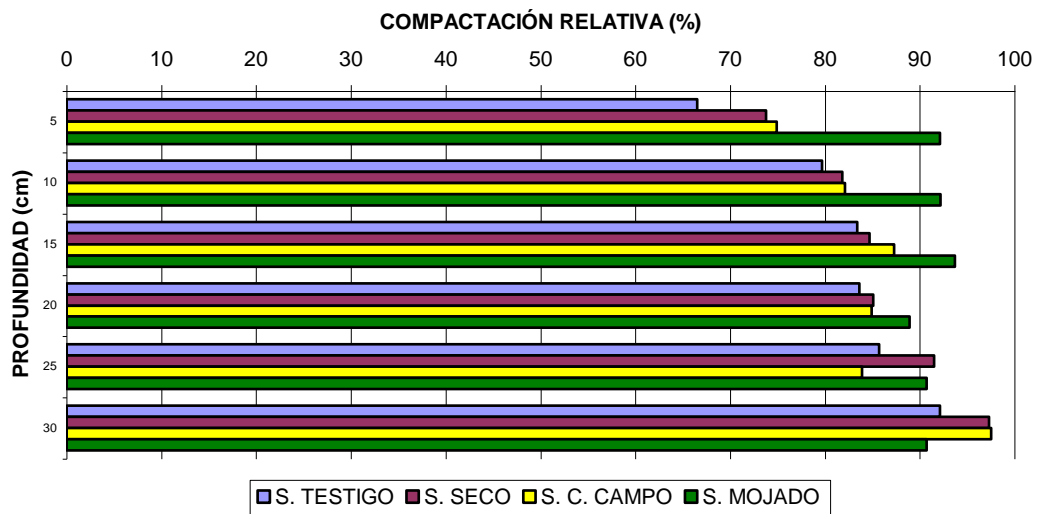


GRÁFICO N° 4: Valores alcanzados de Compactación Relativa, en función de la humedad al momento del tránsito en los distintos tratamientos bajo estudio. SUELO SECO (11 g g^{-1}), SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO (21 g g^{-1}), SUELO MOJADO (26 g g^{-1})

La CR y la PT, son variables que influyen directamente sobre el desarrollo de los cultivos, en el tratamiento mojado ambas fueron modificadas en forma significativa, este hecho pone de manifiesto la importancia que tiene el contenido hídrico al momento de realizarse el tránsito para este suelo en particular.

6 Resistencia mecánica

En el presente apartado se realiza un análisis de la influencia del tránsito de la maquinaria sobre la resistencia mecánica del suelo (RM), variable que afecta directamente al desarrollo de los diversos organismos vegetales y que se ve fuertemente influenciada por la DAP junto con otras variables.

En general se puede apreciar que los valores de RM presentaron una tendencia similar a la que tomaron los valores de DAP (Gráfico 5).

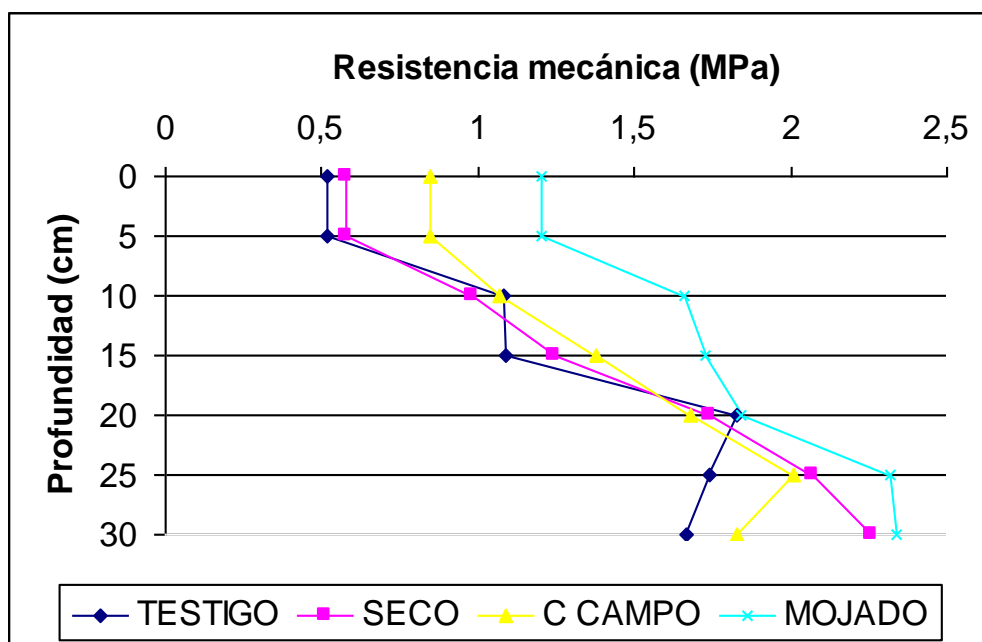


Gráfico 5: Perfil de resistencia mecánica en función de la humedad al momento del tránsito .SECO (11 % $g\ g^{-1}$), CAPACIDAD DE CAMPO (21 % $g\ g^{-1}$), MOJADO (26 % $g\ g^{-1}$)

En los primeros estratos el tratamiento mojado registro los valores mas elevados de RM, capacidad de campo tomo valores intermedios y por, último el

testigo y el tratamiento seco los valores inferiores siendo estos a su vez similares entre si.

Luego, a partir de los 20 cm de profundidad las diferencias existentes entre los valores de los distintos tratamientos comenzaron a desaparecer.

Tabla 3: Comportamiento de la Resistencia Mecánica, frente a los distintos tratamientos y profundidades estudiadas.

INTERVALO 0-5 cm				
TRATAMIENTO	RM (MPa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	0,74	B	25,25	0,0077
SUELO SECO	0,58	B		
SUELO C. CAMPO	0,85	B		
SUELO MOJADO	1,2	A		
INTERVALO 5-10 cm				
TRATAMIENTO	RM (MPa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,08	B	22,69	0,0373
SUELO SECO	0,98	B		
SUELO C. CAMPO	1,07	B		
SUELO MOJADO	1,66	A		
INTERVALO 10-15 cm				
TRATAMIENTO	RM (Mpa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,09	C	21,44	0,0145
SUELO SECO	1,24	B		
SUELO C. CAMPO	1,32	B		
SUELO MOJADO	1,73	A		
INTERVALO 15-20 cm.				
TRATAMIENTO	RM (MPa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,83	A	22,11	0,6914

SULO SECO	1,74	A		
SUELO C. CAMPO	1,68	A		
SUELO MOJADO	1,84	A		
INTERVALO 20-25 cm.				
TRATAMIENTO	RM (MPa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,74	A	23,61	0,3998
SUELO SECO	2,07	A		
SUELO C. CAMPO	2,01	A		
SUELO MOJADO	2,32	A		
INTERVALO 25-30 cm.				
TRATAMIENTO	RM (MPa)	IS	HUM (%)	ANOVA
SUELO TESTIGO	1,67	A	22,79	0,1205
SUELO SECO	2,26	A		
SUELO C. CAMPO	1,83	A		
SUELO MOJADO	2,34	A		

RM (resistencia mecánica) HUM (humedad) IS (índice de similitud).

Letras distintas indican diferencias significativas entre filas. $p = 0,05$.

A continuación se realiza un análisis mas detallado del comportamiento de esta variable en intervalos de 5 cm cada uno.

7 Análisis del comportamiento de los distintos tratamientos frente al tránsito de la maquinaria teniendo en cuenta la variable resistencia mecánica (RM).

7.1 Intervalo 0-5 cm

Los tratamientos estudiados respondieron de diversa manera frente a la aplicación del tránsito, como en el caso de la variable DAP el tratamiento mojado fue en el que se registraron los mayores valores de RM; este hecho se ve avalado por el índice de similitud que lo sitúa en un grupo distinto del resto de los tratamientos. A su vez el análisis estadístico permite afirmar que las diferencias presentes entre estos dos grupos fueron altamente significativas (tabla 3).

Si bien entre los tratamientos seco, capacidad de campo y testigo existió una diferencia entre los valores absolutos de RM, según el índice de similitud el único

grupo que difirió del resto es el tratamiento Mojado, y esto es realmente lo más interesante ya que este es el mismo tratamiento que registró los mayores valores de DAP.

Estos resultados indican que la tendencia que tomaron ambas variables fue la misma, tal como lo citan Unger (1996), Upadhyaya et al. (1994), Liebig et al. (1993), Hartge y Acornea (1999).

A partir de la observación de este comportamiento se puede afirmar que la DAP tiene gran incidencia sobre la RM tal como lo citan Collis-George y Yoganathan (1985). En un apartado posterior se realiza un análisis para dilucidar si el incremento logrado de la RM es en magnitud comparable con los aumentos obtenidos en la DAP.

En relación a la magnitud de la RM alcanzada a partir de los tratamientos, Bowen et al. (1994) citan valores entre 0.9 a 1.5 MPa como limitantes para el crecimiento satisfactorio de las raíces; el tratamiento mojado es el único que alcanzó valores dentro de este rango, indicando que realizar tránsito en estas condiciones ocasiona serios problemas para el desarrollo radical futuro de los cultivos. Si se tienen en cuenta los valores críticos citados por Collis-George y Yoganathan (1985), 0.8 MPa, la emergencia de especies de gramíneas, como es el caso de *Triticum aestivum* L, se vería afectada por el valor de RM alcanzado en el tratamiento mojado. Sin embargo, si se tienen en cuenta los valores umbrales citados por Threadgill (1982) 2 a 2,5 MPa, Carter (1988) 1.5 MPa, Stone (1998) 1.5 MPa, la magnitud de la RM alcanzada en el tratamiento mojado se encuentra fuera de los umbrales críticos para el crecimiento.

7.2 Intervalo 5-10 cm

Para el segundo intervalo en estudio las tendencias fueron similares. Como se aprecia en la tabla 3, nuevamente el tratamiento mojado es el que se apartó de los tratamientos restantes, indicando el análisis estadístico que las diferencias en este caso fueron significativas, no como en el estrato superior que eran altamente significativas.

Los demás tratamientos también como en el estrato superior se mantuvieron todos en un mismo grupo presentando esta vez valores de RM más uniformes que en el estrato superior, coincidiendo con el comportamiento de los valores de DAP para el mismo estrato en estudio.

En este caso, el tratamiento mojado alcanzó un valor que se encuentra dentro de los umbrales críticos citados por (Bowen et al., 1994), (Collis-George y Yoganathan, 1985), Carter (1988), (Stone, 1998), y queda fuera del citado por (Threadgill, 1982).

7.3 Intervalo 10-15 cm

Comparando los datos del tercer estrato con los anteriores, se puede ver que el agrupamiento de estos difirió; el tratamiento mojado fue nuevamente el que alcanzó los valores más elevados del ensayo, situándose como siempre en un grupo distinto del resto, tabla N° 3. La diferencia reside esta vez en que el testigo tomó valores lo suficientemente inferiores al resto como para situarse en un grupo distinto, quedando los tratamientos seco y capacidad de campo en un tercer grupo.

Es difícil poder atribuir este efecto a alguna causa específica si se considera que la evaluación de DAP no evidenció tal situación. Tal vez se deba a zonas específicas muestreadas, a partir del área tomada por el penetrómetro, que es mínima y esto puede añadir algo de distorsión a los datos tomados. Lo más importante es que el tratamiento mojado a una profundidad de 15 cm., sigue teniendo los valores más altos de RM, y que el análisis estadístico indica que estas diferencias son significativas.

La humedad del suelo es una de las variables que incide sobre la RM; en el momento que se muestreo esta variable el contenido hídrico estaba por encima de capacidad de campo en todos los estratos de todos los tratamientos, pero igualmente los valores de RM obtenidos son elevados si se consideran los umbrales citados de diversos autores, lo que indica que cuando este suelo se encuentre bajo un déficit hídrico el desarrollo radical se va a ver seriamente comprometido, pues los valores de RM se van a incrementar en todos los estratos.

7.4 Intervalo 15-20 / 20-25 / 25-30cm

El análisis de los siguientes tres estratos se realiza en forma conjunta, ya que tanto el índice de similitud como el análisis estadístico indican que las diferencias existentes entre los valores de los distintos grupos no fueron significativas y por lo tanto se deben puramente al azar, o sea a la heterogeneidad de la variable medida en el suelo, (tabla N° 3).

De todas formas se puede ver que los valores del tratamiento mojado siempre fueron los más elevados; la diferencia con los estratos superiores fue que en este caso los demás tratamientos e inclusive algunas veces el testigo tomaron también valores elevados.

Las mismas causas que distorsionaron los valores de DAP obtenidos luego del tratamiento para los estratos inferiores alteran los valores de RM de los mismos y por lo tanto no pueden ser tenidos en cuenta a la hora de concluir, presentándose nuevamente el horizonte compactado que se diagnosticó en la caracterización del perfil.

8 Análisis comparativo entre el comportamiento de la densidad aparente y la resistencia mecánica.

Numerosos autores coinciden en que las variables DAP y RM son las indicadas para monitorear el nivel de compactación del suelo Unger (1996), Liebig et al. (1993), Woorhees et al. (1986), Upadhyaya et al. (1994).

Ambas variables reflejaron el efecto del tránsito sobre el suelo. Si bien es reconocido por diversos autores que la DAP es uno de los componentes que inciden sobre la RM de los suelos, lo que resultaría interesante evaluar es cuál de estas dos variables es la que mejor refleja el efecto del tránsito.

Para avanzar en este análisis, a continuación se presenta una comparación entre ambas variables para poder evaluar su sensibilidad frente al tránsito. Para ello, se tuvieron en cuenta los valores del tratamiento testigo y del tratamiento

mojado hasta una profundidad de 20 cm, por ser el tratamiento en que más se incrementaron los valores de ambas variables con respecto al Testigo.

Para poder comparar ambas variables se debieron homogeneizar, ya que se miden en unidades distintas, una de densidad y otra de presión, para tal fin se llevaron todos los datos a valores porcentuales, se tomó el valor testigo para la profundidad de 0-5 cm dándole un valor 100, el resto de los valores se refirieron todos a este primer valor, este procedimiento se hizo para las dos variables.

Con estos valores se realizó un gráfico que muestra la sensibilidad de ambas variables frente al tránsito agrícola.

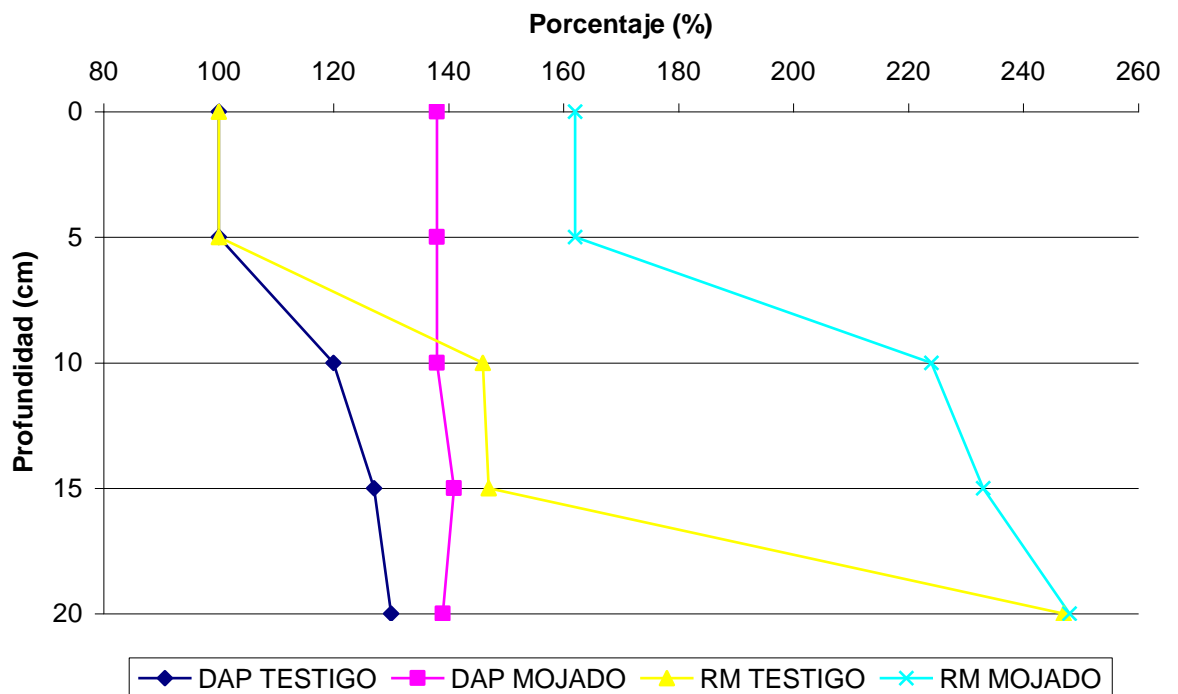


GRÁFICO 6: Perfil de Densidad Aparente y de Resistencia Mecánica expresados en valores porcentuales hasta la profundidad de 20 cm.

Analizando el gráfico se ve claramente que la RM fue más sensible frente al tránsito agrícola, que la DAP coincidiendo con lo citado por Alakukku (1996). El incremento promedio de la DAP en las distintas profundidades estudiadas, como resultado del tránsito en condición de suelo mojado, osciló en un 18%, mientras que en la RM este incremento fue del 44%.

Otro aspecto a tener en cuenta es que en la DAP se evidenciaron incrementos en todos los rangos de profundidad estudiados, incluido el de los 20 cm de profundidad, pero en la RM en cambio a los 20 cm de profundidad el valor de RM del tratamiento mojado fue similar al del testigo, por lo que para esta variable y esta profundidad no se obtuvo respuesta al tránsito agrícola.

CONCLUSIONES

Para las condiciones bajo estudio, de suelo, humedad, sistema de labranza y tránsito se concluye:

La compactación edáfica se incrementa cuando se realiza el tránsito agrícola en condición de suelo mojado.

El tránsito realizado cuando el suelo presenta un contenido de humedad próximo a capacidad de campo, produce compactación sólo en superficie.

Cuando el tránsito se realiza en condición de suelo seco no produce compactación edáfica.

La Resistencia Mecánica es una variable más sensible al efecto del tránsito agrícola que la Densidad Aparente, pudiéndose utilizar como indicador para evaluar la compactación del suelo.

RECOMENDACIONES

Repetir la misma experiencia a lo largo de una rotación de cultivos para determinar cómo evolucionan las variables DAP y RM.

Evaluar e inferir sobre la compactación producida por el tránsito agrícola, utilizando otras variables como ser tasa de infiltración, densidad de raíces, estructura del suelo, actividad microbiana, etc.

Realizar la misma experiencia pero con algún cultivo implantado para determinar si existe efecto del tránsito agrícola sobre el rendimiento del cultivo.

Llevar adelante experiencias similares en diferentes tipos de suelo, clima y cultivo y comparar cómo responden, frente al tránsito agrícola en función de su contenido hídrico al momento de realizar el mismo.

Realizar experiencias similares con maquinarias dotadas de neumáticos tipo alta flotación o sistema de tracción a orugas, para determinar si existe disminución en el incremento de la compactación producida por el tránsito agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

AAPRESID 2007. Estimaciones de área- Cultivos- Oleaginosas- Cereales.
En: www.aapresid.org.ar/publicaciones/area/asp/index.htm. Consultado 09-12-2007.

ALAKUKKU, L. 1996. **Persistence of soil compaction due to high axle load traffic.I.** Short term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil & Tillage Research* (37): 211-222.

ALAKUKKU, L. 1997. **Long-Term soil compaction due to high axle load traffic.** Ed.Agricultural Research Centre of Finland. Jokioinen, Finland. Pag. 55.

ANALISLETTE, 1994. **22 ECONOMY Instruction Manual.** Pag. 215.

BACIGALUPPO S. y G. GERSTER. 2002. **Consecuencias del transito en húmedo sobre el suelo y los cultivos en siembra directa.** Panel de indicadores de calidad de suelos. Congreso de Aapresid. Rosario, Agosto.

BAVER L.D., W.H. GARDNER y W.R GARDNER 1982. **Física de suelos.** UTEHA. Mexico. Pag. 529.

BONADEO, E. 1997. **Efecto de la compactación subsuperficial de un Hapludol típico del sur de Córdoba sobre el comportamiento del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.)** Tesis Magíster Scientiae en Ciencias del Suelo. UBA-INTA, Argentina. Pag. 124.

BOTTA, G., D. JORAJURIA y L. DRAGHI. 2002. **Influence of the axle load, tyre size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil.** *J Terramechanics* (39): 47-54.

BOWEN, H.D., T.H. GARNER, y D.H. VAUGHN. 1994. **Advances in soil-plant dynamics**. In: ASAE. Advances in soil dynamics. St. Joseph. 255-280.

BRAGACHINI, M., A. MENDEZ., A. VON MARTINI y J. MONCHAMP. 2000. **Eslabonamiento productivo del sector maquinaria agrícola Argentina**. Informe Técnico del Consejo Federal de Inversiones. Pag. 104.

BRICCHI, E., A. DEGIOANNI y N. CUELLO. 1993. **Caracterización del perfil cultural en los suelos de la región central de Córdoba**. Actas del XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. Pag. 457.

BRYAN D., D. EAGLE y B. FINNEY. 1982. **Soil Management**. Farming Press Limited. Ipswich, Great Britain. 93-104.

CANTERO, A., E. BRICCHI, V. BECERRA y H. GIL. 1987. **Aplicación de un índice de aptitud relativa a las tierras del Departamento Río Cuarto-Córdoba**. Actas II Jornadas Científico-Técnicas Fac. de Agron. Y Veter. UNRC-Río Cuarto.

CANTERO, G. A., M. CANTU, J.M. CISNEROS, M. CANTERO BLARASÍN, A. DEGIOANNI, J. GONZALEZ, V. BECERRA, H. GILL, J. DE PRADA, S. DEGIOVANNI, C. CHOLAKY, M. VILLEGAS, A. CABRERA, y E. CARLOS. 1998. **Las Tierras y aguas del sur de Córdoba**. Propuestas para un manejo sustentable, UNRC, Argentina. Pag. 107.

CARTER, M.R. 1990. **Relative measurements of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams**. Can. J. Soil Sci. (70): 425-433.

CARTER, M.R. 1988. **Penetration resistance to characterize the depth and**

persistence of soil loosening tillage studies. Canadian Journal of Soil Science 68 (4): 657-668.

CISNEROS, J.M., C. CHOLAKY, E. BRICCHI, O. GIAYETTO y J. CANTERO. 1997. **Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Hapludol típico del centro de Córdoba.** Revista de la UNRC, 17 (1): 13-22.

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

CHOLAKY, C.G. 2003. **Efectividad y persistencia de una labor de descompactación con subsolador alado, en función de la compactación y humedad antecedente.** Tesis. Fac. de Agronomía y Veterinaria. Universidad NACIONAL DE RIO CUARTO. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

DADDOW, R. y G. WARRINTON. 1983. **Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture.** USDA F5. Watershed systems development group REP WSD6-TN00005. USDA-FS, Fort Collins. CO. Pag. 203.

DANIELSON, R.E., y P.L. SUTHERLAND. 1986. **Porosity.** En **A Klute (de) Methods of soil analysis.** Part 1 Physical and Mineralogical Methods- Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition. ASA and SSSA, Madison, WI. 443-461.

DA SILVA, A.P., B.D. KAY y E. PERFECT. 1994. **Characterization of the Least Limiting Water Range of Soil.** Soil Sci. Soc. Am. J. (58) 1775-1781.

DOMINGUEZ, J., J. RESSIA, D. JORAJURIA, R. BALBUENA y G. MENDIVIL. 2000. **Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánico.** Avances en Ingeniería agrícola. II Congreso Americano de Ingeniería Agrícola, 110-115.

DONALD, J., Y. L. CAMBELL y K. HENSHALL. 1991. **Soil Analysis Physical Methods. Bulk Density**. En: Smith A. y C. E. Mullis (Eds.) Marcel Dekker, Inc. USA.

EIJKELKAMP AGRISEARCH EQUIPMENT. 1995. **Penetrologger**. Manual de usuario. Pag. 28.

ERBACH, D.C. 1982. **Tillage for continuous corn-soybean rotation**. Transactions of the ASAE 25 (4): 906-918.

ETCHEVEHERE, P. 1976. **Normas de Reconocimiento de Suelos**. Sec. de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación -INTA. Dpto. de Suelos. (152). Pág. 211.

FINLAY, MJ., J.M. TISDALL, y B.M. MCKENZIE 1994. **Effect of tillage below the seed on emergence of wheat seedlings in a hardsetting soil**. Soil Till Res (29): 215-225.

FREITAG, D.R. 1979. **Penetration tests for soil measurements**. Trans. ASAE (11):750-753.

GAULTNEY, L., G. KRUTZ, G. STEINHARDT y J. LILJEDAHN. 1982. **Effects of subsoil compaction on corn yields**. Transactions of the ASAE (25): 563-575.

GERSTER, G., G., CORDONE, F. MARTINEZ, F. SAVAGIOTTI, S. BACIGALUPPO, R. PAGANI, A. ANDRIULO y C. SASAL. 2005. **Monitoreo de indicadores de sostenibilidad en los sistemas reales de producción agrícola del área de EEA INTA Claveros**.

GILL, W.R. y G.H. BOLT 1955. **Pfeffer's studies on the root growth pressures exerted by plants**. Agron. J. (47):166-168.

HADAS, A. y R. STIBBE 1977. **Modeling soil mechanical behavior during compaction.** In : Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Larson, Minnesota. 137-152.

HAKANSSON, I. 1990. **Subsoil compaction caused by heavy vehicles.** A long-term threat to soil productivity. Soil & Tillage Research, (29): 105-110.

HAKANSSON, I., W. B. VOORHEES y H. RILEY 1988. **Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes.** Soil & Tillage Research, (11): 239-282.

HAKANSSON, I y R.C. REEDER 1994. **Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response.** Soil & Tillage Research.

HAKANSON I. y J. LIEPIC. 2000. **A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction.** Soil and Tillage Research. (53): 71-85.

HARTGE, K. ACORNEA 1999. **Einführung in die Bodenphysik.** Enke Stuttgart 3rd. Ed. Pag. 303.

HORN, R. y M. LEBERT 1994. **Soil compactibility compressibility.** In: soil compaction in crop production. Soanne and Van Ouwerkerk. Minnesota. USA. 45-69.

HORN, R.. 1988. **Compressibility of arable land.** In : Impact of water and external forces on soil structure, Drescher, Horn and De Boodt. Catena supplement 11. Hannover Germany. 53-71.

INTA- MAGyRR 1994. **Carta de Suelos de la República Argentina.** Hoja 3366-12 Río de los Sauces y Hoja 3366-18 Alpa Corral.

INTA. 1998. **Siembra Directa**. Editorial Hemisferio Sur, S.A. Pag. 333.

□JONES, C.A. 1983. **Effect of Soil Texture on Critical Bulk Density for Root Growth**. Soil Sci. Soc. Am. J. (47): 1.208–1.211.

JORAJURIA D. y L. DRAGHI 2000. **Sobre compactación del suelo agrícola**. Parte I: Influencia del peso y del numero de pasadas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (4):445-452.

JORAJURIA D. 2001. **Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular agrícola**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. Pag. 135.

KÉZDI Á. 1980. **Soil testing. Handbook of Soil Mechanics**. Elsevier, Vol. 2, Pág. 258.

KLUTE, A. 1986. **Water retention: Laboratory methods**. En A Klute (Edit.) Methods of soil analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph no. 9, Madison, WI. (2) 635-686.

LAFLEN, J.M., M. AMENIYA, E.A. HINTA 1981. **Measuring crop residue cover**. J. Soil Water Conservation (36): 341-343.

LIEBIJ, M.A., A.J., JONES, L.N. MIELKE y J.W. DORAN 1993. **Controlled wheel traffic effects on soil properties in ridge tillage**. Soil Sc. Soc. Am. J. (57): 1061-1066.

LIEPIC, J.,I. HAKANSSON, S. TARKIEWICZ y J. KASSOWSKI. 1991. **Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils**. Soil Till. Res. (19): 307-317.

MEEK P, 1996. **Effects of skidder traffic on two types of forest soils**. Technical Report Forest Eng. Res. Inst. of Canada. TR117. Pag. 12.

MISRA, R.K., A.R. DEXTER y A.M. ALSTON 1986. **Penetration of soil aggregates of finite size II.** Plant roots. Pl. Soil (94):59-85.

NASR H y F. SELES 1995. **Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seeded.** Soil and Tillage Research (34): 61-76.

OSKUI, K. E. y W B. VOORHEES 1990. **Prediction of planting timeliness penalties for corn and soybean in northern corn belt.** (Predicción de las pérdidas por la siembra fuera de término de maíz y soja en el norte del cinturón maicero) Madison, WI, USA. In: Agron. Abstr. Pag.153

PECORARI, C. 1988. **Inestabilidad estructural de los suelos de la pampa ondulada.** Informe Técnico 216. INTA Pergamino. Argentina.

RAPPER, R. y D. ERBACH 1990. **Prediction of soil stresses using the finite element method.** Transaction of the ASAE. St. Joseph, Vol. 33. (3):725-730.

RILEY H, 1994. **The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway.** Soil Till Res (29): 211-214.

RICRARD, G., H. BOIZARD, J. ROGER-ESTRADE, J. BOIFFIN y J. GUERIF. 1999. **Field study of soil compaction due to traffic in northern France pore space and morphological analysis of the compacted zones.** Soil and Tillage Research. Vol 51. (1-2): 151-160.

SÀNCHEZ-GIRÒN RENEDO 1996. **Dinámica y Mecánica de suelos.** Ed. Agrotecnicas. Madrid. España. Pag. 426.

SOANE, B.D. y C. VAN OUWERKERK 1994. **Soil compaction problems in world agriculture.** In: Soane, B.D. y van Ouwerkerk, C., eds. Soil compaction in crop production. Chapter Elsevier Science, The Netherlands. (1): 1-21.

STONE, D.A. 1998. **Subsoil strength and yield of vegetable crops**. Soil use and management, Oxford, London. Vol.4, (1):10-14.

THREADGILL, E.D. 1982. **Residual tillage effects as determined by cone index**. Transactions of the ASAE, Vol.25, (4) 859-863, 867.

TORBERT, H. y D. REEVES 1995. **Traffic and residue management systems: effects on fate of fertilizer N in corn**. Soil Till Res (33):197-213.

UNGER, P. W. 1996. **Soil bulk density, penetration resistance and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions**. Soil Till Res (37):67-75.

UPADHYAYA, S. K., W. CHANCELLOR, J.S. PRERUMPRAL, R.S. SCHAFFER, W. GILL y G. VANDERBERG 1994. **Advances in Soil Dynamics**. Ed. De Vore-Hansen. St. Joseph, MI. Vol 1, Pag. 313.

VEIHMEYER, F. J. y A.H. HENDRICKSON 1948. **Soil density and root penetration**. Soil Sei (65): 487-493.

VEPRASKAS, M.J. 1988. **Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils**. Soil Sci. Soc. Am. J. (52): 1117-1121.

WOORHEES, W.B., W.W. NELSON y G.W. RANDALL 1986. **Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads**. Soil Science Soc. Am. Journal,(50):428-433.

WESTFALL, P.H., R.D. TOBIAS, D. ROM, R.D. WOLFINGER y Y. HOCHBERG 1999. **Multiple Comparison and Multiple Test. Using the SAS System**. SAS Institute inc. Cary, NC, USA, Pag. 397.

ANEXO

Tabla 1: Características edáficas del sitio experimental hasta la profundidad estudiada.

HORIZONTE	A	AC
Espesor (cm)	0-15	15-30
Materia Orgánica (%)	1.67	1.22
Granulometría (%)		
Arcilla (< 2 μ)	10.4	12.3
Limo (2- 50 μ)	43.8	45.8
Arena muy fina (50-250 μ)	44.3	40.8
Arena media y gruesa	0.2	0.2
Contenido de agua (%)		
0,3 Bares	19.32	19.62
15 Bares	9.81	9.21
Limites por Atterberg (% Agua)		
Límite inferior de plasticidad	No presenta	No presenta
Límite superior de plasticidad	27,69	24,36
Numero plástico	-	-
Ensayo Proctor		
Densidad máxima ($Mg\ m^{-3}$)	1,575	1,635
Porcentaje de humedad	18.92	18,73

Tabla N 2: Datos para la estimación del nivel de cobertura superficial por el método de la transecta.

ESTACION	COBERTURA (%)
1	90
2	94
3	91
4	90
PROMEDIO	91.25

Tabla N 3: Datos para la estimación del nivel de cobertura superficial por el método del peso.

ESTACION	COBERTURA (Kg de MS/HA)
1	13650
2	15225
3	12.700
4	14320
PROMEDIO	13974

Tabla N 4: Determinación del límite líquido con el cascador de casagrande.

TRAT.	R.	TARA	PH+T	PS+T	PARCIAL	HUM. (%)	HUM. X	Nº DE GOLPES	LIMITE LIQUIDO
H1 R1	1	4	39,35	30,85	0,3165	31,65		5	26,09
	2	3,82	31,57	25,14	0,3015	30,15	29,61	7	25,87
	3	4,55	40,19	32,61	0,2701	27,01		18	25,96
H1 R2	1	4,63	30,1	24,59	0,276	27,6		13	25,51
	2	4,39	23,91	19,61	0,2825	28,25	28,62	11	25,59
	3	4,18	27,88	22,41	0,3	30		7	25,75
H2 R1	1	4,5	30,77	25,6	0,245	24,5		17	23,39
	2	3,86	26,2	21,72	0,2508	25,08	25,43	10	22,46

	3	4,6	30,21	24,81	0,2671	26,71		9	23,62
	1	4,47	26,46	21,84	0,2659	26,59		22	26,18
	2	4,46	31,41	25,4	0,287	28,7	28,01	11	26
H2 R2	3	4,55	29,41	23,86	0,2874	28,74		9	25,42

H 1= horizonte A. H 2= horizonte AC. R 1/2= repetición 1/2. TRAT= tratamiento. R= repetición.

PH+T= peso húmedo + tara. PS+T= peso seco + tara. HUM.= humedad.

Tabla N 5: Análisis estadístico sobre la variable Resistencia Mecánica como respuesta a los tratamientos.

PROF.	0 – 5 cm		5 – 10 cm		10 – 15 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
TESTIGO	A		A		A	
SECO	A		A			B
C. CAMPO	A		A			B
MOJADO		B		B		B
ANOVA	0,0077		0,0373		0,0145	
PROF.	15 – 20 cm		20 – 25 cm		25 – 30 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
TESTIGO	A		A		A	
SECO	A		A		A	
C. CAMPO	A		A		A	
MOJADO	A		A		A	
ANOVA	0,6914		0,3998		0,1205	

Nivel de significancia 95 %.

Tabla N 6: Análisis estadístico sobre los distintos Contenidos Hídricos del suelo en el momento de realizar los tratamientos.

PROF.	0 – 5 cm		5 – 10 cm		10 – 15 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
SECO	A		A		A	

C. CAMPO		B		B		B
MOJADO		B		B		B
ANOVA	0,0106		0,0089		0,0206	
PROF.	15 – 20 cm		20 – 25 cm		25 – 30 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
SECO	A		A		A	
C. CAMPO		B		B	A	
MOJADO		B		B	A	
ANOVA	0,0334		0,0248		0,6397	

Nivel de significancia 95 %.

Tabla N 7: Análisis estadístico sobre la variable Densidad Aparente como respuesta a los tratamientos.

PROF.	0 – 5 cm		5 – 10 cm		10 – 15 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
TESTIGO	A		A		A	
SECO	A	B	A		A	
C. CAMPO		B	A		A	
MOJADO	C			B		B
ANOVA	0,0014		0,0052		0,0216	
PROF.	15 – 20 cm		20 – 25 cm		25 – 30 cm	
TRAT.	SIMILITUD		SIMILITUD		SIMILITUD	
TESTIGO	A		A		A	
SECO	A		A		A	
C. CAMPO	A			B	A	
MOJADO		B	C		A	
ANOVA	0,0489		0,0326		0,21	

Nivel de significancia 95 %.

Tabla N 8: Datos de Densidad Aparente obtenidos como resultado de los distintos tratamientos.

DAP (MG*m⁻³)	PROFUNDIDAD					
TRATAMIENTO	0- 5 cm	5-10 cm	10-15 cm	15-20 cm	20-25 cm	25-30 cm
TESTIGO	1,05	1,26	1,33	1,37	1,4	1,49
SECO	1,16	1,29	1,33	1,39	1,5	1,6
C. CAMPO	1,18	1,29	1,38	1,39	1,37	1,67
MOJADO	1,45	1,45	1,48	1,46	1,47	1,48

Seco (11 % g g⁻¹), Capacidad de Campo (21 % g g⁻¹), Mojado (26 % g g⁻¹).

Tabla N 9: Datos de Porosidad Total obtenidos como resultado de los distintos tratamientos.

PT cm³/cm³ %	PROFUNDIDAD					
TRATAMIENTO	0-5 cm	5-10 cm	10-15 cm	15-20 cm	20-25 cm	25-30 cm
TESTIGO	60,5	52,6	49,9	48,3	47,1	43,1
SECO	56,1	51,3	49,6	47,5	43,7	39,4
C. CAMPO	55,4	51,1	48,1	47,6	48,2	38,7
MOJADO	45,2	45,1	44,2	45,1	44,6	43,9

Seco (11 % g g⁻¹), Capacidad de Campo (21 % g g⁻¹), Mojado (26 % g g⁻¹).

Tabla N 10: Datos de Compactación Relativa obtenidos como resultado de los distintos tratamientos.

C. RELATIVA	PROFUNDIDAD					
TRATAMIENTO	0-5 cm	5-10 cm	10-15 cm	15-20 cm	20-25 cm	25-30 cm

TESTIGO	66,3	79,7	83,4	83,6	85,7	92,1
SECO	73,8	81,8	84,7	85,1	91,5	97,3
C. CAMPO	74,9	82,1	87,3	84,9	83,9	97,5
MOJADO	92,1	92,2	93,7	88,9	90,1	90,7
	DAP 1,575 / HUM 18,92 %			DAP 1,635 / HUM 18,73 %		

Seco (11 % g g⁻¹), Capacidad de Campo (21 % g g⁻¹), Mojado (26 % g g⁻¹).

Gráfico N 1: Resultados graficados del ensayo PROCTOR para los horizontes A y AC.

