

Capítulo 17

Labranzas, pastoreo y compactación en la región Semiárida sur

Tillage, grazing and compaction in the southern Semiarid region

Hugo Krüger¹
kruger.hugo@inta.gob.ar

Franco Daniel Frolla

Josefina Paula Zilio

** Autor de contacto*

¹ INTA, Centro Regional Bs. As. Sur, EEA Bordenave

ÍNDICE CAPÍTULO 17

■ RESUMEN	515
■ ABSTRACT	516
■ INTRODUCCIÓN	517
■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA	517
■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS AGRÍCOLAS	519
Sistemas de labranza	519
Labranza vertical y raíces de trigo	520
Densidad aparente y crecimiento de plantas	520
■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS MIXTOS	522
Sistemas agrícolas y mixtos en siembra directa	522
Pastoreo y sistema de labranza	525
Pastoreo y carga animal	527
■ CONSIDERACIONES GENERALES	528
Efectos sobre el suelo	528
Efectos sobre los cultivos	529
■ BIBLIOGRAFIA	530

■ RESUMEN

El área de influencia de la Estación Experimental INTA Bordenave cubre unos cuatro millones de hectáreas en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Desde 1987 se realizaron allí distintos estudios, relacionados con el efecto de sistemas de labranza y pastoreo sobre propiedades del suelo y comportamiento de los cultivos, cuyos principales resultados se resumen en este capítulo. A pesar de la creciente agriculturización durante la última década, los sistemas productivos han sido tradicionalmente mixtos. Por este motivo los efectos de la agricultura y la ganadería se dan en forma combinada. La siembra directa (SD) produjo perfiles de resistencia mecánica (RM) con valores máximos entre 0,05 y 0,1 m, mientras que labranzas superficiales con rastras de discos (LC) lo hicieron entre 0,1 y 0,15 m. El pisoteo afectó en forma diferente ambos sistemas de labranza. Reforzó la capa superficial compactada de SD, y llegó hasta 0,15-0,20 m en LC. La densidad aparente (DA) mostró menor relación que la RM con la compactación y sus efectos aunque, en estadios tempranos, trigo y avena redujeron la biomasa radical y foliar con el incremento de la misma. Al caracterizar la proporción de poros más variable, la macroporosidad mostró mayor sensibilidad que DA para detectar efectos sobre el suelo. Presentó, además, relación con la RM reforzando la utilidad de esta última como indicador de compactación. Si bien se observó relación entre la mayor parte de los indicadores de compactación y la distribución de raíces del trigo, la implantación del cultivo de soja y el rendimiento de girasol, los efectos sobre los cultivos se dieron en forma aleatoria y en interacción con numerosos factores adicionales (e.g. clima, manejo, cultivo).

Palabras clave


degradación física,
manejo de suelos,
semiárido.

■ ABSTRACT

The area of influence of the INTA Bordenave Experimental Station covers about four million hectares in the southwest of the Buenos Aires province. Since 1987 different studies have been carried out, related to the effect of tillage and grazing systems on soil properties and crop behavior. The main results of them are summarized in this chapter. In spite of the increasing agriculturization during the last decade, the productive systems have been traditionally mixed. For this reason the effects of agriculture and livestock are combined. No-till (SD) produced mechanical strength (RM) profiles with maximum values between 0.05 and 0.1 m, while surface tillage with discs (LC) had maximum between 0.1 and 0.15 m. Trampling affected both tillage systems differently. Reinforced the compacted surface layer of SD, and reached up to 0.15-0.20 m in LC. Bulk density (DA) showed lower relation than RM with compaction and its effects although, in early stages, wheat and oats reduced the radical and foliar biomass with the increase in DA. By characterizing the more variable pore ratio, macroporosity showed greater sensitivity than DA to detect effects on the soil. It also presented a relationship with RM reinforcing the utility of the latter as an indicator of compaction. Although there was a relationship between compaction indicators and the distribution of wheat roots, soybean implantation and sunflower yield, the effects of compaction on crop behavior were random and interacted with many factors (e.g. climate, management, crop).

Keywords | soil physical degradation,
soil management,
semiarid conditions.

■ INTRODUCCIÓN

El área de influencia de la Estación Experimental Bordenave (INTA), en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires **Figura 1** , ocupa algo más de cuatro millones de ha y se ubica en la denominada “pampa austral” (Viglizzo *et al.*, 2002).

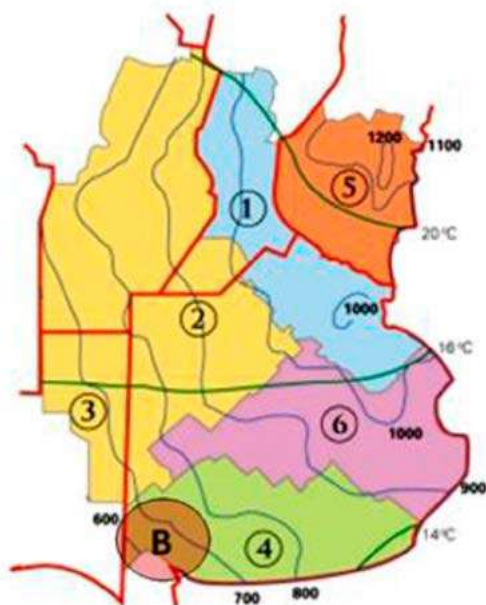


Figura 1: Áreas ecológicas homogéneas en la pradera pampeana (Viglizzo *et al.*, 2002) y ubicación del área de influencia de la Estación Experimental Bordenave en la pampa austral. Referencias: B) Área Bordenave, 1) pampa ondulada, (2) pampa subhúmeda central, (3) pampa semiárida central, (4) pampa austral, (5) pampa mesopotámica, (6) pampa deprimida. En azul: isohietas (mm año⁻¹), en verde: isoterms (°C).

Figure 1: Homogeneous ecological areas in the pampa grassland (Viglizzo *et al.*, 2002) and location of the area of influence of the Experimental Station Bordenave in the southern pampas. References: B) Bordenave area, 1) rolling pampa, (2) central sub-humid pampa, (3) central semi-arid pampa, (4) southern pampa, (5) mesopotamic pampa, (6) depressed pampa. In blue: isohietas (mm year⁻¹), in green: isotherms (°C).

El manejo tradicional de los sistemas de producción mixtos, que caracterizó el desarrollo agropecuario de esta región, se basó en el uso de herramientas de discos y el pastoreo directo con bovinos. Esto, junto con la intensificación de la producción agrícola y el advenimiento de la siembra directa (SD), generó incógnitas respecto de la ocurrencia de procesos de degradación física del suelo. Los escasos antecedentes locales mostraban que los suelos tenían dificultad para estructurarse y propensión al encostramiento (Commegna y Santamaría, 1980). Con el desarrollo de esta línea de investigación en Bordenave se han realizado, entre 1987 y el presente, experiencias en distintos sitios de su área de influencia. En este capítulo se presenta información resumida de las mismas que permite discutir la información local disponible y plantear nuevas necesidades de investigación.

■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

La Pampa Austral cubre el extremo sur de la Región Pampeana y constituye una zona de transición hacia la Región Patagónica. En su extremo oeste, el área de la Estación Experimental Bordenave presenta ambientes de planicies y mesetas en torno al sistema de las Sierras de la Ventana. Hacia el norte se desarrollan planicies suavemente onduladas compuestas por sedimentos loésicos relativa-

mente finos, sobre una potente costra calcárea, con características de un horizonte petrocálcico y conocida regionalmente como “tosca”. Hacia el sur se extiende una amplia meseta con una delgada capa de sedimentos loésicos sobre tosca que, en el este se encuentra recortada por antiguos valles fluviales y hacia el oeste se transforma en una planicie suavemente ondulada con drenaje poco integrado de tipo lacunar. Allí los sedimentos se vuelven arenosos y, en sectores, calcáreos.

El clima regional es continental templado, con una temperatura media anual de 15°C y precipitaciones que se concentran en otoño y primavera. La **Figura 2** muestra el climograma correspondiente a Bordenave. El área de influencia se enmarca entre las isohietas de 800 mm año⁻¹ en su extremo noreste, y 500 mm año⁻¹ en el sudoeste. Esta gradación de precipitaciones permite dividir la región en una zona subhúmeda al norte de las sierras y una semiárida al sur. El período medio libre de heladas comprende los meses de diciembre, enero y febrero, aunque es posible la ocurrencia de estos eventos en cualquier momento del año. Los vientos dominan del noroeste y presentan intensidades importantes en todas las estaciones con un máximo en primavera. Como en otras regiones semiáridas, tanto la precipitación como la temperatura muestran ciclos irregulares, oscilando positiva o negativamente respecto a las medias y determinando períodos secos y fríos que alternan con otros cálidos y húmedos.

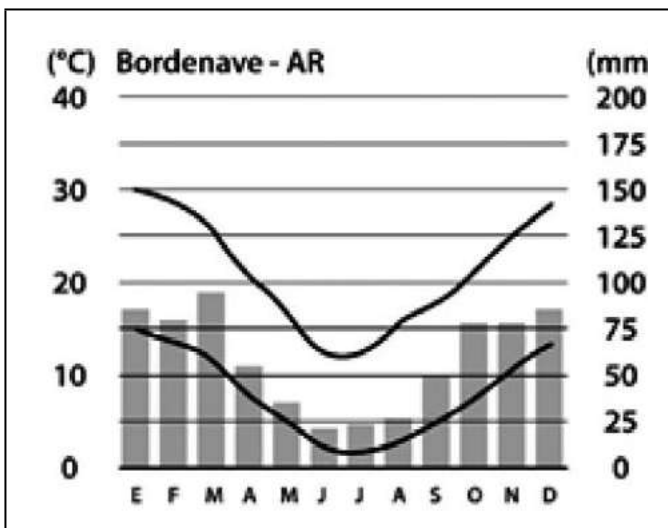


Figura 2: Climograma de la Estación Experimental Bordenave (serie 1960-2011). Referencias: línea superior= temperatura máxima media mensual, línea inferior= temperatura mínima media mensual, barras= precipitación media mensual.

Figure 2: Climogram of the Bordenave Experimental Station (series 1960-2011). References: upper line = average monthly maximum temperature, lower line = average monthly minimum temperature, bars = average monthly precipitation.

Coincidiendo con las variables meteorológicas el clima edáfico se define como údico al norte de las sierras y ústico al sur. En consecuencia en el norte dominan Argiudoles y Hapludoles (típicos), de buena fertilidad, aptitud agrícola-ganadera y escasa profundidad efectiva como limitante principal (SAGyP-INTA, 1989). Al oeste, sobre sedimentos arenosos profundos aparecen Hapludoles (énticos y típicos) y Udipsamentes típicos en menor proporción. Al sur dominan Argiustoles y Haplustoles (típicos y con fases someras) sobre materiales de textura franca, y Haplustoles énticos y Calciustoles típicos sobre materiales arenosos y/o calcáreos. En el sector austral la aptitud de las tierras se vuelve ganadero-agrícola y poco apta para cultivos de verano.

A pesar de la constante agriculturización los sistemas productivos siguen siendo principalmente mixtos, con mayor proporción agrícola en el norte del área y ganadera en el sur. Ambos subsistemas suelen coexistir sobre los mismos suelos por lo que sus efectos sobre las propiedades físicas se dan en forma combinada. Aun así, es posible organizar los distintos estudios en función de la dominancia de uno de estos componentes.

■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

Sistemas de labranza


Entre 1987 y 1993 se estudió el efecto de distintos esquemas de labranza en secuencias girasol/trigo, sobre propiedades físicas del suelo relacionadas con la compactación. Se utilizaron dos suelos de la estación experimental clasificados como Haplustoles énticos, uno de textura franca correspondiente a la serie 17 de Agosto y otro arenoso-franco denominado serie Darregueira **Tabla 1** .

Tabla 1: Características de los suelos estudiados en los experimentos de Bordenave (Gómez *et al.*, 1981).

Tabla 1: Characteristics of soils studied in Bordenave experiments (Gómez *et al.*, 1981).

Taxonomía	Haplustol éntico			
Secuencia de horizontes	A – AC – C – IIC _{ca}			
Serie	Darregueira		17 de agosto	
Horizonte	A	AC	A	AC
Espesor (m)	0,23	0,14	0,20	0,16
COT (g kg ⁻¹)	11	--	20,4	11,6--
Equivalente de humedad (g kg ⁻¹)	108	--	233	--
Arena (g kg ⁻¹)	773	782	454	386
Limo 0,05 µm (g kg ⁻¹)	166	106	347	357
Arcilla (g kg ⁻¹)	61	112	196	170

Los tratamientos incluyeron: Barbecho químico y siembra directa en ambos cultivos (SD), Labranza superficial (rastra, herbicidas y cultivador de campo) hasta 0,12-0,15 m de profundidad (LS), Labranza vertical (rastra, cincel y cultivador) hasta 0,20-0,22 m de profundidad (LV), y Labranza convencional (arado-rastra, arado de rejas y rastra de discos), hasta 0,18-0,20 m (LI).

Luego de tres años de efectos acumulados, en el suelo franco el perfil de resistencia mecánica (RM) mostró valores máximos en la capa 0,05-0,10 m para SD, en 0,10-0,15 m para LS y LV, y en 0,15-0,20 m para LI (Krüger, 1996a). Aunque LV no mostró efectos diferenciales sobre la RM, determinaciones posteriores en forma de transectas mostraron discontinuidades en la capa 0,10-0,20 m atribuibles al paso del cincel.

Luego de seis años, los valores de densidad aparente (DA) no mostraron diferencias entre tratamientos y no resultaron limitantes del crecimiento radical (Krüger, 1996b). En el suelo arenoso-franco la compactación por carga mecánica a distintos contenidos de agua (prueba Proctor), mostró menor densidad aparente máxima en SD que los demás tratamientos, hecho que se relacionó con un mayor contenido de carbono orgánico en la capa superficial que amortiguó la compactación. En el suelo franco, la RM fue mayor en SD hasta los 0,08 m de profundidad. En 0,10-0,15 m LS mostró mayor RM que LI. En el suelo arenoso-franco las tendencias resultaron similares aunque no significativas. Al igual que en las determinaciones de medio término, la variación vertical de la RM reflejó los pisos de trabajo de los principales implementos. SD mostró valores máximos en la capa 0,05-0,10 m y LS en 0,10-0,15 m. Los efectos de LV y LI se vieron enmascarados, en este caso, por labranzas secundarias superficiales. Las RM observadas no se consideraron limitantes de la penetración radical (Pabin *et al.*, 1998; Hamza & Anderson, 2005). En seis campañas, los rendimientos medios de girasol variaron entre 1100 y 1700 kg

ha⁻¹ en el orden SD<LS<LV=LI con diferencias significativas sólo en dos casos. Los rendimientos de trigo no variaron con las labranzas aunque sí con la fertilización nitrogenada (2100 vs. 2680 kg ha⁻¹).

Labranza vertical y raíces de trigo

En 1994 y 1995 se estudió el efecto de distintos tratamientos de labranza vertical sobre la RM, la distribución de raíces del trigo y sus rendimientos en un lote de producción de la zona semiárida del partido de Puan (Bs. As.) sobre un suelo clasificado como Haplustol lítico de textura franca (Ripoll & Krüger, 1996). La hipótesis de trabajo consideró que la utilización del cincel para reducir la RM de la capa 0,10-0,15 m, un piso de labranza atribuido al arado-rastra de uso común en la zona, permitiría una mayor exploración y captación de agua por el sistema radical del trigo, con posible impacto sobre sus rendimientos. Los tratamientos incluyeron un testigo con labranza superficial (T), dos espaciamientos entre púas del cincel: a 0,35 m (C₃₅) y a 0,25 m (C₂₅), y una doble pasada de cincel (2C).

En 1994 los efectos de los tratamientos fueron poco notables. La RM en C₂₅ y 2C fue menor que en T y C₃₀ hasta los 0,10 m. El número de raíces de trigo se incrementó en estos tratamientos en la capa 0,15-0,18 m. La correlación lineal negativa entre RM y número de raíces en la capa 0,05-0,28 m ($R^2=0,66$, $p=0,01$) indicó que, dentro de ciertos límites, el sistema radical del trigo fue sensible a la remoción del suelo. Sin embargo, en una campaña con precipitaciones menores a lo normal, los efectos no se tradujeron en rendimientos aunque se observó correlación lineal positiva entre el número total de raíces en la sección de suelo estudiada y el rendimiento del trigo ($R^2=0,94$, $p=0,05$). En 1995 se observó menor RM en 2C respecto de T y C₃₀ en la capa 0,15-0,20 m, también con mayor profundización del sistema radical. Los rendimientos de trigo, en una campaña menos favorable que la anterior, fueron aún más reducidos y sin diferencias entre tratamientos. Nuevamente se detectó relación entre el número de raíces y el rendimiento ($R^2=0,88$, $p=0,05$). Los resultados mostraron un cierto efecto de la labranza vertical sobre las raíces del trigo y la importancia de las condiciones ambientales sobre la expresión de los efectos de cambios en la compactación del suelo en la región.

Densidad aparente y crecimiento de plantas


En 2001 se realizó una experiencia en macetas bajo invernáculo con el objetivo de estudiar el efecto de la densidad aparente sobre variables que describen el crecimiento temprano de plantas de trigo, y establecer valores potencialmente limitantes. Se utilizó material proveniente de la capa arable de dos suelos de la zona subhúmeda del área de influencia de la estación experimental clasificados como Argiudol y Hapludol respectivamente **Tabla 2** .

Tabla 2: Características de dos suelos de la zona subhúmeda de la EEA Bordenave utilizados en los estudios de densidad aparente.

Table 2: Characteristics of two soils of the sub-humid zone of the EEA Bordenave used in the bulk density studies.

Característica	Argiudol	Hapludol
Arena (g kg ⁻¹)	400	520
Limo <0,05 mm (g kg ⁻¹)	540	360
Arcilla (g kg ⁻¹)	60	120
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	34,8	25,5
Fósforo extractable (g kg ⁻¹)	13,0	24,0
pH	6,2	6,7

El incremento de la densidad aparente produjo una disminución de la biomasa radical del trigo en ambos suelos **Figura 3** ③ La variación de la biomasa radical en función de la densidad aparente fue de carácter lineal y se produjo a partir del primer nivel de DA ($1,2 \text{ Mg m}^{-3}$). Desde etapas tempranas (10 días desde la emergencia en el Argiudol y 35 días en el Hapludol), se manifestaron variaciones en el largo y ancho de las láminas de las hojas en el nivel $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$. Coincidiendo con otros estudios (Cook *et al.* 1996), las diferencias se produjeron especialmente en las hojas más jóvenes, como consecuencia del retraso en su aparición. En consecuencia, el principal efecto de la compactación sobre la biomasa aérea se manifestó a través del menor tamaño de las plantas afectadas. A diferencia de la biomasa radical, la reducción de la biomasa aérea no fue lineal sino que se manifestó a partir de los niveles $1,6$ y $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ en el Argiudol y Hapludol respectivamente. En el Argiudol el largo de las espigas y el número de espiguillas por espiga también fue afectado a partir de estos niveles, mientras que en el Hapludol no se registraron efectos sobre ninguna de las variables medidas.

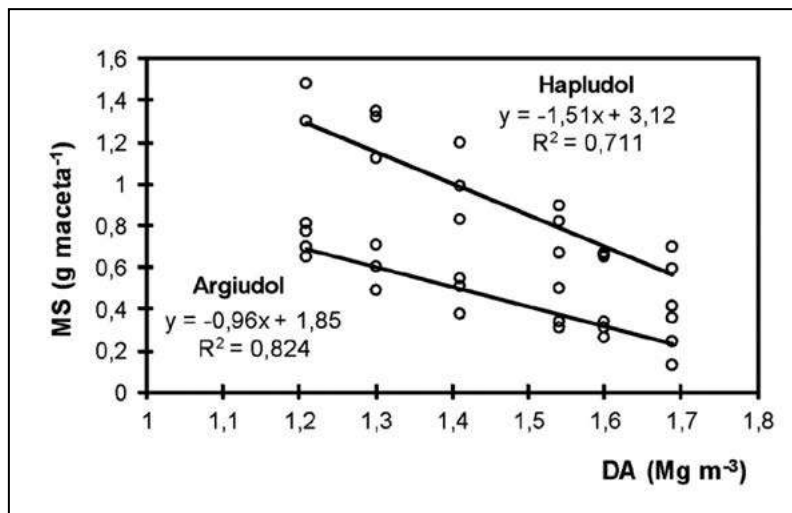


Figura 3: Variación de la materia seca de biomasa radical de plantas de trigo (MS) en función de la densidad aparente (DA), a 50 días desde la emergencia.

Figure 3: Variation of dry matter of wheat root biomass (MS) as a function of bulk density (DA), 50 days after emergence.

La reducción en el número de espiguillas como consecuencia de la compactación reviste importancia agronómica, ya que indica un efecto directo sobre uno de los componentes del rendimiento. Si a este efecto se suma una reducción en el número de espigas por unidad de superficie, tal como ha sido observado en otros estudios (Oussible *et al.*, 1993; Schmidt y Belford, 1994), existiría una alta probabilidad de mermas de rendimiento en grano al superar ciertos niveles de DA. En forma preliminar se establecieron para el Argiudol, valores críticos de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ que produjeron una reducción del 50% en la biomasa radical y aérea del trigo a los 50 días de la emergencia. La información obtenida resultó insuficiente para establecer un valor preciso para el Hapludol, estimándose que sería superior a $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$.

Una experiencia similar, en este caso con *Avena sativa* cv. *Suregrain*, se realizó en 2002 con material proveniente del mismo Hapludol típico (Venanzi & Krüger, 2004). Al igual que con el trigo, el incremento de la densidad aparente disminuyó la biomasa radical, alcanzándose el 50% del máximo con el nivel $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$. Desde los 26 días desde la emergencia se observaron disminuciones del área foliar de las plantas **Figura 4** ③ aunque recién a los 45 días se verificó la reducción del 50% del área foliar en el nivel $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$. El área foliar de los macollos representó un porcentaje importante de esta reducción.

Resultados similares han sido observados por otros autores (Cook *et al.*, 1996; Stirzaker *et al.*, 1996). El nivel crítico establecido en este caso fue de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$.

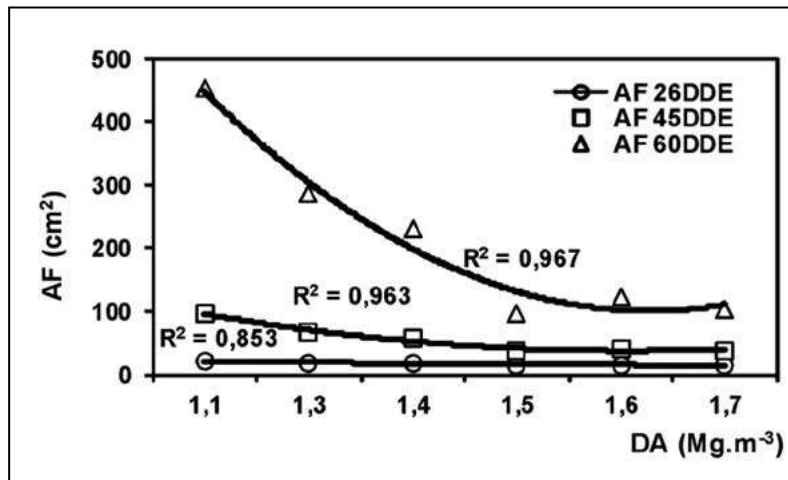


Figura 4: Variación del área foliar de plantas de avena (AF), en relación con la densidad aparente (DA) para las distintas fechas de muestreo.

Figure 4: Variation of leaf area of oat plants (AF), in relation to bulk density (DA) for the different sampling dates.

Estos estudios se refieren al impacto de condiciones extremas de compactación que afectan la porosidad total del suelo, permiten establecer valores críticos tentativos para cultivos de la región, aunque no establecen relaciones con los distintos diámetros de poros que pueden ser afectados diferencialmente.

■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS MIXTOS

Es conocido que el pastoreo produce efectos de compactación que dependen de las características de los suelos, además de factores relacionados con la carga, el tipo de animal y el contenido hídrico en que son pastoreados (Taboada & Micucci, 2009). Dada la remoción periódica del suelo, en sistemas mixtos bajo labranza estos efectos pueden pasar desapercibidos. En SD, en cambio, la falta de remoción sugiere un potencial problema con el tiempo (Morán *et al.*, 2000).

Sistemas agrícolas y mixtos en siembra directa

Para estudiar el efecto de la ganadería sobre sistemas de SD continua se comparó, entre 1999 y 2007, una secuencia avena forrajera/girasol/trigo bajo pastoreo directo (Gn), versus una secuencia girasol/trigo sin inclusión de animales (Ag). El experimento se realizó sobre un Hapludol típico de un establecimiento ubicado en la zona subhúmeda-semiárida del área de influencia de la estación experimental (Krüger *et al.*, 2008), realizándose determinaciones de RM, DA, cobertura y contenido de agua del suelo (W) en fechas cercanas a la siembra de cada uno de los cultivos. La **Tabla 3** muestra algunas características de este suelo.

Partiendo de un valor inicial común de $5000 \text{ kg MS ha}^{-1}$, la cobertura de residuos mostró variaciones en el tiempo en función del tratamiento, el cultivo antecesor y sus rendimientos. El sistema Ag mantuvo una cobertura media que superó en $2300 \text{ kg MS ha}^{-1}$ a Gn. El perfil de RM a la siembra del gi-


rasol mostró valores máximos en la capa 0,025 - 0,07 m en Gn, coincidiendo con resultados de estudios similares (Hamza & Anderson, 2005). A la siembra del trigo los perfiles de RM variaron poco respecto del girasol previo, mientras que a la siembra de avena se observó una disminución general de las diferencias entre tratamientos **Figura 5** .

Tabla 3; Caracterización del suelo en el sitio de estudio. Referencias: CC=capacidad de campo, PMP=punto de marchitez permanente, COT=carbono orgánico total, Pe=fósforo extractable.

Table 3; Soil characterization at the study site. References: CC = field capacity, PMP = permanent wilting point, COT = total organic carbon, Pe = extractable phosphorus.

Secuencia de horizontes	A – B ₁ – B ₂ – B ₃ – C – IIC _{ca}	
Profundidad efectiva (m)	0,60 – 1,50	
Limitante	Horizonte petrocálcico	
Taxonomía	Hapludol típico	
Horizonte	A	B1
Espesor (m)	0,12	0,16
Arena (g kg ⁻¹)	457	427
Limo 0,05 m (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	6,5
pH (suelo-agua 1:2,5)	6,7	6,5

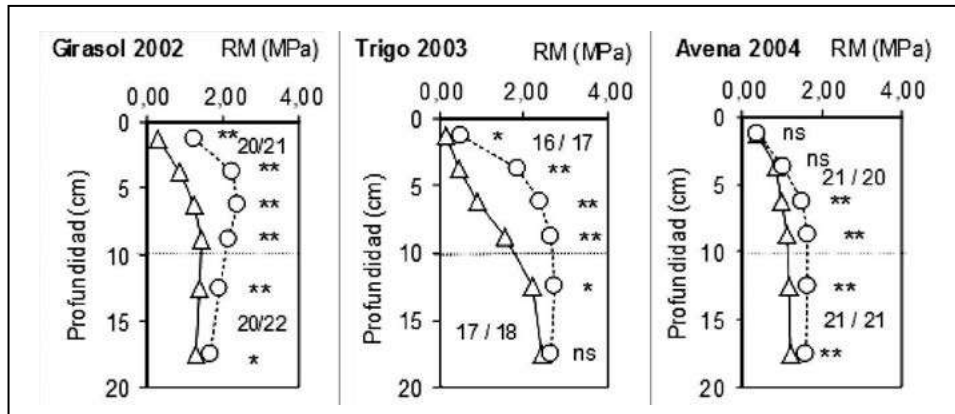



Figura 5: Resistencia mecánica (RST) en función de la profundidad a la siembra de los cultivos en Gn (círculos) y Ag (triángulos). Los números en cada figura y capa (e.g. 150/180) indican el contenido de agua del suelo (g kg⁻¹), en el orden Ag/Gn. ns=diferencias no significativas (p<0,05), *=p<0,01, **=p<0,01.

Figure 5: Mechanical resistance (RST) as a function of depth at planting Gn (circles) and Ag (triangles). The numbers in each figure and layer (e.g. 150 / 180) indicate the soil water content (g kg⁻¹), in the Ag / Gn order. ns = non-significant differences (p<0,05), * = p<0,01, ** = p<0.01.

La evolución temporal de la RM en la capa 0,025-0,20 m, previo ajuste del contenido de agua a un valor común, presentó una tendencia lineal ligeramente creciente en Ag. Por su parte Gn experimentó un brusco incremento luego del primer pastoreo de avena, y posteriores variaciones cíclicas en función

del cultivo, con valores cercanos a 2,5 MPa a la siembra del girasol, y mínimos a la siembra de avena
Figura 6 

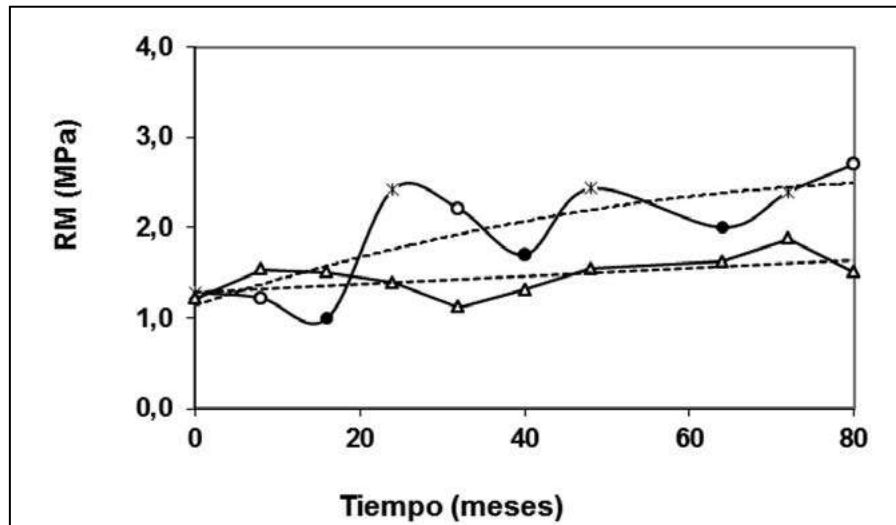


Figura 6: Variación en el tiempo (meses desde el inicio de la experiencia) de la RM en la capa 0,025-0,20 m del suelo. Valores ajustados a un contenido de agua de referencia (190 g kg^{-1}). La línea con triángulos corresponde al sistema agrícola (Ag), en el sistema mixto (Gn) los asteriscos corresponden a la siembra de girasol, los círculos vacíos a la de trigo, y los llenos a la siembra de avena.

Figure 6: Variation with time (months from the beginning of the experiment) of the MR in the layer 0.025-0.20 m. Values adjusted to a reference water content (190 g kg^{-1}). The line with triangles corresponds to the agricultural system (Ag), in the mixed system (Gn) the asterisks correspond to sunflower, the empty circles to wheat, and those filled to oats.

La disminución de la RM al final de cada ciclo de la secuencia sugiere una recuperación de la estructura luego del pastoreo. Entre los factores responsables de esta recuperación el incremento de la porosidad por el sistema radical de los cultivos juega un papel preponderante. La densidad de raíces de girasol y trigo en la capa superficial produce, al descomponerse, una importante red de bioporos que explica la menor RM (Williams & Weil, 2004; Sasal & Andriulo, 2005).

Teniendo en cuenta un valor crítico de RM de 2,5 MPa y considerando todo el período estudiado, esta RM fue superada en mayor proporción en Gn (50% de las fechas) que en Ag (20%).

Las determinaciones de DA mostraron valores máximos de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ en Gn (Krüger *et al.*, 2005). En la capa 0,05-0,1 m la tendencia fue ascendente hasta los 30 meses del estudio y disminuyó en los siguientes a valores cercanos a $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ sin diferencias consistentes entre tratamientos. Probando la hipótesis que la disminución en el volumen de poros afecta la infiltración, determinaciones realizadas con simulador de lluvia mostraron mayor infiltración básica en Ag (50 mm h^{-1}) respecto de Gn (24 mm h^{-1}).


Los rendimientos del girasol y las diferencias entre ambos tratamientos variaron entre años **Tabla 4** . Los menores rindes en Gn se atribuyeron a los cambios operados en el sistema como consecuencia de la introducción de la ganadería. El consumo de agua por el cultivo de avena, la menor cobertura de residuos y la reducción en la infiltración básica justificaron el menor contenido de agua a la siembra del girasol en años en que primaveras secas no permitieron recomponer la dotación hídrica del suelo (De Sa Pereira *et al.*, 2004). La mayor RM dificultó el trabajo de la sembradora o el crecimiento de las raicillas e influyó sobre fallas en la implantación del girasol.


Tabla 4: Rendimientos de girasol en siembra directa en secuencias de cultivos agrícolas (Ag), y mixtas (Gn) con pastoreo directo sobre un Hapludol típico.

Table 4: Sunflower yields in direct seeding in sequences of agricultural crops (Ag), and mixed (Gn) with direct grazing on a Typical Hapludol.

Año	Ag	Gn	Diferencia
	----- kg ha ⁻¹ -----		
2001	1450	1100	350
2002	1590	1200	390
2003	2680	1980	700
2004	2660	1682	978
2005	1891	1611	280
2006	2453	2357	96
2007	1958	1890	68
2008	280	0	280
Media	1870	1478	393

Posiblemente el consumo de nutrientes por el cultivo de avena, junto con la mayor RM y menor porosidad, justifiquen la menor altura y peso de las plantas de girasol observadas en algunos años en Gn respecto de Ag. El cultivo de trigo no presentó variaciones consistentes que pudieran ser relacionadas con los tratamientos.

Pastoreo y sistema de labranza

En un experimento de larga duración iniciado en Bordenave en 1999, se combinaron tratamientos de SD y labranza convencional, basada sobre rastra de discos (LC), con un sistema de pastoreo directo de los cultivos forrajeros (P), y uno de corte mecánico del forraje sin intervención de animales (NP). La secuencia de cultivos fue: verdeo de invierno (avena o centeno)/cultivo de verano (soja o sorgo)/trigo, sobre un Haplustol éntico de la serie Darregueira **Tabla 1** .

Luego del pastoreo de avena correspondiente al segundo ciclo de esta secuencia, se estudiaron sus efectos sobre el suelo y el siguiente cultivo de soja en SD (Venanzi *et al.*, 2004). Se observó mayor RM en P hasta 0,08 m de profundidad. Con un contenido de agua cercano a su capacidad de campo, los valores no superaron los críticos para el desarrollo radical, aunque sí el límite de 1,1 MPa que según Falótico *et al.* (1999) afectaría la emergencia de plántulas de cultivos comunes. La DA no superó el valor crítico de 1,6 Mg m⁻³ (Zimmerman & Kardos, 1961). La implantación de la soja se vio, sin embargo dificultada, hecho que se atribuyó a la combinación de alta RM y contenido bajo e irregular del agua en la capa superficial del suelo por lluvias insuficientes previas a la siembra. En etapas posteriores el número de plantas se incrementó por nacimientos tardíos, aunque no alcanzó a compensar las diferencias respecto del tratamiento NP. Al inicio de la etapa reproductiva, el índice de verdor de las plantas de soja en P mostró una disminución significativa respecto de NP, indicando menor disponibilidad de nitrógeno, posiblemente asociada a problemas de compactación (Ferreras *et al.*, 1996; Falótico *et al.*, 1999). A pesar de la menor población inicial y de algunos síntomas visuales de compactación el cultivo compensó las diferencias arribando a rendimientos similares aunque bajos (866 y 891 kg ha⁻¹ respectivamente) en una campaña relativamente desfavorable en precipitaciones. Otros estudios (Morán *et al.*, 2000), no observaron efectos negativos del pisoteo sobre el rendimiento de soja después de verdeos de invierno pastoreados.

En el mismo experimento Iglesias *et al.* (2014) estudiaron el efecto del pastoreo sobre la DA y porosidad del suelo luego de tres ciclos de la secuencia de cultivos. Antes del pastoreo de avena LC mostró menor DA y mayor porosidad total y macroporosidad que SD en la capa 0-0,10 m. Las diferencias se atribuyeron al efecto de los dos ciclos de pastoreo anteriores en SD y a las labranzas previas en LC. El pastoreo aumentó la DA y redujo la porosidad total y la macroporosidad de ambos tratamientos. En SD los efectos se limitaron a la capa superficial (0-0,05 m), mientras que en LC llegaron hasta 0,15 m. En ambos casos la mayor parte del cambio en el espacio poroso se atribuyó a los macroporos. El menor efecto en SD se justificó por la protección de la cobertura de residuos y la RM que le otorgó mayor capacidad de soporte al suelo. En LC, las labranzas generaron macroporos no biológicos que disminuyeron la capacidad soporte del suelo determinando un efecto más profundo de las pisadas. Esta capa compactada, frecuentemente removida en superficie por labores poco profundas, permanece en el perfil de muchos suelos de la región entre los 0,10 y 0,15 m originando “pisos de labranza” que, en realidad, tienen una génesis mixta por efecto de maquinaria agrícola y pisoteo animal.

En 2012 se estudió la variación de la RM del suelo en los mismos tratamientos (Frolla com. pers.). Se utilizaron transectas perpendiculares a la línea de siembra, con puntos de penetrometría cada 0,20 m que llegaron hasta 0,25 m de profundidad en incrementos de 0,05 m. Los valores de las cuatro réplicas de cada tratamiento se promediaron para elaborar el perfil de compactación **Figura 7** ©.

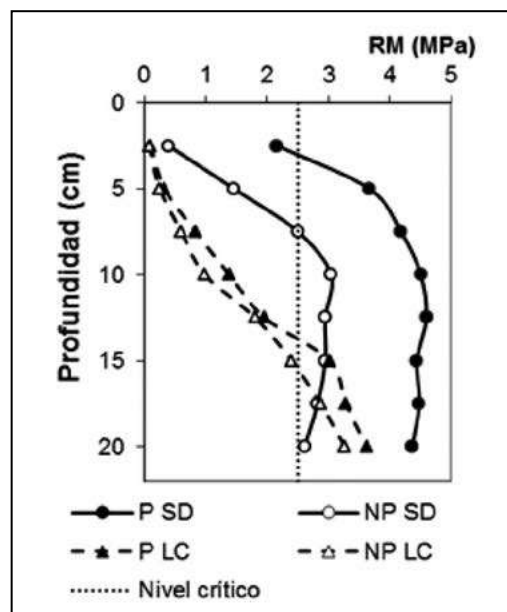



Figura 7: Perfil de resistencia mecánica (RM) en la capa 0-20 cm del suelo luego de 12 años de efectos de labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con (P) y sin (NP) pastoreo directo por bovinos. La línea vertical punteada representa el nivel crítico para la penetración de raíces (2,5 MPa).

Contenido de agua: 50 g kg⁻¹ y 80 g kg⁻¹ (0,1-0,2 m).

Figure 7: Profile of mechanical resistance (RM) in the 0-20 cm layer of soil after 12 years of conventional tillage (LC) and no-till (SD) with (P) and without (NP) direct grazing by cattle. The dotted vertical line represents the critical level for root penetration (2.5 MPa). Soil water content: 50 g kg⁻¹ and 80 g kg⁻¹ (0,1-0,2 m).

La RM varió en función del sistema de labranza y el pastoreo. El contenido de agua del suelo fue cercano al punto de marchitez y similar entre tratamientos, aunque se incrementó en profundidad atenuando el incremento de la RM. Los efectos del sistema de labranza se observaron hasta 0,18 m mientras que los del pastoreo alcanzaron 0,10 m de profundidad. SD-P mostró la mayor RM en todo el perfil, diferenciándose de SD-NP en los primeros 0,10 m. A partir de esta profundidad solamente se ob-

servaron efectos del sistema de labranza ($SD > LC$). Por su parte, LC no mostró efectos del pastoreo en esta etapa de la secuencia (cultivo de trigo). Los perfiles de RM de SD presentaron el característico incremento entre 0,05 y 0,10 m, mientras que LC lo hizo entre 0,10 y 0,15 m, mostrando el piso de labranza de la rastra de discos ligeramente incrementado por pastoreo. La **Figura 8**  presenta las secciones de compactación de los cuatro tratamientos correspondientes a una de las réplicas. Estas confirman las diferencias observadas en los valores medios por capa y muestran, además, la importante variabilidad espacial en la distribución de la RM que suele contribuir al nacimiento desperejo de los cultivos. En las campañas estudiadas, los rendimientos del trigo no mostraron efectos del pastoreo.

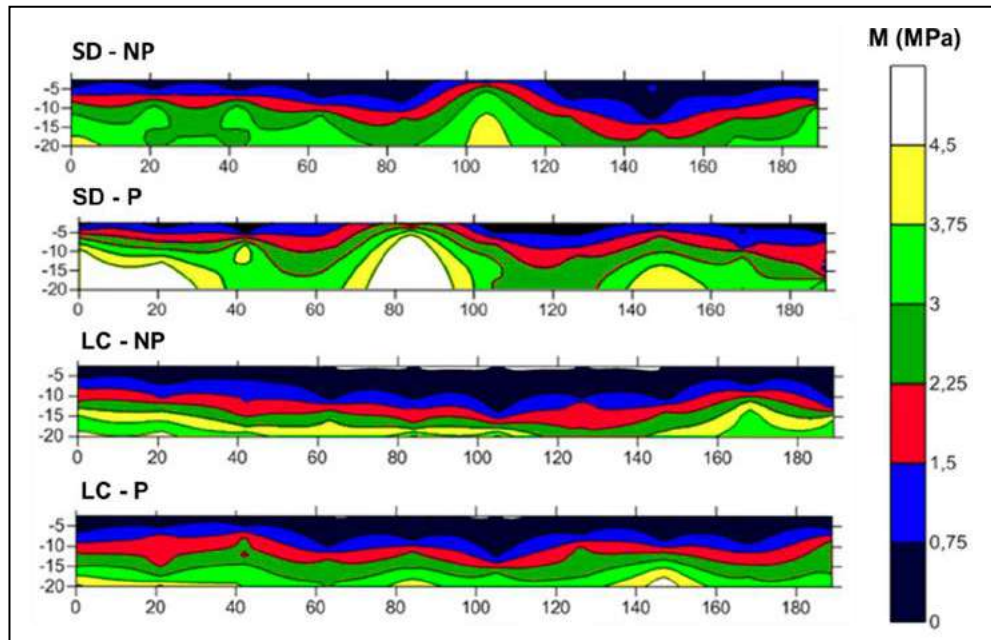



Figura 8: Secciones de resistencia mecánica (RM) en la capa 0-20 cm del suelo luego de 12 años de efectos de labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con (P) y sin (NP) pastoreo directo por bovinos.

Figure 8: Sections of mechanical resistance (MR) in the 0-20 cm soil layer after 12 years of conventional tillage (LC) and no-till (SD) with (P) and without (NP) direct grazing by cattle.

Pastoreo y carga animal

En los años 2014 y 2015 se realizó un nuevo experimento estudiando los efectos del pastoreo directo y la carga animal sobre propiedades físicas del suelo y el comportamiento del cultivo siguiente (Frolla, 2015). La experiencia se desarrolló en Bordenave, sobre Haplustoles énticos y Ustipsamientos típicos de textura franco arcillo arenosa (FaA), franco arenosa (FA), y arenosa franca (AF). Los pastoreos se realizaron sobre un cultivo de centeno consociado con vicia utilizando tres niveles de carga animal: sin pastoreo (TES), 200 cabezas ha^{-1} (MOD), y 400 cabezas ha^{-1} (PES), durante un período de 8 horas. A continuación se implantó un cultivo de sorgo granífero.

Solamente PES incrementó la DA de la capa 0-0,20 m en la textura AF sin llegar a valores limitantes para los cultivos. Con tendencia similar, las demás texturas no mostraron efectos significativos. En todas las texturas la RM aumentó hasta 0,10 m de profundidad, con valores mayores y superiores al crítico en MOD y PES respecto de TES. La conductividad hidráulica disminuyó en ambos tratamientos, con mayores cambios en las menores tensiones de determinación que se relacionaron con poros de mayor tamaño **Figura 9** .

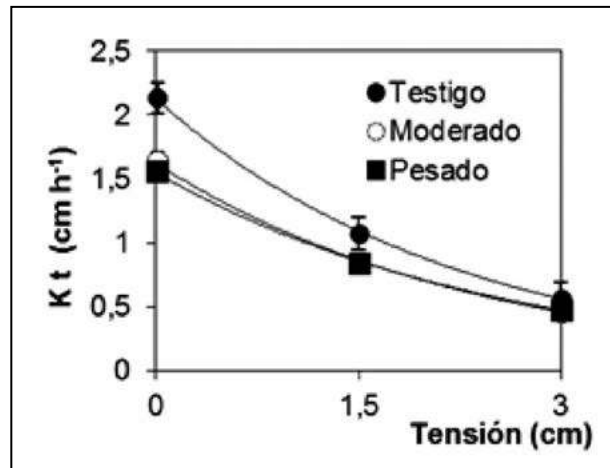


Figura 9: Conductividad hidráulica (K_t) después del pastoreo con carga animal creciente (Testigo < Moderado < Pesado), para distintas tensiones de determinación. Barras indican error estándar. Las líneas corresponden al ajuste exponencial de los datos que fueron previamente transformados para lograr normalidad.

Figure 9: Hydraulic conductivity (K_t) after grazing with increasing animal load (Control < Moderate < Heavy), for different determination tensions. Bars indicate standard error. The lines correspond to the exponential adjustment of the data that were previously transformed to achieve normality.

No se observaron efectos del pastoreo sobre la implantación del siguiente cultivo de sorgo. Las precipitaciones previas a la siembra equipararon el contenido de agua del suelo en todos los tratamientos. Las variables determinadas a lo largo del ciclo: altura de plantas, número de macollos, producción de materia seca, número de hojas, rendimiento y % de proteína tampoco mostraron efectos.

Los resultados de este estudio coinciden con información previa y agregan algunos datos: la falta de interacción entre textura y la mayoría de las variables de suelo implica que, en el rango textural estudiado, no existió un comportamiento diferencial por el pisoteo animal. Las escasas diferencias entre MOD y PES indican que las cargas fueron suficientemente elevadas como para producir efectos ya con el primer nivel (MOD). Se observaron correlaciones entre RM, conductividad hidráulica y macroporosidad, que revalorizan la utilidad de la RM como indicador de compactación dada su fácil determinación y evidente relación con otras variables que caracterizan el proceso.

■ CONSIDERACIONES GENERALES

Efectos sobre el suelo

De los diferentes estudios realizados surge que tanto las labranzas repetidas a una misma profundidad como el pisoteo de los animales determinaron efectos característicos sobre el suelo. Con variaciones debidas al contenido de agua, la frecuencia de laboreo y las herramientas utilizadas, los perfiles de RM reflejaron los efectos del sistema de labranza, con valores máximos en la capa 0,05-0,10 m para SD y en 0,10-0,15 m para LC. Las labranzas con cincel o arado de rejas disminuyeron la RM en esta última capa, pero en forma menos evidente. Debe recordarse que el sistema de labranza mecánico combina labores primarias relativamente profundas con labores secundarias superficiales. Estas últimas suelen enmascarar los efectos de la herramienta principal. La utilización de secciones de compactación (transectas) permitió, en ciertos casos, detectar discontinuidades en las capas densas atribuibles al efecto del arado de cinceles.

El pastoreo generó, en la mayor parte de los estudios, valores máximos de RM entre 0,05 y 0,10 m para SD y entre 0,10 y 0,15 para LC. La coincidencia con los efectos del sistema de labranza indica que el impacto del pisoteo se combina con capas duras previamente generadas por SD o LC. La utilización del arado cincel en LC ha probado ser efectiva en la fragmentación de estas capas y permitió una mayor profundización del sistema radical del trigo en una de las experiencias.

Otras propiedades del suelo también se vieron afectadas en diverso grado por labranza o pastoreo: macroporosidad, conductividad hidráulica, capacidad de retención de agua, densidad aparente, densidad aparente máxima y dinámica del nitrógeno. Posiblemente, por su sensibilidad, facilidad de determinación a campo, y relación con las otras variables la RM resulte el indicador más adecuado para estos estudios. Como aspecto desfavorable, su relación con el contenido de agua del suelo dificulta la comparación espacial y temporal de la información, hecho subsanable con calibraciones suelo-específicas generalmente laboriosas. La DA mostró resultados variables y menor sensibilidad. Al integrar en un solo valor la totalidad de los poros del suelo, registra con menor precisión que la macroporosidad los cambios en los diámetros mayores, más afectados por compactación.

Efectos sobre los cultivos

A pesar del evidente impacto negativo de la compactación sobre diversas propiedades físicas del suelo, y aún sobre el sistema radical de algunos cultivos, no se observó un efecto consistente sobre el rendimiento de los mismos. Al depender de factores tan numerosos como variables la expresión de los efectos de compactación en términos de producción resultó aleatoria.

Existen varias razones para este comportamiento. Si la limitación del crecimiento radical no induce estrés por falta de agua, nutrientes o anclaje, no deben esperarse disminuciones de rendimiento (Bowen, 1981). Dado que los efectos de compactación se dan en capas superficiales, el periodo en el que influyen sobre el crecimiento de las raíces puede ser relativamente corto (Bell *et al.*, 2011). Una reducción en la proporción de macroporos y de la conductividad hidráulica no necesariamente se refleja en la infiltración si las precipitaciones son de baja intensidad (Frolla, 2015). Por su flexibilidad y capacidad de realizar recorridos tortuosos las raíces pueden penetrar capas de suelo con resistencias que el cono rígido del penetrómetro registra como críticas. La correlación entre RM y contenido de agua del suelo determina que sus efectos resulten dependientes de ciertas condiciones ambientales que pueden producirse o no en periodos críticos del cultivo como la implantación. Por caso, la profundización del sistema radical del trigo por disminución de la RM no afectó los rendimientos en campañas muy desfavorables desde el punto de vista climático.

El caso más claro de impacto sobre el rendimiento, ocasionó pérdidas de hasta 900 kg ha⁻¹ del girasol en un sistema ganadero (Gan) comparado con uno agrícola (Ag). En este estudio resulta difícil separar los efectos del consumo de agua y nutrientes por parte del cultivo de avena respecto del barbecho químico. Si bien la menor infiltración puede explicar una menor captación de agua en Gan, la reducción de la cobertura superficial por pastoreo también genera un aumento de la evaporación y reduce la eficiencia de captación del agua de lluvia.

Los resultados obtenidos sustentan la hipótesis que los distintos efectos producidos por labranzas y pastoreo animal requieren condiciones específicas en momentos críticos para afectar significativamente los rendimientos. En este sentido interactúan aspectos ambientales (precipitación y temperatura),

manejo del pastoreo (carga, sistema de pastoreo, duración, cobertura), manejo del cultivo siguiente (susceptibilidad a la compactación, características de la sembradora, velocidad), y edafológicas (textura, tipo de arcillas, estructura, contenido de agua, contenido de materia orgánica).

Se requiere entonces orientar los estudios hacia la individualización y jerarquización de aquellos factores más relacionados con los efectos negativos de la compactación sobre los cultivos, y su peso relativo para poder avanzar en estrategias de manejo para contrarrestarlos. Mientras tanto, cualquier medida que contribuya a disminuir el impacto de labranzas y pastoreo sobre el suelo también disminuirá la probabilidad efectos negativos sobre el cultivo.

■ BIBLIOGRAFIA

- Bell, L; J Kirkegaard; A Swan; J Hunt; N Huth & N Fettel. 2011. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil and Tillage Research*: 113:19-29.
- Bowen, H. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: Arkin, C & H Taylor (Eds.). Modifying the root environment to reduce crop stress. *Am. Society of Agricultural Engineers*.
- Commegna, M & R Santamaría. 1980. Modificaciones de la estructura en suelos franco arenosos bajo distintas rotaciones de cultivos. XX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo.
- De Sa Pereira E; S Venanzi & H Krüger. 2004. Verdeo de invierno previo al cultivo de girasol. Su influencia sobre el agua del suelo. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Falotico, J; G Studdert & H Echeverría. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 17:9-20.
- Ferreras L; JL Costa; R Rizzalli & F García. 1996. Propiedades físicas del suelo bajo labranza convencional y siembra directa en el sudeste bonaerense. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Frolla, F. 2015. Efecto del pastoreo bovino sobre propiedades físicas del suelo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. Tesis Magister, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina.
- Gómez, LA; V Nakama & CA Puricelli. 1981. Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Escala 1:10000. INTA.
- Hamza, M & W Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82:121-145.
- Iglesias, J; J Galantini; H Krüger & S Venanzi. 2014. Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems. *Agriscientia* 31 (2):93-102.
- Morán, M; JL Costa; P Calviño & J Rodríguez. 2000. Influencia del pastoreo de verdes sobre algunas propiedades físicas del suelo y del cultivo de soja en un sistema de siembra directa. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Krüger, H. 1996a. Labranza en la región semiárida-subhúmeda bonaerense sur. En: Buschiazzi D; JL Panigatti & F Babinec (Eds.). Labranzas en la región semiárida argentina. Pp 67-69. INTA, Centro Regional La Pampa-San Luis.
- Krüger, H. 1996b. Compactación en Haplustoles del Sudoeste Bonaerense (Argentina), bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14 (2):104-106.
- Krüger, H; S Venanzi & E de Sa Pereira. 2005. Efecto del pisoteo por animales en planteos de siembra directa. En: Alvarez C & M Barraco (Eds.) Indicadores de calidad física de suelos. Bol.Tec.Nº4 Pp 27-30. INTA, EEA Gral. Villegas.
- Krüger, H; S Venanzi & E de Sa Pereira. 2008. Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continua. *Ciencia del Suelo* 26(2):211-217.
- 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.
- Ripoll, M & H Krüger. 1996. Labranza vertical en el SO de la prov. de Bs. As. Efectos sobre la resistencia a la penetración, el sistema radical y los rendimientos del trigo. IV Congr. Argentino y II Internacional de Ing. Rural, I:383-388.

- SAGyP-INTA. Proyecto PNUD ARG 85/019. 1989. Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000.- Buenos Aires, Argentina. 537 pp.
- 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.
- Taboada, M & S Micucci. 2009. Respuesta de las propiedades físicas de tres suelos de la Pampa Deprimida al pastoreo rotativo. *Ciencia del Suelo* 27(2):147-157.
- Venanzi, S; J Galantini & H Krüger. 2004. Pastoreo en siembra directa y crecimiento de soja. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Viglizzo, E; A Pordomingo; M Castro & F Lértora. 2002. La sustentabilidad ambiental de la agricultura pampeana. *Ciencia Hoy* 12 (68):38-51.
- 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.
- Zimmerman, R & L Kardos. 1961. Effect of bulk density on root growth. *Soil Sci.* 91:280-288.