

Rev. FCA UNCUYO. 2016. 48(1): 79-99. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo en Argentina

Soil compaction induced by machinery at polo fields in Argentina

Daniel Andrés Laureda ¹, Guido Fernando Botta ^{1,2}, Alfredo Tolón Becerra ³, Héctor Gustavo Rosatto ¹

Originales: *Recepción*: 27/04/2015 - *Aceptación*: 23/12/2015

RESUMEN

La nivelación de tierras es una forma de disturbio del suelo que altera sus propiedades físicas. En Argentina la nivelación de tierras se ha extendido también, con el objeto de formar campos deportivos. El hecho de mover suelo quitando de un lugar para rellenar en otro, produce una ruptura de la estructura con aumento del volumen ocupado por aire. Las partículas se reacomodan de manera distinta a la original. Los movimientos de suelo, producen a menudo una mezcla de horizontes edáficos. Este efecto disminuye el volumen ocupado por los poros e incrementa la densidad aparente y la tensión del suelo. Uno de los principales problemas que se genera con la sistematización es la compactación del suelo. La misma a su vez incide en el índice de esponjamiento /compactación utilizado para el cálculo de volumen de tierra a mover. El sitio de estudio se ubica a 100 kilómetros de Buenos Aires (34°31'47" S 59°02'15" O). Los objetivos principales del trabajo fueron, i) Aportar evidencia a la plataforma cognitiva actual, relativa al comportamiento físico-mecánico de suelos sometidos al movimiento de tierra con fines deportivos ii) Caracterizar el comportamiento mecánico de un suelo argiudol típico sistematizado con el fin de utilizarlo como campo de polo. Los principales resultados obtenidos fueron: a) Se alcanzaron índices de esponjamiento/compactación > 25%, b) el impacto del movimiento del suelo sobre el contenido de materia orgánica es menor al ocurrido sobre los parámetros físicos, c) tanto la intensidad de tránsito de las maquinarias como el peso de las mismas influyen sobre el índice de esponjamiento/compactación, d) el pasaje de la maquinaria produce compactación a nivel subsuperficial. La compactación superficial se da en mayor medida en el campo en uso, debido a las maquinarias de mantenimiento y los caballos para el juego.

Palabras clave

sistematización • mecánica de suelos • coeficiente de esponjamiento/compactación • campo de polo

- 1 Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía; Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. Av. San Martín 4453 CABA. Argentina.
- 2 Universidad Nacional de Luján, Dpto. de Tecnología. Cruce de Ruta 5 y Av. Constitución, C. P. 6700, Luján. Argentina.
- 3 Universidad de Almería Ctra. Sacramento s/n. La Cañada de San Urbano. 04120. Almería, España.

ABSTRACT

The land leveling is a form of disturbance of the soil that alters its physical properties. In Argentine the leveling of lands is also extended to a different objective: the sport field construction. The movement of soil from one place to another one produces a rupture of the structure with increase of the volume occupied by air. The soil particles are reordered in a different form from the original one. The soil movements often produce a mixture of edafics horizons. This packing effect diminishes the volume occupied by the pores and increases bulk density and soil tension. One of the main problems that are generated by the land leveling is the compaction. When soil is compacted, non-accommodating faces form smaller aggregates pores. During the whole work, different problems appears, such as: leveling precision; project mark errors in the land, the machinery passes calculation to carry out the work; soil moisture content at the land leveling and the rain value during the earth movement. The present study was carried out in fields located 100 km away from Buenos Aires (34°31'47" S 59°02'15" W). The main objectives of the work were i) to contribute with evidence to the now-a-day knowledge platform, related to the soil physical-mechanical behavior in soils subjected to soil movement with sport aims; ii) to feature the mechanical behavior of a typical argiudol soil in a land leveled polo field. The more important results were: a) swelling factor values > 25%, b) the impact of the soil movement on the organic mater content is smaller than the one happened on the physical parameters, c) both, the traffic intensity as well as the machinery weight have influence on the swelling factor index/compaction d) the machinery passes produces subsoil compaction. Top soil compaction is given, in a further degree, in a field in use, due to the uses of maintenance machineries and the horse transit for the game.

Keywords

grading • soil mechanics • swelling factor • polo field

INTRODUCCIÓN

La nivelación de tierras es una forma de disturbio del suelo que altera sus propiedades físicas y es comúnmente conducida en campos para el cultivo de arroz (*Oriza sativa* L.) (13). En Argentina esta práctica se ha extendido, con el objeto de formar campos deportivos y entre ellos los de polo. El desarrollo de estos campos requiere la modificación de superficies del orden de 5 a 6 hectáreas según los casos.

La provincia de Buenos Aires concentra gran parte de esta actividad y tiene mucho desarrollo el cinturón ubicado entre 50 y 150 km de la Ciudad de Buenos Aires.

Estos campos deben reunir determinadas características de diseño, a saber, escurrimiento de excesos de agua sin que queden superficies encharcadas, distribución uniforme de humedad, horizonte superficial de espesor tal que asegure el desarrollo de raíces de césped, superficie no dura ni compactada.

En un sentido restringido al uso topográfico, "sistematizar" un terreno, es ajustar la superficie del mismo a la de un plano proyecto, cuya inclinación responda a las pendientes naturales o a las establecidas por el diseñador, de modo

de lograr el menor movimiento de tierra posible (34).

Unger *et al.* (1990) e Hidalgo *et al.* (2014) indican que, la estabilidad de los agregados, el contenido de materia orgánica, arcilla, limo y arena fueron significativamente afectados por la nivelación o sistematización del suelo.

Seino (1999) y Rosatto *et al.* (2009), señalan la importancia de considerar la desuniformidad de la naturaleza física del suelo en los movimientos de suelos.

Uno de los problemas que se genera con la sistematización es la compactación del suelo. Esta última es, de acuerdo con Swan *et al.*, (1987), el efecto de "empaque" de una fuerza mecánica sobre el suelo. Este efecto disminuye el volumen ocupado por poros e incrementa la densidad aparente y tensión del suelo.

Varios autores vinculan la compactación a factores tales como el tráfico y el peso de la maquinaria agrícola. Para Botta *et al.* (2002) y Domínguez *et al.* (2000), el tráfico vehicular es el principal responsable de la compactación inducida en suelos bajo producción, siendo la textura y su contenido de humedad los aspectos más relevantes en relación con la reducción del espacio poroso. Alakukku (1996) determinó que la compactación inducida por el tráfico vehicular persistía entre 3 y 11 años en suelos con porcentajes de arcilla entre el 6% y el 85%, aún con períodos de congelamiento del suelo en profundidad, cuando el mismo fue transitado con altas cargas sobre el eje.

El número de veces en que el sustrato es transitado, también es un factor determinante. Tanto la densidad aparente como la profundidad y la superficie de suelo compactado, aumentan progresivamente con el número de pasadas (8, 25).

La densidad aparente y la resistencia a la penetración son frecuentemente usadas

para la caracterización del grado de compactación de un suelo y del efecto producido por las labranzas (3).

Es generalmente aceptado que valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa reducirían el crecimiento de las raíces, y de 2 o más MPa lo impedirían (41).

En cuanto al peso de la maquinaria, Botta *et al.* (2006a), indican que el mismo en combinación con el tráfico, son los responsables de la compactación en suelos bajo producción, siendo la textura y su contenido de humedad los aspectos más relevantes en relación con la reducción del espacio poroso.

La compactación subsuperficial observada en un suelo franco arenoso es explicada, en parte, por la coincidencia de los estados de humedad óptimos para labranza, con los que producen la máxima compactación (16).

Busscher *et al.* (2000) y Topp *et al.* (2003), citado por Bachmann *et al.* (2006) señalan que la fuerza de los suelos trabajados varía rápidamente con los cambios en el contenido de humedad, determinando el tiempo posible de *transitabilidad*.

Peng *et al.* (2004) citan que la estructura de poros del suelo y la conductividad hidráulica cambian durante la compactación.

Concerniente al índice de esponjamiento/compactación, el hecho de mover suelo quitando de un lugar para agregar en otro, produce una ruptura de la estructura con un aumento del volumen ocupado por aire.

Posteriormente, con el movimiento de la maquinaria (peso), lluvia o riego, las partículas se reacomodan de manera distinta a la original.

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos cita que el volumen comprendido en un metro cúbico de tierra, en su condición natural, aumenta al aflojarse por causa de la excavación.

Esto se conoce como "aumento de volumen". Cuando esta tierra se vuelca en una zona de terraplén (relleno) y se compacta, su volumen disminuye. Algunas de las razones expuestas para explicar el factor de pérdida de volumen aparentemente alto, requerido en la nivelación de terrenos, son: i) La mayor parte de los materiales movidos en la nivelación de terrenos forman la capa superficial (arable) con un alto contenido de materia orgánica y con un peso relativamente bajo por unidad de volumen original; ii) Las áreas de excavación del terreno están sujetas a una compactación considerable debido al equipo que se emplea en el movimiento de tierra (38).

Rodríguez Plaza (2000) cita para trabajos de sistematización, coeficientes de aumento del volumen de desmonte respecto del de terraplén, los cuales varían entre el 15 y el 50% en función del tipo de suelo (textura) y la profundidad de corte desde 0 a 1 metro de profundidad.

El movimiento de tierra con equipos pesados no se realiza con un 100% de eficiencia, ya que parte del material se pierde en el acarreo, pero muy especialmente, por la compactación del material. Por estas razones, en un cálculo aproximado del movimiento de tierra, se recomienda incrementar en un 30% el volumen calculado (31).

De la revisión bibliográfica no surge un tratamiento en detalle en relación con la generación del llamado factor de "esponjamiento". En los casos donde se presentan valores, estos se relacionan con clases texturales sin antecedentes de carácter experimental que fundamenten los mismos.

Por otra parte, los datos existentes, al no corresponder al país, no aseguran que se ajusten a las características de los suelos.

Objetivos principales

i) Aportar evidencia a la plataforma cognitiva actual, relativa al comportamiento físico-mecánico de suelos sometidos al movimiento de tierra con fines deportivos.

ii) Caracterizar el comportamiento mecánico de un suelo argiudol típico sistematizado con el fin de utilizarlo como campo de polo.

Objetivos específicos

i) Aportar conocimientos relativos con la incidencia de la compactación producida por la maquinaria en la sistematización .

ii) Encontrar posibles relaciones entre la compactación producida en la sistematización y los factores de intensidad del tráfico, peso y número de pasadas ($Mg.km.ha^{-1}$), en suelos removidos con fines deportivos.

iii) Estudiar el efecto del tipo y textura del suelo analizado sobre el índice de esponjamiento e interpretar valores que puedan ser utilizados como normales en suelos sistematizados.

Hipótesis

i) Con independencia de la humedad edáfica, el impacto de la sistematización es mayor sobre la densidad aparente y la resistencia a la penetración que sobre la materia orgánica.

ii) Sin perjuicio de su mayor capacidad portante, los suelos sistematizados, reciben el impacto del tráfico y del pisoteo animal.

iii) La distribución de la compactación subsuperficial producida por tráfico en las tareas de sistematización, se debe al peso de la maquinaria utilizada en dicha tarea.

iv) El estado mecánico del suelo no es el único factor que incide sobre el índice de esponjamiento del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayo

El ensayo se realizó en dos lotes ubicados a 100 km de Buenos Aires (34°31'47" S 59°02'15" O).

El suelo corresponde a un Argiudol típico, fase inclinada fina, illítico, térmica (Soil Taxonomy 1994), perteneciente a la serie Solís, La región está cubierta uniformemente por un manto loésico de más de dos metros de espesor. Este material, es rico en vidrio volcánico, anfíboles, piroxenos y minerales de arcilla del grupo de las illitas (el porcentaje de arcilla es de aproximadamente 17%).

El paisaje comprende lomas alargadas y planicies suavemente onduladas.

En las posiciones más elevadas y mejor drenadas se desarrollan Argiudoles típicos; en las pendientes se encuentra Argiudoles típicos, inclinados; en las posiciones más planas y algo deprimidas evolucionan a Argiudoles ácuicos; en las

partes bajas adyacentes a los cursos de agua, se encuentran Natracuales típicos y Natracualfes típicos.

El Desarrollo es A1 - B1 - B21t - B22t - B23t -Cca. Bien drenado. Sin alcalinidad ni salinidad.

El horizonte A1 (Ap-A12) tiene 4,51% de materia orgánica y textura franco-limosa a franco-arcillo-limosa.

Entre los horizontes subsuperficiales el B1 tiene textura franco-limosa y estructura en prismas moderados. El B2t, dividido en tres subhorizontes: B21t, B22t y B23t es franco-arcillo-limoso a arcillo-limoso con estructura en prismas moderados y abundantes barnices. El B3 tiene textura franco-limosa, estructurado en bloques, con abundantes barnices.

El perfil típico y los datos analíticos se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1. Datos del perfil del suelo.

Table 1. Soil Profile data.

Horizontes	Ap	A12	B1	B21t	B22t	B23t	B3	Cca
Profundidad (cm)	0 - 15	16 - 22	23 - 35	35 - 60	65 - 80	90 - 110	120-150	160 - 220
Carbono Orgánico (%)	1,74	1,35	0,93	0,63	0,50	0,31	0,22	0,14
Nitrógeno Total (%)	0,24	0,14	0,10	0,085	0,075	0,058	0,042	-
Arcilla (<2 μ)	21,2	25,5	24,9	33,2	47,5	33,0	23,0	15,8
Limo (2-20 μ)	32,3	34,7	29,8	29,3	20,8	31,2	32,9	28,7
Limo (2-50μ)	75,6	70,8	67,2	61,3	50,0	63,0	72,7	79,9
Arena fina (100 - 250μm)	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
pH	5,4	5,3	5,5	5,5	5,8	6,0	6,0	7,5
pH en H ₂ O (1: 2,5)	5,8	5,8	6,0	6,2	6,5	6,4	6,4	7,9
Cationes de cambio (m.e. 100g ⁻¹)								
Ca ⁺⁺	11,4	12,7	12,0	13,8	18,3	17,2	16,5	-
Mg ⁺⁺	2,9	2,5	3,1	4,5	6,5	6,4	3,8	-
Na ⁺	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5
K ⁺	1,4	1,0	0,9	1,3	2,3	2,4	2,3	2,4

En cuanto a las maquinarias, los tractores del ensayo son los comúnmente utilizados en estas labores y la potencia de los mismos, responde a los valores modales obtenidos en estudios previos realizados en la región bajo estudio. Corresponden a un tractor Deutz A70 y un tractor Deutz A85. Sus características se pueden ver en la tabla 2.

Los implementos de labranza y movimiento de suelo utilizados fueron: pala de arrastre de 3 m³ de capacidad; rastra de discos y dientes; hoja niveladora de arrastre "Grosspal" de 3 metros de ancho

de implemento y rabasto nivelador de 6 metros de ancho. Para el mantenimiento se utiliza un tractor Massey Ferguson, cuyas características se presentan en la tabla 3.

El estudio se realizó en dos lotes abarcando 9,6 hectáreas, (325 por 150 y de 315 por 150 metros cada uno).

En cada lote se efectuó un relevamiento planialtimétrico -nivelación areal- con nivel de anteojo Modelo Wild NAK2, en puntos ubicados según una cuadrícula de 25 x 25 metros, materializados con estacas, precisando la ubicación altimétrica al centímetro.

Tabla 2. Características de los tractores utilizados en los ensayos.

Table 2. Characteristics of the tractors used in the trials.

Características de los tractores	Deutz A70	Deutz A 85
Tracción	2WD	2WD
Potencia en el motor (kW)	47,4	58
Peso total con lastre (kN)	43	44,1
Peso eje delantero (kN)	12,9	13,1
Peso eje trasero (kN)	30,1	31
Rodado delantero	750,20	750,34
Rodado trasero	15,00-34	15,00-34
Estado de los rodados delanteros y traseros	Regular	Regular
Altura de los tacos ruedas motrices (mm)	29	27
Presión de inflado delantero (kPa)	160	160
Presión de inflado trasero (kPa)	100	90

Tabla 3. Características del tractor Massey Ferguson.

Table 3. Massey Ferguson tractor characteristics.

Características del tractor	Massey Ferguson
Tracción	2WD
Potencia en el motor (kW)	32,6
Peso total con lastre (kN)	20,6
Peso eje delantero (kN)	6,2
Peso eje trasero (kN)	14,4
Rodado delantero	650 - 16
Rodado trasero	16,9 - 34
Estado de los rodados delanteros y traseros	bueno
Altura de los tacos ruedas motrices (mm)	37
Presión de inflado delantero (kPa)	200
Presión de inflado trasero (kPa)	110

Con los datos del relevamiento se efectuó el modelo de movimiento de tierra consistente en modificar la forma del terreno creando condiciones aptas para su utilización como campo de polo (pendientes adecuadas para la no acumulación de agua).

Terminado el movimiento del suelo y ajustada la forma al modelo, se efectuó la medición de compactación.

Las variables relacionadas con compactación fueron la resistencia a la penetración (R.P.) con penetrómetro registrador, la densidad aparente (DAP) con sonda nucleogammamétrica, infiltración básica (IB) y porosidad total del suelo (PTS) tomados sobre el terreno.

Los puntos de toma de dichas variables, se ubicaron planimétricamente mediante la determinación de sus coordenadas "X" e "Y".

Se utilizó una Estación Total Pentax PCS-215 de 1500 metros de alcance, con +/- 5 mm + 3 ppm de precisión en la distancia y 5" en la precisión angular.

Se aseguró la ubicación planimétrica de los puntos de muestreo dentro del centímetro. Los datos obtenidos se volcaron en un programa de dibujo asistido que permitió determinar la distancia entre los puntos mencionados, en los distintos tratamientos, y descartar los muy próximos y cuyo valor de R.P., DAP, IB y PTS pudiera corresponder a una muestra disturbada por una toma anterior en el mismo sitio o muy próximo a él.

Tratamientos

Los tratamientos fueron determinados por la secuencia de tareas empleadas para realizar el movimiento del suelo así como la maquinaria empleada y las tareas propias del mantenimiento y uso del campo.

Tratamiento 1 (Testigo)

Suelo sin realización de labores.

Tratamiento 2 (Campo recién terminado).

El trabajo iniciado con palas de arrastre individuales en cada tractor (no en tándem) (Deutz A70 con la pala "tipo ladrillera" y el Deutz A85 con la pala John Deere, con pasadas hasta totalizar los m³ de movimiento de tierra según modelo).

Tareas finalizadas con 4 pasadas con rastra de discos y dientes, hoja de arrastre niveladora Grosspal y por último pasadas de rabasto nivelador.

Tratamiento 3 (Campo en uso)

Trabajo iniciado con palas de arrastre individuales en cada tractor (no en tándem), utilizando pala "tipo ladrillera" y pala John Deere, con pasadas hasta totalizar los m³ de movimiento de tierra según modelo. Posteriormente, aplicación de 4 pasadas de rastra de discos y dientes. Luego pasaje de hoja niveladora de arrastre. Tres pasadas de rabasto nivelador (longitudinal, transversal, y al sesgo u oblicua). A estas labores se añaden las correspondientes a dos años de mantenimiento y uso.

Luego de tres meses de finalizado el trabajo de movimiento de tierra, el tratamiento 2 necesitó, para corregir imperfecciones, rellenar con arena y tierra usando la pala y hoja niveladora de arrastre. En los tratamientos 2 y 3 se efectuó el control de niveles del terreno, verificando la correspondencia de los mismos con el modelo, como se mencionara.

Variables físicas experimentales del suelo vinculadas con compactación

El suelo fue caracterizado en forma previa a los ensayos. Se realizó para obtener las curvas de compactabilidad Proctor (1933) (ASTM-D-698-58 T) en el intervalo de 0 a 300 mm de profundidad.

Se determinó Densidad Aparente (DAP) con sonda núcleo gammamétrica; humedad (H) por retrodispersión de electrones para intervalos de 0 a 150 mm,

150 a 300 mm y 300 a 450 mm.; Resistencia a la Penetración (RP) con penetrómetro de cono (ASAE S 313) cada 2,5 cm hasta 450 mm.; Porosidad por horizontes; Materia orgánica (MO) en laboratorio.

Realizado el movimiento de suelo, se evaluó las variables respuesta vinculadas con la persistencia de la labor en función de la intensidad de tránsito aplicada.

Las intensidades de tráfico fueron calculadas a partir del peso del equipo, su ancho de labor y el número de pasadas sobre el terreno (3, 6, 7, 8, 9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consideraciones para el sitio de ensayo (caracterización)

A efectos de independizar el parámetro resistencia a la penetración de la humedad del suelo que pudiera enmascarar densificaciones, se tomó en forma previa a la realización de las labores de cada tratamiento y de la toma de este parámetro, la humedad en el perfil del suelo (tabla 4). Esta misma modalidad fue hecha también en el testigo.

Luego de la toma de datos de humedad, no se encontró influencia de esta en los valores medidos de R.P, en consecuencia se optó por trabajar con los datos tomados inmediatamente después de las labores.

Tomando como base la propuesta de selección de neumáticos del Manual editado por el NIAE (National Institute Agricultural Engineering) (20) resulta que, para todos los tractores utilizados en los ensayos, los tamaños de sus neumáticos coinciden con la propuesta citada, y con las aconsejadas por el fabricante del tractor (tablas 2 y 3, pág. 84).

Las presiones de inflado de los neumáticos utilizados en los tractores probados estaban comprendidas dentro de los intervalos de presiones recomendados por Dwyer y Febo (1987).

En cuanto a la condición original del suelo sin laboreo, que fuera considerada como testigo, se presentan los valores obtenidos de resistencia a la penetración y densidad aparente.

Tabla 4. Valores de humedad gravimétrica en el perfil del suelo para el testigo previo al ensayo.

Table 4. Gravimetric humidity values in the soil profile for the test previous to the trial.

Intervalo de profundidad (mm)	Humedad (% p/p)
	Testigo
0 - 150	22 a
150 - 300	22 a
300 - 450	21,5 a
450 - 600	20 a

Letras distintas en sentido horizontal denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters horizontally denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Tabla 5. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa), medidos en la parcela testigo sin laboreo en el perfil de 0 a 150 mm.

Table 5. Mean values of penetrometer resistance (kPa), measured in the control plot without tillage in a 0 to 150 mm profile.

Prof. (mm)	0	25	50	75	100	125	150
Testigo	466,6	872	1358	1868	1931	1970	1870,3

Tabla 6. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos en la parcela testigo sin laboreo en el perfil de 175 a 325 mm.

Table 6. Mean values of penetrometer resistance (kPa), measured in the control plot without tillage in a 175 to 325 mm profile.

Prof. (mm)	175	200	225	250	275	300	325
Testigo	1996	1743	1637	1501	1496	1501	1370

Tabla 7. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos en la parcela testigo sin laboreo en el perfil de 350 a 450 mm.

Table 7. Mean values of penetrometer resistance (kPa), measured in control plot without tillage in a 350 to 450 mm profile.

Prof. (mm)	350	375	400	425	450
Testigo	1203	1110	1063	910	921

Tabla 8. Valores de densidad aparente (Mg/m³) medidos en la parcela testigo el intervalo de 0 - 450 mm de profundidad.

Table 8. Mean values of bulk density (Mg/m³) measured in the control plot in the 0 to 450 mm soil depth range.

Prof. (mm)	0 - 150	150 - 300	300 - 450
Testigo	1,45	1,35	1,43

Tabla 9. Valores de infiltración básica, humedad y densidad aparente en el rango de 0 - 200 mm de profundidad.

Table 9. Values of basic infiltration and bulk density in the 0 to 200 mm depth range.

Profundidad (mm)	Sitio de ensayo
lb (cm/h)	3,1
Humedad (%)	22
Dap. (g/cm ³)	1,44

La curva de compactabilidad característica "Proctor", (figura 1, pág. 88) realizada a intervalos de 300 mm de profundidad, dentro del perfil de suelo estudiado, muestra que se producirá la máxima compactación prácticamente a la humedad edáfica del 20%.

Estudio de la respuesta del suelo a los tratamientos de laboreo realizados en el sitio de ensayo.

Resistencia a la penetración

Si se siguen los valores de humedad del suelo estudiado (tabla 10, pág. 88), no hubo diferencias significativas entre estratos para las dos condiciones de suelo utilizadas.

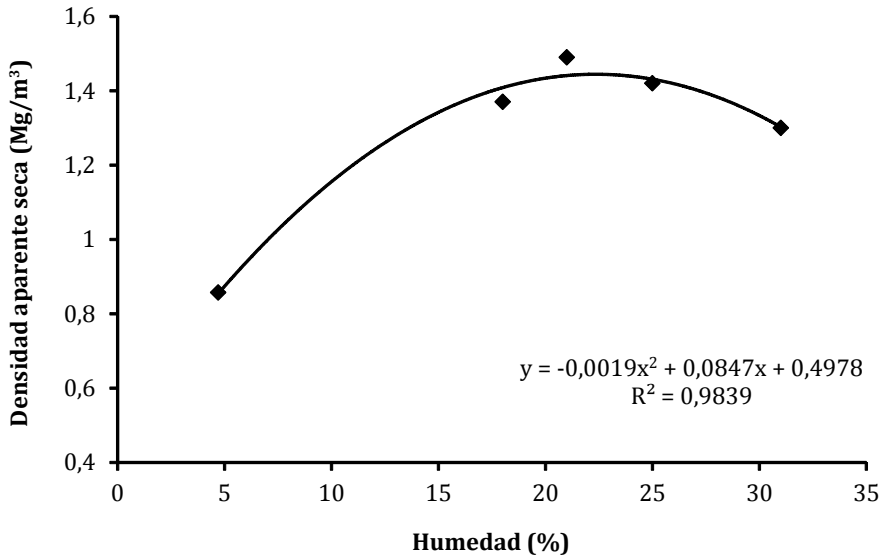


Figura 1. Curvas de compactación de suelo entre 0-300 mm (Test de Proctor).

Figure 1. Compaction soil curves in the range 0-300 mm (Proctor test).

Tabla 10. Campo de polo: valores de humedad gravimétrica en el perfil del suelo.

Table 10. Polo field of: gravimetric humidity values of the soil profile.

Intervalo de profundidad (mm)	Humedad (% p/p)	Humedad (% p/p)	Humedad (% p/p)
	a) Testigo	b) Recién terminado	c) Campo en uso
0 - 150	22 a	20 a	21,3 a
150 - 300	22 a	22 a	23 a
300 - 450	21,5 a	22,3 a	23,5 a
450 - 600	20 a	21,2 a	23,6 a

Letras distintas en sentido horizontal denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters horizontally denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Esto es muy importante ya que, los resultados obtenidos, luego del tráfico, en el parámetro resistencia a la penetración, se deberían al impacto del mismo y no al factor humedad del suelo.

Los resultados de las tablas 11, 12 y 13 (pág. 89), coinciden, en parte, con las conclusiones alcanzadas por Botta (2000), en cuanto a que, en forma independiente del peso en el eje, el pasaje de los tractores induce compactación subsuperficial.

Tabla 11. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos para los tres tratamientos en el perfil de 0 a 150 mm.

Table 11. Mean values of penetrometer resistance (kPa) measured for the three treatments in the 0 to 150 mm soil profile.

Prof. (mm)	0	25	50	75	100	125	150
Testigo SIN USO	466,6 a	872 a	1358 a	1868 a	1931 a	1970 a	1870,3 a
Campo recién terminado	149,1 b	331 b	1037 b	1600 b	1891 a	1906 a	1837 a
Campo en uso	1177 c	2220 c	2695 c	2547 c	2528 c	2518 c	2480 c

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters vertically denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Tabla 12. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos para los tres tratamientos en el perfil de 175 a 325 mm.

Table 12. Mean values of penetrometer resistance (kPa) measured for the three treatments in the 175 to 325 mm soil profile.

Prof. (mm)	175	200	225	250	275	300	325
Testigo SIN USO	1996 a	1743 a	1637 a	1501 a	1496 a	1501 a	1370 a
Campo recién terminado	1891 b	1896 b	1876 b	1847 b	2050 b	2037,9 b	2141 b
Campo en uso	2510 c	2438 c	2395 c	2274 c	2180 c	2003 b	2132 b

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters vertically denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Tabla 13. Valores medios de resistencia a la penetración (kPa) medidos para los tres tratamientos en el perfil de 350 a 450 mm.

Table 13. Mean values of penetrometer resistance (kPa) measured for the three treatments in the 350 to 450 mm soil profile.

Prof. (mm)	350	375	400	425	450
Testigo SIN USO	1203 a	1110 a	1063 a	910 a	921 a
Campo recién terminado	2007 b	2199 b	2295 b	2137 b	1813 b
Campo en uso	1582 c	1542,4 c	1435,5 c	1456,3 c	1344,5 c

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters vertically denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Pese a que el peso en los ejes de los tractores utilizados no supera los 13,1 kN y los 31 kN en el delantero y trasero respectivamente (tabla 5, pág. 87), ninguno de los dos 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, condiciona dicha posibilidad a la utilización de rodados de gran superficie de apoyo.

Las presiones medidas, en el área de contacto rueda-suelo, fueron superiores a las estimadas en el mismo trabajo y podrían también, en parte, ser responsables del problema de compactación subsuperficial. Además, los valores de resistencia a la penetración del testigo (tablas 11 y 12) superan hasta los 175 mm a los del campo recién terminado. Esto se debe a las tareas de laboreo realizadas en el mismo.

La presión en el área de contacto, tanto para el rodado delantero como para el trasero, fue superior también a las indicadas por Sánchez-Girón Renedo (2001), quien recomendó no superar 45 kPa (tabla 5, pág. 87), 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 del tractor, 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 B_1 y B_{2it} al momento de la realización del tránsito, unido a la textura de los mismos (28), arcillosa y arcillo-limosa respectivamente, pudieron haber favorecido que la compactación se produjese ante las sucesivas pasadas, en las labores realizadas, no solamente a nivel superficial, como sugieren Botta *et al.* (2002), sino también en estratos más profundos del perfil.

La reacción del suelo, ante el aumento de las labores y el uso en el campo en uso, determinó que los mayores incrementos en el parámetro resistencia a la penetración se produjeran, respecto del campo recién terminado, en los intervalos de 0 a 275 mm de profundidad (figura 2 y figura 3, page 201). Este resultado, no coincide con lo encontrado por Botta (2000) quien señala la situación inversa.

El tráfico de la maquinaria produjo resultados diversos. Solo hubo diferencias significativas respecto del testigo, hasta diferentes niveles de profundidad.

En el campo recién finalizado estas se presentaron hasta los 75 mm de profundidad (tabla 11, pág. 89) luego de esta y hasta los 150 mm de profundidad no se registró diferencias respecto del testigo.

Es probable que esto sucediera debido a la labor superficial de la maquinaria para la finalización del movimiento de suelo al terminar el campo.

Los efectos más notables del paso de la maquinaria y de los animales se produjo en el intervalo de 0 a 50 mm de profundidad (tabla 11, pág. 89 y figura 2, pág. 91) con picos incrementales de 150% a 750% para el campo en uso, respecto del campo recién terminado. Estos efectos disminuyen a medida que aumenta la profundidad, los incrementos medios fueron entre 8 y 20% (figura 3, pág. 91).

En los niveles de mayor profundidad, se produjo una inversión de los valores absolutos de resistencia a la penetración, mayores para el campo recién terminado en el intervalo de 300 a 450 mm de profundidad (tablas 12 y 13, pág. 89). Es posible que, luego de finalizadas las labores, el número de pasadas de los equipos reemplace al factor peso, en la responsabilidad de la compactación subsuperficial del suelo (7, 26).

Por otra parte, es probable, que el suelo del campo recién terminado (traficado muy recientemente) no haya podido recuperarse del impacto recibido por el elevado tráfico de la maquinaria y, debido a la baja resiliencia de las capas subsuperficiales del mismo y al corto tiempo transcurrido entre la finalización del campo y la medición de este parámetro no pudo revertirse la situación de alta compactación (11).

Otra posible explicación sería el hecho de que el trabajo realizado con las maquinarias empleadas para el movimiento de tierra, usualmente no supera los 20 cm iniciales, a efectos de no generar modificaciones texturales en superficie, que se producirían por la incorporación de horizontes subsuperficiales al trabajar a mayor profundidad.

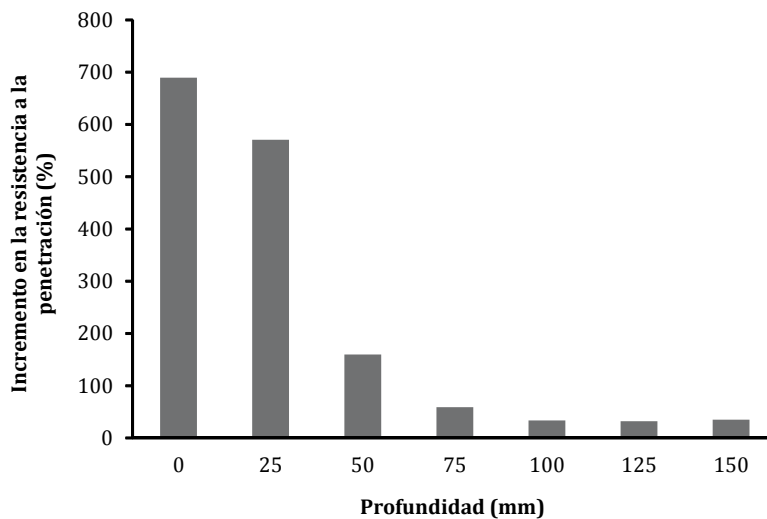


Figura 2. Incremento de la resistencia a la penetración del campo en uso con respecto al campo recién terminado en el intervalo de 0 a 150 mm de profundidad.

Figure 2. Penetration field resistance in the field in use vs. the just ended field in the 0 to 150 mm depth interval.

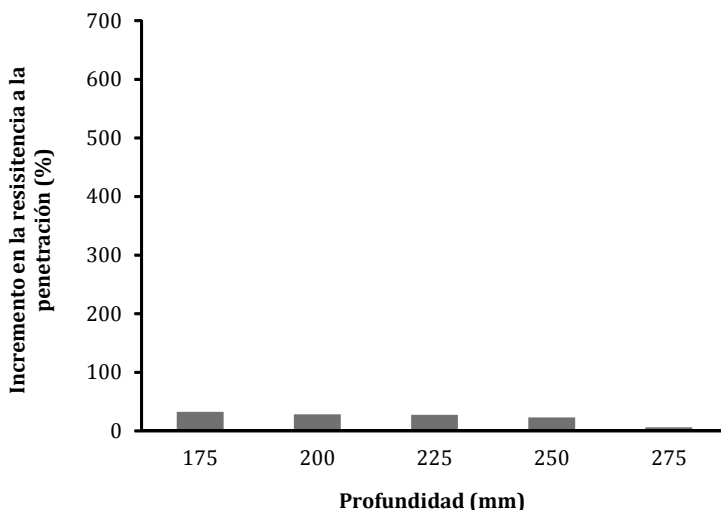


Figura 3. Incremento de la resistencia a la penetración del campo en uso con respecto al campo recién terminado en el intervalo de 175 a 275 mm de profundidad.

Figure 3. Penetration field resistance increases in the field in use vs. the just ended field in the 175 to 275 mm depth interval.

De tal forma la capa subsuperficial se transformaría en la base de apoyo de los equipos de trabajo y por tanto ser susceptible del efecto de compactación con mayor resistencia a la penetración, coincidente con los resultados expuestos.

Densidad aparente

La densidad aparente en el testigo siguió la misma tendencia que el parámetro RP, se tuvo registros elevados en la totalidad del perfil y superó, a nivel superficial, los valores del campo recién terminado. A nivel superficial, 0 - 150 mm (tabla 14), se alcanzó el valor de 1,45 Mg/m³, indicado como restrictivo para alcanzar una emergencia más rápida y completa en semillas de gramíneas (22).

En el nivel de 150 a 300 y 300 a 450 mm de profundidad (tabla 14), la densidad aparente, tanto en el campo recién terminado como en el campo en uso, superó al nivel crítico citado y el similar de 1,46 Mg/m³ mencionado por Vehimeyer y Hendrickson (1948) para el desarrollo radical de gramíneas y por lo informado por Daddow y Warrington (1984), para el umbral de crecimiento radical.

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 durante la realización del campo de juego, afectan en el largo plazo a la totalidad de la superficie del suelo de los espacios deportivos estudiados.

En cuanto al parámetro densidad aparente, tanto el campo recién terminado como el campo en uso no se diferenciaron significativamente entre sí, pero sí se diferenciaron significativamente del testigo sin laboreo. Pareciera ser que este parámetro se comportó metodológicamente con menor sensibilidad para detectar las alteraciones producidas en el terreno por el tránsito de la maquinaria para movimiento del suelo, 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 menores en el caso del penetrómetro usado (25 mm), que en el de la sonda gamma-métrica para medir la densidad aparente (50 mm).

Tabla 14. Valores medios de densidad aparente (Mg/m³) medidos para los tres tratamientos en el rango de 0 a 450 mm de profundidad.

Table 14. Mean values of bulk density (Mg/m³) measured for the three treatments in the 0 to 450 mm depth range.

Rango de Profundidad (mm)	0 - 150	150 - 300	300 - 450
Testigo SIN USO	1,45 a	1,35 a	1,43 a
Campo recién terminado	1,4 a	1,51 b	1,72 b
Campo en uso	1,53 b	1,72 c	1,82 b

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters vertically denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Porosidad total

En la tabla 15 se muestran valores de porosidad total del suelo, con diferencias significativas ($P < 0,05$), para los campos en uso y recién terminado, en todo el perfil del suelo bajo estudio, respecto del testigo sin laboreo. Los valores de este parámetro no fueron inferiores al 30%, valor citado por muchos autores, como perjudicial para el crecimiento de raíces de gramíneas y leguminosas.

Los valores de porosidad total, a nivel superficial, en el campo recién terminado, son mayores a los del suelo testigo. Esto es correcto, ya que una mayor desagregación de suelo se presenta en el campo recién terminado debido al reciente laboreo de la maquinaria para movimiento del suelo. Si se observa la misma tabla se puede corroborar que, en el campo en uso, la porosidad total es la menor de los tratamientos, esto se debe al pisoteo de los animales y a las labores de mantenimiento que requiere.

Como se observa en la tabla 15 el nivel superficial (0 - 150 mm) fue afectado por el movimiento y uso. Esto es importante, debido a la influencia de la porosidad total a nivel superficial del suelo, sobre el crecimiento de la raíz del vegetal. Coincide con Botta *et al.* (2006b), está basado en el hecho de que, a nivel superficial es donde

el crecimiento de la raíz y la captación de nutrientes para el crecimiento son más importantes. Estos resultados corroboran que, al pasar los tractores con distintas presiones de inflado, pueden provocar severos daños al suelo por la compactación superficial del mismo. A nivel subsuperficial, por debajo de los 150 mm, los cambios medios en la porosidad total del suelo son significativamente menores, porcentualmente, que a nivel superficial. Llama la atención que los efectos de la compactación, producidos por el tránsito del tractor, llegó a horizontes subsuperficiales, aún con cargas en el eje, inferiores a las indicadas por Håkansson y Danfors (1981), es decir, la compactación en este nivel de profundidad, se debería más al número de pasadas de los equipos que al peso de los mismos.

Materia orgánica

Con el objeto de evaluar los efectos de la sistematización en el tenor de materia orgánica del suelo, se tomaron muestras en testigo, campo "recién terminado" y en el campo "en uso". Los valores se detallan en la tabla 16 (pág. 94).

Para cada campo ("recién terminado" y "en uso") se observan datos obtenidos para ambos bordes y el centro del campo, además de los correspondientes al testigo.

Tabla 15. Valores medios de porosidad total del suelo (%) medidos para los tres tratamientos en el rango de 0 - 450 mm.

Table 15. Mean values of total soil porosity (%) measured for the three treatments in the 0 to 450 mm depth range.

Rango de Profundidad (mm)	0 - 150	150 - 300	300 - 450
Testigo SIN USO	45,2 a	50,9 a	46 a
Campo recién terminado	47,1 b	43 b	35 b
Campo en uso	42,2 b	35,4 b	31,3 b

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters vertically denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Tabla 16. Contenido de materia orgánica (%) para el campo recién terminado, el campo en uso y el testigo.**Table 16.** Organic matter content (%) for the just ended field, field in use and control test.

	Campo recién terminado	Campo en uso	Testigo
	Valores (%)	Valores (%)	Valor base
Borde	3,37 a	3,28 a	4,51 b
Centro	4,04 a	4,47 a	4,51 a
Borde	2,97 a	3,9 b	4,51 b
Media	3,46 a	3,88 ab	4,51 b

Letras distintas en sentido horizontal denotan diferencias significativas ($P < 0,05$ Tuckey).

Different letters horizontally denote significant differences ($P < 0.05$ Tuckey).

Si se comparan los valores del campo recién terminado y campo en uso con el testigo, se observa una disminución del contenido de materia orgánica. No obstante, esta disminución no es constante ya que en algunos casos no se presentan diferencias significativas.

En efecto, al realizar la distinción entre borde y centro del campo en su comparación con el testigo, no se aprecian tales diferencias entre las muestras tomadas en el centro respecto de las del control, mientras que sí ocurre en los bordes, a excepción de uno de ellos.

Esto podría ser explicado por el modo de operación del movimiento de tierra, que acorde con el proyecto, retira suelo de los bordes y los lleva hacia el centro del campo, reduciendo el espesor del horizonte superficial en los bordes.

La disminución del contenido de materia orgánica coincide con lo citado por Unger *et al.* (1990), quien observa efectos en la textura, contenido de materia orgánica y estabilidad de los agregados e indirectamente también con lo mencionado por Preve (1990) en cuanto a cambios en la fertilidad luego de la sistematización, con Juma (1993) en relación con los efectos sobre la estructura y actividad biológica y con Brye *et al.* (2003) quien también cita variación en la actividad biológica.

No obstante, las disminuciones observadas, estas son mínimas si se las compara con los cambios citados en apartados anteriores, tanto en la resistencia a la penetración como en la densidad aparente, que resultan con claridad, de mayor significación.

Por último, en promedio, siempre en comparación con el testigo, presenta más diferencia el campo recién terminado que el campo en uso.

Índice de esponjamiento/compactación

En forma estricta, el índice o factor de esponjamiento (Swelling Factor) (Geotechnical Design Manual USA, 2005), hace alusión al fenómeno de expansión que se produce en los minerales componentes del suelo al ser removido. Luego, al ser incorporado, se produce un acomodamiento de partículas y compactación (32, 38).

Cuando se efectúa el proyecto de sistematización o de movimiento de suelo se prevé un valor mayor en el volumen de desmonte o de corte respecto del de relleno o terraplén (34). El valor de compensación elegido debería comprender ambos índices, el de expansión o esponjamiento y el de contracción o compactación que luego le sucede.

De los datos de densidad aparente obtenidos (tabla 14, pág. 92), se observa que tanto en la situación de campo recién terminado, como en la de campo en uso, los valores superan con el testigo. Si se toma a este último como control, se muestra en la tabla 17 el incremento en densidad en relación con el testigo para los intervalos definidos. A excepción del valor obtenido en el campo recién terminado para el intervalo 0-150 mm por las razones que fueran expuestas (laboreo reciente del suelo), los restantes muestran aumentos que alcanzan casi el 30%. Esto acuerda con lo citado por Brye *et al.* (2003) en relación a que el movimiento de tierra produce incrementos en la densidad aparente. Chopra (1999) efectuó la estimación del factor de esponjamiento/compactación en suelos de Florida mediante análisis de penetrometría y densidad aparente, encontrando valores de 25% para el factor de esponjamiento y 15 a 20% para el factor de compactación.

La densidad aparente es afectada por el peso del suelo, incluida la porosidad y el volumen que ocupa.

Teniendo en cuenta por un lado los valores de porosidad obtenidos y por otro los de densidad aparente, es dable considerar que los cambios en esta última variable son debidos al cambio en volumen generado por la modificación (pérdida) de

estructura y disminución de la porosidad, que a su vez son también afectados como consecuencia de la compactación (13).

Entonces, el cambio en la densidad aparente del terreno sobre el cual se efectuó el movimiento de tierra en relación con el sitio control o testigo se considera aquí como valor del factor de esponjamiento/compactación, en acuerdo por lo citado en Geotechnical Design Manual USA (2005).

De tal forma, tanto el uso como la intensidad de tráfico, en la medida que son causa del proceso de compactación (7, 9, 26), son dos variables que deben ser tomadas en consideración como partícipes del índice de esponjamiento/compactación.

Consideraciones finales

En el sitio de ensayo se superó, a nivel superficial, el valor de 800 kPa, mencionado por Collis-George y Yoganathan (1985), como posible, en relación con afectar la emergencia de semillas.

A partir de los 250 mm de profundidad, se superó el valor de 1500 kPa, generalmente indicado como capaz de producir una disminución en la tasa de crecimiento radical (14).

Tabla 17. Incrementos medios de densidad aparente (%) respecto del testigo en el rango de 0 a 450 mm de profundidad.

Table 17. Mean increments of bulk density (%) in relation to the control test at the 0 to 450 mm depth range.

Rango de profundidad (mm)	0 - 150	150 - 300	300 - 450
Campo recién terminado	-3,45	11,85	20,28
Campo en uso	5,52	27,40	27,30

En acuerdo con Nasr y Seles (1995), las condiciones físicas del suelo, generadas como consecuencia del tráfico y movimiento del suelo, podrían ocasionar, una emergencia más lenta y menos completa de las semillas de gramíneas comúnmente utilizadas en estos sitios y con los fines establecidos, del mismo modo que una limitación al crecimiento en los casos en que se realice implantación de estolones.

Según los resultados obtenidos, el número de pasadas tiene una relación muy marcada con la profundidad a la cual se manifiestan los efectos del tránsito reiterado de la maquinaria (7, 9, 11, 26). Debido al bajo peso de los equipos utilizados en los sitios de ensayo, el causante de la compactación subsuperficial del suelo pasa a ser el número de pasadas (tráfico) y no el peso de los mismos. Estos resultados proporcionan evidencia para refutar la hipótesis 3.

La tendencia que siguieron los valores de resistencia a la penetración, la densidad aparente y la porosidad total del suelo, luego del movimiento del suelo (tráfico) y su uso con fines deportivos (pisoteo), fueron bastante similares. Al mismo tiempo los valores de dichos parámetros, generados por los tratamientos de movimiento de suelos, estuvieron siempre por encima de los recomendados para realizar un manejo adecuado del suelo en el tiempo. Esto significa que existe evidencia válida para verificar la hipótesis 2.

En relación con el contenido de materia orgánica, se produjo una disminución del contenido, tanto en el campo recién terminado como en el campo en uso. La disminución en contenido de materia orgánica es menor a los cambios que se producen tanto en densidad aparente como en porosidad. Esto significa que existe evidencia válida para verificar la hipótesis 1.

En lo concerniente al factor de esponjamiento/compactación, para los dos sitios de ensayo se obtienen valores que alcanzan y superan el 25%. Esto es importante, puesto que son valores obtenidos para condiciones reales de trabajo de campo y en suelos de Buenos Aires. Estos superan los expresados por Belçaguy y Levin (1965) García Piecade (1973), Peña McCasquill (1995) y se acercan a los encontrados experimentalmente por Rodríguez Plaza (2000).

Asimismo, si bien el estado mecánico del suelo se constituye en una de las variables de relevancia en la incidencia en este factor, el mismo puede ser modificado por variables tales como la intensidad de tráfico y peso de la maquinaria por lo que existe evidencia válida para verificar la hipótesis 4.

CONCLUSIONES

Dentro de los límites del presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

El contenido de materia orgánica en suelos sistematizados disminuye respecto del suelo original. La modificación producida en este parámetro es menor a la ocurrida en los parámetros físicos, tales como la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la porosidad.

Para suelos similares en cuanto a características y condición mecánica, sobre el índice o factor de esponjamiento/compactación tienen influencia tanto la intensidad de tránsito de las maquinarias como el peso de las mismas.

Para los tipos de suelo analizados y en las condiciones del ensayo se alcanzaron índices de esponjamiento/compactación mayores al 25%.

Los valores encontrados no responden a ensayos de laboratorio sino a una situación de campo real, sobre la base de datos obtenidos

sobre sistematizaciones de uso generalizado en la conformación de campos de polo.

El pasaje de la maquinaria produce compactación y esta alcanza los niveles subsuperficiales. La compactación a nivel superficial se da en mayor medida en el campo en uso, atribuyéndose al uso de las maquinarias de mantenimiento y uso para el juego (caballos).

La compactación producida por el uso de los campos de polo construidos,

disminuye a medida que aumenta la profundidad, producida, en mayor medida, más al pasaje de la maquinaria que al peso de la misma.

El parámetro densidad aparente resultó menos sensible para medir la compactación del suelo que la resistencia a la penetración.

Tanto el parámetro densidad aparente como la porosidad se vieron más afectados subsuperficialmente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alakuku, 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.
2. Bachmann, J.; Contreras, K.; Hartge, K. H.; Mac Donald, R. 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research*. Vol. 87: 112-118.
3. Balbuena, R.; Aragon, A.; Mac Donagh, P.; Claverie, J.; Terminiello, A. 1995. Efectos de tres sistemas de preparación del suelo en la resistencia a la penetración y la densidad de un suelo. XXIV Congreso Brasileiro de Ingeniería Agrícola. Viçosa. Brasil.
4. Belçaguy, P. J. M.; Levin, E. 1965. El acondicionamiento de terrenos con fines de riego, desagüe y conservación. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Buenos Aires. 83 p.
5. 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 p.
6. Botta, G.; Jorajuria, D.; Draghi, L. 1998. Predicción del esfuerzo de rodadura en un tractor agrícola. En: Ingeniería Agrícola y Mecanización en el Marco Latinoamericano. Editores Responsables: Balbuena, Benez, Jorajuría. (Ex aequo) Editorial de la UNLP, La Plata, Argentina. 612 p.
7. 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*. Elsevier. 39/1. 47-54.
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 Research*. 78/1. Elsevier. 53-58.
9. Botta, G.; Jorajuria, D.; Rosatto, H.; Ferrero, C. 2006a. Light tractor traffic frequency on soil in the rolling Pampa region of Argentina. *Soil and tillage Research* 2006b. Ed. Elsevier. 86. 9-14.
10. Botta, G.; Balbuena, R.; Ressa, M.; Jorajuria, D.; Rosatto, H.; Ferrero, C. 2006. Deep tillage and traffic effect on subsoil compaction and sunflower yields. *Soil and tillage Research*. 2006. Ed. Elsevier. 91: 165-173.
11. Botta, G.; Pozzolo, O.; Bomben, M.; Rosatto, H.; Rivero, D.; Ressa, 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*. Elsevier. 96: 145-154.
12. Brye, K.; Slaton, N. A.; Savin, M. C.; Norman, R. J.; Miller, D. M. 2003. Short-term effects of land leveling on soil physical properties and microbial biomass. *Soil Science society of American Journal*. Setember 2003. 67(5): 1405-1417.
13. Brye, K.; Slaton, N. A.; Norman, R. J. 2005. Penetration resistance as affected by shallow cut land leveling and cropping. *Soil and Tillage Research*, Marzo 2005. 81(1): 1-13.

14. Carter, M. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening tillage studies. *Canadian Journal of Soil Science* 1988. 68(4): 657-668.
15. Chopra, M. B. 1999. Investigation of shrink and swell factors for soils used in Florida Department of Transportation construction. Summary of final report WPI 0510796 . University of Central Florida.
16. Cisneros, J. M.; Cholaky, C.; Bricchi, E.; Giayetto, O.; Cantero, J. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. *Revista de la UNRC*. 17(1): 13-22.
17. Collis-George, N.; Yoganathan, P. 1985. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat (*Triticum aestivum* L.) II. High shear strength conditions. *Aust. J. Soil Research* 1985. 23: 589-601.
18. 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 p.
19. 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. 110-115.
20. Dwyer, M.; Febo, G. 1987. *Agricultural Tyre Handbook*. Institute of Agricultural Engineering. West Road, Silsoe, Bedford. UK. 32 p.
21. García, G. J. e G.C.R. Piedade. *Topografía aplicada as Ciencias Agrarias*.1989. Nobel. Brasil. 256 p.
22. Hadas, A.; Stibbe, E. Soil crusting and emergence of wheat seedlings. *Agron. Journal*. 1977. 69: 547-550.
23. Håkansson, I.; Danfors, B. 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. 7th. Int. Conf. of ISTVS. ISTVS Hanover, NH, USA. 10 p.
24. Hidalgo, R.; Botta, G. F.; Tolón Becerra, A.; Pozzolo, O. R.; Domínguez, J. F.; Serafini, E. 2014. Rastrojo de arroz (*Oryza sativa* L.) en sistemas de siembra directa: alternativas de manejo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 46(2): 163-175.
25. Jorajuría, D.; Draghi, L.; Aragon, A. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil & Tillage Research*. 41: 1-12.
26. Jorajuría D. 2001. Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular agrícola. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España. 135 p.
27. Juma, N. G. 1993. Interrelationships between soil structure, textura, soil biota, soil organic matter and crop production. *Geoderma*. Vol. 57: 3-30.
28. Meek, P. 1996. Effects of skidder traffic on two types of forest soils. Technical report Forest Eng. Res. Inst. of Canada. N° TR117. 12 p.
29. 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.
30. Peng, X. H.; Horn, R.; Zhang, B.; Zhao, Q. G. 2004. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil and Tillage Research*. 76(2): 125-137.
31. Peña McCaskill, L. 1995. *Apuntes de Conservación de Suelos*. Universidad de Concepción. Chile. 167 p.
32. Pratt, D. J. 2004. *Fundamentals of Construction Estimating*. 2nd. Edition. Thomson Delmar Learning. USA.
33. Preve, R. E.; Martens, D. C. 1990. Potential effect of land leveling on soil fertility in a Brazilian rice soil. *Plant and Soil*. 121(1): 148-150.
34. Rodríguez Plaza, L. 2000. Modelo matemático de nivelación de parcelas agrícolas en zonas regadías. *UNC*. 109 p.

35. Rosatto, H. G.; Laureda, D. A.; Villalba, G. A.; Botta, G. F.; Rodríguez Plaza, L.; Atencio, A.; Caso, C.; Gamboa, P.; Meyer, M. 2009. Soil land leveling: project execution efficiency in complex soil. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 41(1): 2009. 85-92.
36. Sánchez-Girón Renedo, V.; Andreu, E.; Herranz, J. L. 2001. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents. *Soil and Tillage Research.* 62: 85-99.
37. Seino, M. 1999. Studies on land consolidation of large sized paddy fields. 2. Work and management on land leveling of large sized paddy fields. *Bulletin of the Yamagata Prefectural Agricultural Experiment Station. Japan.* 67-84.
38. Servicio de Conservación de Suelos. USDA. Nivelación de Terrenos. Diana. México. 1972.
39. Soil Cut Design. *Geotechnical Design Manual M 46-03.* USA. September 2005.
40. Swan, J.; Moncrief, J.; Voorhees, W. 1987. Soil compaction. Causes, effects, and control. AG-BU-3115. Minnesota Extension Service. University of Minnesota. USA.
41. Threadgill, E. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE.* 25: 859-863 and 867.
42. Unger, P. W.; Fulton, L. J.; Jones, O. R. 1990. Land-leveling effects on soil texture, organic matter content, and aggregate stability. *Journal of Soil & Water Conservation.* 45(3): 412-415.
43. 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: Märlander, B.; Tijink, F. J.; Hoffman, C.; Beckers, R. 1: 55-66.
44. Veihmeyer, J.; Hendrickson, A. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science.* 65: 487-493.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo bajo los proyectos: Modelo de distribución territorial y sectorial de valores objetivos, para la evaluación de los progresos en la sostenibilidad mediante indicadores. Referencia: CTM2013-41750-P. Financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. Proyecto T088, Departamento de Tecnología Universidad Nacional de Luján y Proyecto UBACyT, programación Científica 2014-2017. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires, Referencia: 2012013010067BA.