

EFECTO DEL PASTOREO SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL SUELO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BAJO SIEMBRA DIRECTA CONTINUA

HUGO R. KRÜGER; SANTIAGO VENANZI & EDUARDO DE SÁ PEREIRA

INTA, EEA Bordenave, CC44 (8187) Bordenave (Bs. As.) hkrüger@correo.inta.gov.ar

Recibido: 05/06/08

Aceptado: 24/11/08

RESUMEN

Los objetivos del estudio fueron: a) caracterizar la variación de la resistencia mecánica a la penetración (RST) de la capa de suelo de 0 a 20 cm en dos rotaciones con y sin pastoreo directo y b) establecer su relación con el contenido de agua del suelo (W). El estudio se realizó sobre un Hapludol típico del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, sobre secuencias basadas en girasol y trigo. Se estudiaron dos tratamientos: a) Agrícola, que no incluyó pastoreo y b) Mixta que incorporó un cultivo de avena pastoreado por novillos de 350 a 400 kg (25 cabezas/ha) previo al girasol. Se determinaron RST y W en diez fechas de muestreo. Luego del pastoreo de avena, la RST de Mixta fue mayor que la de Agrícola en toda la capa, con picos en 2,5-7,5 cm. Ajustada a un W de 190 g kg⁻¹, la RST de Agrícola mostró una tendencia lineal ligeramente creciente en el tiempo; la RST Mixta ajustó a un modelo cuadrático con tendencia a estabilizarse en valores cercanos a 2,5 MPa. Mixta presentó además un segundo nivel de variación relacionado con las fechas de muestreo: la RST luego del pastoreo de avena fue mayor que al final del ciclo avena-girasol-trigo. La disminución se atribuyó a una recuperación de la bioporosidad por efecto de las raíces de los cultivos. Las RST observadas fueron cercanas o mayores a las críticas para la penetración de las raíces en el 20 y 50% de las fechas de muestreo para Agrícola y Mixta, respectivamente.

Palabras clave. Manejo de suelos, compactación, rotación, propiedades físicas del suelo, pastoreo, siembra directa, resistencia a la penetración, novillos.

IMPACT OF CATTLE GRAZING ON SOIL MECHANICAL RESISTANCE IN PRODUCTION SYSTEMS UNDER CONTINUOUS NO-TILL

ABSTRACT

The objectives of this study, were: a) to characterize the soil mechanical penetration resistance (RST) variation in the 0 to 20 -cm depth of two rotation treatments with and without cattle grazing and b) to determine the RST relationship with soil water content (W). The experiment took place on a Typic Haplustoll in SW Buenos Aires province, on sunflower-wheat based rotations. Treatments included: a) 100 % cash-crop rotation with no cattle grazing and b) Mixed rotation, including an oat forage crop with direct grazing by 350 to 400 kg steer at a 25 head/ha stocking rate between wheat and sunflower crops. RST and W were determined on ten opportunities near planting dates. After oat grazing, RST was higher in the Mixed rotation compared to the crop rotation in the 0 to 20 cm soil layer, with greater differences in the 2.5-7.5 cm layer. Corrected to a W of 190 g kg⁻¹, the RST in the crop rotation showed an increasing linear trend over time. RST for the mixed rotation fitted a quadratic model which tended to stabilize at 2.5 MPa. In addition, the mixed rotation showed a second variation pattern related to sample dates: RST after grazed oats was higher than at the end of the oat-sunflower-wheat cycle. This decrease was attributed to a recovery of bioporosity due to the crop roots effect on the soil. Observed RST values were close or higher than those considered critical for root penetration in 20 and 50% of sampling dates for the crop and mixed rotations, respectively.

Key words. Soil management, compaction, rotation, soil physical properties, cattle grazing, no-tillage, mechanical resistance.

INTRODUCCIÓN

En sistemas de producción mixtos, la compactación superficial por pastoreo constituye un riesgo potencial (Moran *et al.*, 2000), que genera dudas acerca de la sustentabilidad de la siembra directa continua. Esto hace

necesario monitorear periódicamente su evolución ya que la intensidad del proceso varía en función de las condiciones de ambiente y manejo.

La compactación puede estudiarse indirectamente a través de los cambios en uno o más parámetros del suelo.

La resistencia mecánica (RST) resulta altamente sensible a este efecto (Hamza & Anderson, 2005), y provee un medio rápido, simple y económico para evaluarlo (Al-Adawi & Reeder, 1996). Dado que la RST correlaciona negativamente con el contenido de agua del suelo (W), se ha sugerido que las mediciones se realicen con el suelo cercano a capacidad de campo, o que se recurra a modelos de regresión que relacionan ambas variables. Estos modelos resultan suelo-específicos y no siempre ajustan satisfactoriamente (Busscher *et al.*, 1997; Quiroga *et al.*, 1999). Los objetivos de trabajo fueron: a) caracterizar la variación de la RST en la capa superficial de dos secuencias de cultivos bajo siembra directa continua, con y sin pastoreo directo, y b) establecer su relación con el contenido hídrico del suelo. Las hipótesis de trabajo consideraron: a) que la SD bajo pastoreo desarrolla compactación en la superficie del suelo, pero que esta no constituye una limitación al crecimiento de los cultivos en el mediano-largo plazo y b) que se podrá monitorear la evolución en el tiempo de los valores de RST, si es posible desarrollar un modelo específico que permita su corrección a un W de referencia.

MÉTODOS

Se utilizaron datos de una experiencia conjunta entre productores (Grupo CREA Cnel. Suárez) y el INTA, en un establecimiento del partido de Saavedra (provincia de Bs. As.). En este sitio, considerado como un ambiente común a la mayoría de los establecimientos del Grupo, se estudiaron dos tratamientos bajo siembra directa continua desde 1999: a) Agrícola, secuencia de cultivos de cosecha sin intervención de animales y b) Mixta, combinación de cultivos de cosecha y cultivos forrajeros bajo pastoreo directo por novillos de 350-400 kg, con una carga media de 25 cabezas ha^{-1} por período de pastoreo. Los tratamientos representan alternativas de manejo comunes tanto en el Grupo como en parte de la región circundante. Datos del suelo y las secuencias de cultivos se muestran en la Tabla 1.

En fechas cercanas a la siembra de los cultivos: 11/2000, 6/2001, 3 y 11/2002, 6/2003, 3 y 11/2004, 3 y 11/2006, y 6/2007, se determinaron RST y W sobre un área de muestreo fija de aproximadamente 0,5 ha que incluyó ambos tratamientos apareados, y en la que se verificó la homogeneidad de suelos y manejo previo. En cada tratamiento la RST se obtuvo por muestreo sistemático en una grilla compuesta por tres filas de cinco puntos cada una (20 x 15 m). En cada punto se registró el máximo valor en las capas 0-2,5; 2,5-5; 5-7,5; 7,5-10; 10-15 y 15-20 cm. Se utilizó un penetrómetro de anillo Soiltest CN-970 (Lake Bluff, Illinois), con un cono de 1,3 cm^2 de área basal. Se eliminaron todos los puntos de penetrometría en los que tres o más profundidades se alejaron más de un desvío estándar respecto del valor central (media aritmética del tratamiento en cada capa y fecha). Este proceso, derivado del concepto de "media ajustada" (Ott, 1993),

afectó en casos extremos un 25% de los puntos, pero redujo la variabilidad y mejoró la consistencia de los datos. Para los valores de W se tomaron las capas superficiales (0-10 y 10-30 cm) de un muestreo simultáneo destinado a establecer por gravimetría la dotación hídrica del perfil de suelo, con una replicación (compuesta por tres submuestras), localizada en cada una de las filas de la grilla de penetrometría. La relación entre RST y W se modeló por regresión simple sobre el tratamiento Agrícola, para disminuir el término de error debido al efecto de pisoteo por los animales en Mixta. El ajuste de la RST al W de referencia (RST_w), se realizó según la Ec.1, donde RST_{OBS} es la resistencia mecánica al contenido de agua observado, W_{OBS} es el contenido de agua observado, W_{REF} es el contenido de agua de referencia, y $PEND$ es la pendiente de la recta de regresión con su correspondiente signo. Se utilizó un W_{REF} de 190 g kg^{-1} (2/3 del rango de agua útil del suelo), que corresponde aproximadamente al valor modal de las determinaciones. En ajustes similares Cerana *et al.* (2004), utilizaron el valor modal de W para minimizar los errores de corrección.

$$RST_w = RST_{OBS} - [(W_{REF} - W_{OBS}) \times PEND] \quad (Ec.1)$$

El diseño estadístico consideró las mediciones como repetidas en el tiempo y utilizó un modelo de covarianza no estructurada para evitar la correlación de observaciones entre niveles de los factores secundarios (Littell *et al.*, 1996). Los tratamientos se asignaron al factor entre-sujetos, y el tiempo (fechas de muestreo = N° mes desde el inicio de la experiencia) al factor intra-sujetos. Por la alta significancia de las interacciones triples, no se incluyó el factor profundidad (capa de suelo), desdoblándose el análisis en capas individuales. La separación de medias se realizó mediante valores de probabilidad del test "t". Se utilizó el programa Statistical Analysis Systems (SAS, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación RST vs. W

Aunque se estudió la relación W-RST para todas las capas de suelo los modelos obtenidos no fueron satisfactorios, principalmente por no utilizarse capas equivalentes en ambas variables. El modelo finalmente adoptado para ambos tratamientos relacionó la RST media en la capa 2,5-20 cm, con el W promedio de las capas 0-10 y 10-30 cm (Fig. 1). La variación de W explicó el 83% de la variabilidad en los valores de RST. Aunque esta relación suele representarse como una función exponencial decreciente, para el intervalo hídrico considerado el mejor ajuste correspondió a una función lineal. Otros estudios sobre suelos comparables obtuvieron relaciones lineales con coeficientes R^2 del 71% (Krüger, 1996), y del 70% (Quiroga *et al.*, 1999).

Tabla 1. Características del suelo y secuencias de cultivos.

Table 1. Soil characteristics and crop sequences.

Suelo		
Secuencia de horizontes	A-B ₁ -B ₂ -B ₃ -C	
Profundidad efectiva (cm)	60-150	
Limitante	<i>Horizonte petrocálcico</i>	
Taxonomía	<i>Hapludol típico</i>	
Horizontes	A	B ₁
Espesor (cm)	12	16
Arena (g kg ⁻¹)	457	427
Limo 0,05 μm (g kg ⁻¹)	395	380
Arcilla (g kg ⁻¹)	148	193
Contenido agua en CC (g kg ⁻¹)	250	250
Contenido agua en PMP (g kg ⁻¹)	95	83
COT (g kg ⁻¹)	25,5	14,8
Pe (mg kg ⁻¹)	24,0	6,5
pH (1:2,5)	6,7	6,5
Secuencia de cultivos		
Año	Agrícola	Mixta
1998	Pradera (P)	
1999	Maíz cosecha	Maíz cosecha (P)
2000	Girasol	
2001	Trigo	
2002	Barbecho / Girasol	Avena forraje (P) / Girasol
2003	Trigo	
2004	Barbecho / Girasol	Avena forraje (P) / Girasol
2005	Trigo	
2006	Barbecho / Girasol	Avena forraje (P) / Girasol
2007	Trigo	

CC=capacidad de campo, PMP= punto de marchitez permanente, COT=carbono orgánico total, Pe= fósforo extractable, (P)=Pastoreo de los residuos o del cultivo forrajero según corresponda.

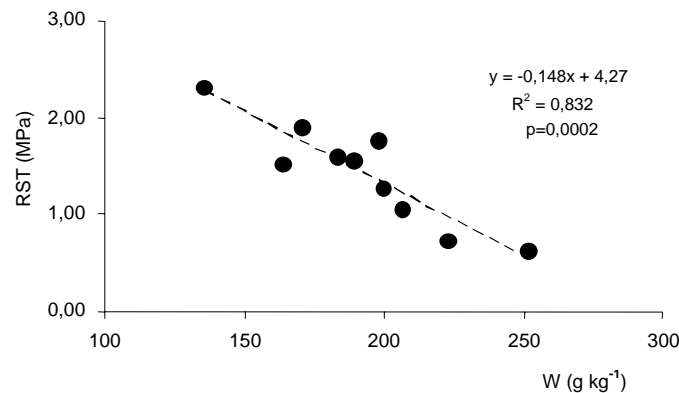


Figura 1. Relación entre el contenido medio de agua del suelo (W), en las capas 0-10 y 10-30 cm, y la resistencia mecánica media (RST) en la capa 2,5-20 cm del tratamiento Agrícola.

Figure 1. Relationship between mean soil water content (W), in 0-10 and 10-30 cm layers, and mean mechanical resistance (RST) in the 2.5-20 cm layer of Agriculture treatment.

Variación de la RST con la profundidad

La Figura 2 muestra los perfiles de RST_{OBS} en los muestreos realizados. Los valores de W fueron similares entre tratamientos y capas pero no entre muestreos. Al no ser posible la corrección por W, solo se compararon los tratamientos en cada capa y fecha. Los perfiles pueden agruparse en cuatro períodos o ciclos: 1) Girasol 2000-Avena 2002: A la siembra del girasol, sin avena previa y con un pastoreo liviano de los residuos de maíz, Mixta mostró mayor RST_{OBS} que Agrícola en la capa 0-2,5 cm. No se observaron diferencias entre tratamientos en el resto del período. Posiblemente un bajo W del suelo durante el pastoreo limitó los efectos sobre la RST; 2) Girasol 2002-Avena 2004: A la siembra de girasol Mixta mostró mayor RST_{OBS} en 0-20 cm, con picos en 2,5-7,5 cm. La mayor RST_{OBS} se mantuvo, a la siembra del trigo, hasta los 15 cm. A la siembra de avena las diferencias entre tratamientos se redujeron en superficie, aunque continuaron siendo significativas en la capa 5-20 cm; 3) Girasol 2004-Avena 2006: a la siembra del girasol, con alto W, Mixta presentó mayor RST_{OBS} en 0-20 cm. A la siembra de avena las diferencias desaparecieron en la mayor parte de las capas. 4) Girasol 2006-Trigo 2007: en el primer caso Mixta mostró mayor RST_{OBS} en la capa 0-10 cm. A la siembra del trigo, a pesar del incremento de los valores absolutos por menor W, las diferencias entre tratamientos se redujeron a la capa 0-7,5 cm.

Los perfiles de RST correspondientes a la siembra de girasol luego de avena pastoreada coincidieron entre campañas, mostrando que los efectos del pisoteo animal afectaron la capa 0-20 cm, con picos en 2,5-7,5 cm. Otros estudios, revisados por Hamza & Anderson (2005), determinaron efectos concentrados en los 5-7,5 cm superficiales, pero evidentes hasta los 20 cm. Los perfiles de RST a la siembra de trigo reflejaron los valores determinados en el girasol previo. A la siembra de avena se observó una disminución general de las diferencias entre tratamientos especialmente en las capas superficiales.

Variación de la RST en el tiempo

La Figura 3 muestra la variación de la RST_w en la capa 2,5-20 cm en el período 2000-2007, ajustada a un W_{REF} de 190 g kg^{-1} . La corrección permitió neutralizar gran parte de la variabilidad debida a W, destacando el efecto de los tratamientos y mejorando el análisis de su evolución en el tiempo. Agrícola mostró una tendencia ligeramente creciente ($RST_w = 0,004 \text{ Tiempo} + 1,29$; $R^2 = 0,314$; $p = 0,09$), con valores entre 1 y 2 MPa y menor variabilidad que Mixta. En Mixta la RST_w varió entre 1,7 y 2,7 MPa, luego

de un brusco incremento a partir del pastoreo de avena. El modelo ajustado ($RST_w = -0,0002 \text{ Tiempo}^2 + 0,03 \text{ Tiempo} + 1,15$; $R^2 = 0,603$; $p = 0,039$) indica que la RST estaría alcanzando una cierta estabilidad, hipótesis que deberá ser confirmada en el futuro.

La interacción tratamiento-fecha resultó significativa ($p < 0,0001$); la primera fecha de muestreo (girasol 2000), fue la única sin diferencias entre tratamientos ($p = 0,358$). La variación de la RST_w no mostró asociación con la fecha de muestreo en el tratamiento Agrícola, pero en Mixta presentó una tendencia cíclica con mayores valores a la siembra de girasol que a la siembra de avena ($p < 0,013$). En las tres fechas de girasol sobre avena la RST_w de Mixta fue cercana a 2,5 MPa, sin diferencias entre fechas ($p > 0,371$). Esto se atribuyó a las condiciones relativamente homogéneas de carga animal y W, aunque también podría indicar un nuevo estado estructural del suelo que limitaría el incremento de la RST por encima de esos valores. La capacidad de las raíces para penetrar el suelo disminuye al aumentar la RST y cesa enteramente a 2,5 MPa (Pabin *et al.*, 1998; Hamza & Anderson, 2005). Durante el período estudiado las RST_{OBS} determinadas superaron a las consideradas críticas para el desarrollo de las raíces en el 20 y el 50% de las fechas de muestreo de los tratamientos Agrícola y Mixta, respectivamente. (Fig. 2). No debe descartarse la ocurrencia de limitaciones al crecimiento radical relacionadas con disminuciones de W entre fechas de muestreo, ni el efecto negativo de valores subcríticos de RST.

La disminución de la RST_w al final de cada ciclo girasol-avena coincide con la reducción de las diferencias entre tratamientos observada en la Figura 2 y sugiere una recuperación de la estructura luego del pastoreo. Entre los factores responsables de esta recuperación, clave para la sustentabilidad del sistema estudiado, el incremento de la porosidad por el sistema radical de los cultivos juega un papel preponderante. La densidad de raíces de girasol y trigo, elevada en la capa 0-20 cm, determina la existencia de una importante cantidad de bioporos. Su formación en suelos compactados ha sido bien documentada (Williams & Weil, 2004; Sasal & Andriulo, 2005), y su liberación al descomponerse las raíces originarias, explicaría la disminución de la RST. Los valores de RST_w a la siembra de avena en las tres fechas disponibles muestran, por otra parte, tendencia creciente. Si en el futuro se estabilizaran cerca del máximo observado de 2,5 MPa, esto indicaría que la actividad biológica no es suficiente para compensar el efecto de compactación por pisoteo, y que deberá recurrirse a otras formas de intervención para asegurar un adecuado crecimiento radical.

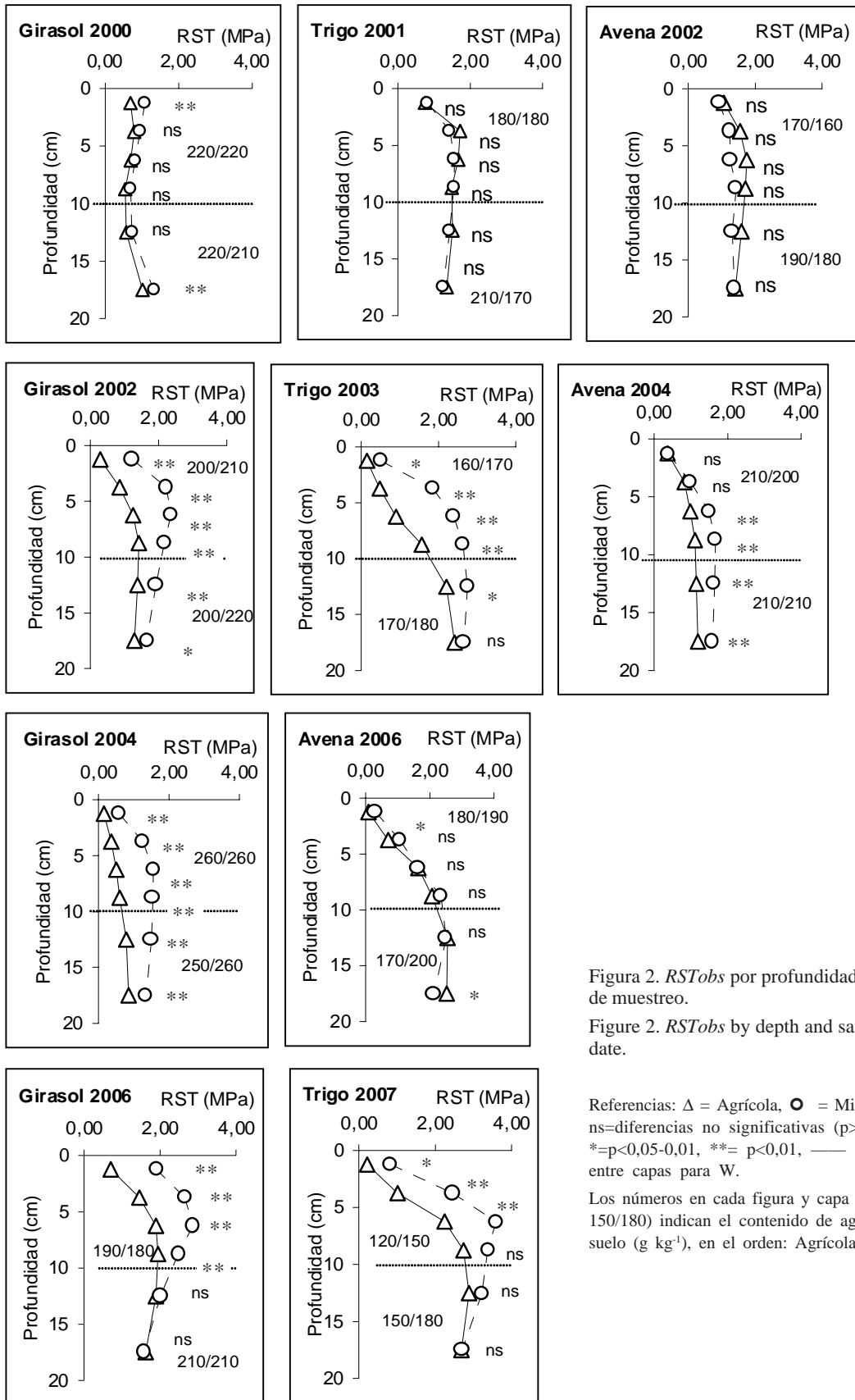


Figura 2. *RSTobs* por profundidad y fecha de muestreo.

Figure 2. *RSTobs* by depth and sample date.

Referencias: Δ = Agrícola, \bullet = Mixta, ns=diferencias no significativas ($p>0,05$), *= $p<0,05-0,01$, **= $p<0,01$, — límite entre capas para W.

Los números en cada figura y capa (e.g. 150/180) indican el contenido de agua del suelo ($g\ kg^{-1}$), en el orden: Agrícola/Mixta.

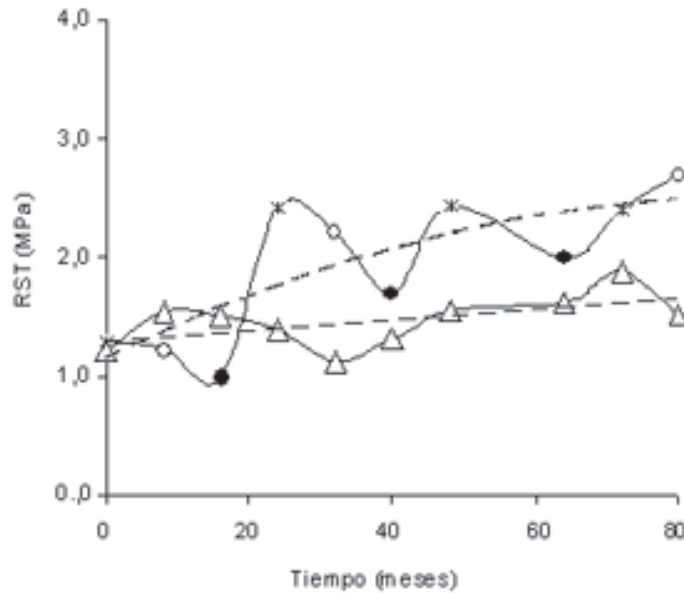


Figura 3. Variación en el tiempo (meses desde el inicio de la experiencia), de la RST_w en la capa 2,5- 20 cm ($W= 190 \text{ g kg}^{-1}$).

Figure 3. RST_w variation over time (months from the beginning of the experiment), in the 2,5-20 cm soil layer ($W= 190 \text{ g kg}^{-1}$).

Referencias: Δ = Agrícola, \times = Mixta siembra de girasol, \bullet =Mixta siembra de trigo, \circ =Mixta siembra de avena, – – líneas de tendencia.

CONCLUSIONES

En las condiciones estudiadas el pisoteo animal aumentó la RST en la capa 0-20 cm, con valores máximos en 2,5-7,5 cm. En el 20 y el 50% de las fechas de muestreo para Agrícola y Mixta, respectivamente, los valores observados superaron a los considerados críticos para el desarrollo de las raíces en alguna zona de la capa 0-20 cm.

Los datos disponibles permitieron ajustar un modelo de regresión lineal entre RST y W para la capa 2,5-20 cm. En esta capa, los valores de RST_w , ajustada a un W de 190 g kg^{-1} , variaron entre 1 y 2 MPa para el tratamiento Agrícola, con tendencia lineal ligeramente creciente. En el tratamiento Mixta la variación general de la RST_w ajustó a un modelo cuadrático que se estabilizó en 2,5 MPa. En este tratamiento se observó un segundo nivel de variación cíclica a lo largo de la secuencia de cultivos con mayor RST_w a la siembra del girasol que a la siembra de avena, indicando una cierta recuperación de la estructura del suelo luego del pastoreo.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Adawi, SS & RC Reeder. 1996. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans. of the ASAE* 39: 1641-1649.
- Busscher, W; P Bauer; C Camp & R Sojka. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Till. Res.* 43: 205-217.
- Cerana, J; O Pozzolo; R Benavidez; S Rivarola; M Wilson & JJ De Battista. 2004. La determinación de la resistencia mecánica a la penetración, para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas productivos. Pp 55-73. En: R Filgueira y F Micucci (ed.) Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Editorial de la Universidad de la Plata. Argentina. 182 pp.
- Hamza, MA & W Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Krüger, H. 1996. Compactación en Haplustoles del Sudoeste Bonaerense bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14: 104-106.
- Littell, R; G Miliken; W Stroup & R Wolfinger. 1996. SAS System for mixed models. SAS Institute Inc. (ed.). Cary, North Carolina, USA. 633 pp.

- Morán, M; JL Costa; P Calviño & J Rodríguez. 2000. Influencia del pastoreo de verdeos sobre algunas propiedades físicas del suelo y del cultivo de soja en un sistema de siembra directa. *Actas XVII Congr. Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata.
- Ott, RL. 1993. An introduction to statistical methods and data analysis (4th Ed.). Duxbury Press (ed.). California, USA. 1183 pp.
- Pabin, J; J Lipiec; S Wlodek; A Biskupsky & A Kaus. 1998. Critical soil bulk density and strength for pea root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.* 43: 206-208.
- Quiroga, A; D Buschiazzo & N Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.* 52: 21-28.
- Sasal MC & A Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (nabo forrajero). *RIA* 34: 131-150.
- SAS Institute Inc. 1999. SAS OnlineDoc®, Version 8. Cary, North Carolina, USA.
- Williams, S & R Weil. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.