

DESCOMPACTADORES ANGULADOS LATERALES. EFICIENCIA DE DISTINTOS DISEÑOS Y CONFIGURACIONES ESPACIALES

MARIANO JULIO PONCE^{1*}; MATILDE MUR¹; TELMO CECILIO PALANCAR¹; JUAN MANUEL VÁZQUEZ¹;
FACUNDO DANIEL GUILINO¹; VICTOR HUGO MERANI¹ & ROBERTO HERNÁN BALBUENA¹

Recibido: 20-11-16

Recibido con revisiones: 14-11-16

Aceptado: 04-12-16

RESUMEN

El proceso de compactación del suelo es una de las formas de degradación física más comunes, que se presenta mediante la densificación y reducción de la porosidad del mismo, asociado con cambios en su estructura y, generalmente, un aumento de la resistencia mecánica y una reducción en la conductividad hidráulica. Frente a la problemática planteada existe como alternativa desde la mecanización, la utilización de descompactadores con diferentes características de diseño. El objetivo del trabajo fue evaluar la eficiencia de reducción de la compactación del suelo de dos diseños de montantes, angulado lateral de lámina curva (AC) y angulado lateral de lámina recta (AR) en un suelo Argiudol típico, en dos disposiciones: mismo plano de acción (MPA) y distinto plano de acción (DPA). Las variables evaluadas fueron: resistencia a la penetración (RP) y área trabajada (AT). Para la RP los resultados fueron variables, pero ambos diseños de montantes en las dos alternativas de disposiciones se diferenciaron de la situación testigo. Para la segunda variable, se encontraron diferencias significativas entre diseños, obteniendo los AC, 40% más de AT, con respecto al diseño AR.

La roturación del suelo por los montantes angulados laterales posee una fuerte simetría lateral con respecto a la posición de la reja, similar a la que caracteriza a los implementos de montantes rectos. Además se encontraron efectos de roturación por debajo de la profundidad de labor (PT).

Palabras clave. Paratill; descompactación; área trabajada, resistencia a la penetración.

BENTLEG SUBSOILER. TILLAGE PERFORMANCE IN RELATION TO SPATIAL ARRANGEMENT AND DESIGN

ABSTRACT

Soil compaction process is one of the most common ways of physical degradation that occurs through densification and porosity reduction associated with changes in soil structure. Generally it is associated to an increase in mechanical strength and an hydraulic conductivity reduction. Facing the mentioned issues there are alternatives like mechanization and the use of subsoiling implements with different design features. The aim was to evaluate the soil compaction reduction efficiency of two shanks with rigid designs, curved bentleg (CB) and straight bentleg (SB) on a Typic Argiudoll, in two configurations: same action plan (SAP) and different action plan (DAP). The evaluated variables were: penetration resistance (PR) and trench cross-sectional area (TA). TA for CB obtained 40% more than the SB with significant differences. The PR results were more variable, but both shank designs in the two alternative configurations differed from the control situation. Soil tillage by bentleg subsoiler has a strong lateral symmetry with regard to the point position, similar to straight shanks.

Key words. Paratill; Compaction alleviation; Trench cross-sectional area; penetration resistance.

1. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata

* Autor de contacto: mponce@agro.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El sistema productivo agropecuario argentino de carácter extensivo ha experimentado, en los últimos veinte años, un cambio en el proceso de mecanización de implantación de los cultivos tanto para la producción de granos como de forrajes. La ausencia de labranza previa a la siembra, denominada como siembra directa, la presencia de maquinaria agrícola cada vez de mayor peso, el tránsito en condiciones de suelo húmedo, la falta de rotación, el alto contenido de limo en algunos suelos del área pampeña y el bajo porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial del suelo, generan un aumento en la compactación superficial y sub-superficial del mismo (Elisei *et al.*, 2012). Si bien los suelos en producción bajo sistemas de no labranza frecuentemente ofrecen una mayor capacidad portante (Dominguez *et al.*, 2000), la ausencia de labranzas implica que no existan acciones que permitan atemperar periódicamente sus efectos, principalmente a nivel subsuperficial, por lo cual se convierte en un proceso acumulativo (Claverie & Balbuena, 2005).

El proceso de compactación del suelo es una de las formas de degradación física más comunes (Casagrande *et al.*, 2009) que se presenta mediante la densificación y reducción de la porosidad, asociado con cambios en la estructura y, generalmente, un aumento de la resistencia mecánica y reducción en la conductividad hidráulica (Raper & Mac Kirby, 2006). Esto genera un ambiente poco propicio para el desarrollo y el crecimiento radical, una reducción de la infiltración y por lo tanto un aumento del escurrimiento superficial y de las posibilidades de erosión (Raper & Mac Kirby, 2006), reducción del agua disponible para las raíces, generación de ambientes con escasa concentración de oxígeno y, además, una disminución de la movilidad del agua y del oxígeno en el perfil de suelo (Koostra & Stombaugh, 2003).

Los procesos naturales de recuperación de los suelos compactados, tales como ciclos de humectación-desecación, congelamiento-descongelamiento, actividad biológica, generación de poros por acción de raíces, incorporación de materia orgánica por la rotación de cultivos, no son suficientes (Jorajuría, 2005), debido al incremento de la intensidad de tráfico producto de los ciclos productivos consecutivos a los cuales son sometidos los suelos.

Frente a la problemática planteada existe como posible solución desde la mecanización, la utilización de descompactadores con diferentes características de diseño, principalmente en lo que se refiere al montante y a la reja.

Los principios de trabajo y roturación del suelo de los escarificadores fueron descriptos por Spoor & Godwin (1978) y por Spoor & Fry (1983).

Spoor *et al.* (2003) afirman que la labor debe fisurar el suelo para roturar la capa compactada, sin modificar en forma importante las unidades estructurales del suelo, dejando a los procesos naturales y biológicos, estabilizar la condición resultante. Así se mantendría en el suelo capacidad portante capaz de minimizar los procesos de recompactación (Spoor, 2006).

En el trabajo con escarificadores se produce el proceso de interacción entre los órganos activos en el que, según Willat & Willis (1965), existe un aumento del área trabajada (AT), resultado que no ocurre cuando los órganos activos se encuentran demasiado distanciados o cercanos. Al respecto, Godwin *et al.* (1984), obtuvieron valores mínimos de resistencia específica (RE, cociente entre el AT, y esfuerzo de tracción, ET) y uniformidad en el laboreo con espaciamientos entre órganos activos del orden de 1,4 +/- 25% la profundidad de labor (PT).

En lo que respecta a AT, Raper (2005) no encontró diferencias significativas entre montantes angulado lateral de lámina curva (AC) y angulado lateral de lámina recta (AR). Elisei (2013) remarca la escasa interacción en ambos tipos de montantes, cuando trabajan con la angulación hacia el mismo lado.

Vallejos *et al.* (2010) midieron un AT de 0,48 m² para cuatro AR dispuestos en forma convergentes hacia el centro, mientras que Balbuena *et al.* (2003) determinaron un AT de 0,21 m² para el trabajo de dos AC, en forma convergente por pares.

Vinculado al grado de aflojamiento del suelo, Karlen *et al.* (1991) evaluaron la resistencia a la penetración (RP) luego del trabajo con montantes AR, la cual fue significativamente menor con respecto al testigo.

Simoes *et al.* (2009) trabajando a 0,38 m de profundidad, con montantes AR y AC, establecieron diferencias en la RP hasta los 0,5 m respecto al testigo. Elisei *et al.* (2012) encontró valores de RP significativamente menores respecto al testigo, en todo el perfil analizado, para montantes AR, pero solamente en los primeros 0,20 m para AC. Asimismo, estableció diferencias entre los AR y AC, desde los 0,15 m a los 0,30 m de profundidad, en favor de los primeros. Cholaky *et al.* (2009) con escarificadores rígidos, encontraron que la RP fue estadísticamente menor en todos los tratamientos con descompactación, respecto a los

no descompactados. Además mediante la técnica de perfil cultural lograron apreciar efectos de roturación por debajo de la PT. Igualmente Fielke (1996) encontró que las rejas desafiladas produjeron modificaciones de la estructura hasta 0,05 m por debajo de la PT. También Colareda (2013) encontró diferencias de RP, luego del pasaje de un escarificador de montantes AC a 0,35 m de PT, con respecto al testigo hasta 0,5 m.

Con montantes AR, Hilbert & Pincu (2000), trabajaron hasta los 0,30 m y encontraron significancia respecto al testigo en la RP hasta 0,42 m.

En relación a este parámetro, Threadgill (1982) indicó que valores de 1,5 MPa de RP, disminuyen el crecimiento de raíces y valores de 2 MPa lo impiden. Dexter (1987) vio afectado el potencial de crecimiento de raíces en un 50% con valores de RP de 2 MPa.

Por lo expuesto el objetivo del trabajo fue evaluar la eficiencia de roturación de dos diseños de montantes en el perfil de un Argiudol típico y caracterizar la incidencia de la disposición de los órganos activos en el trabajo de montantes dispuestos por pares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del ensayo

El ensayo tuvo lugar en la Estación Experimental Julio Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de

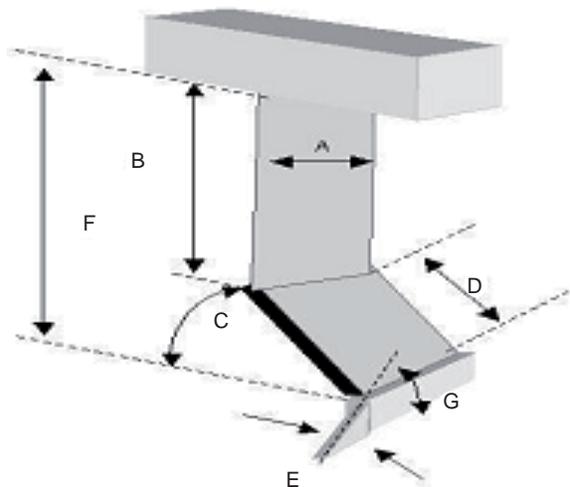


Figura 1. Dimensiones del montante AR: A: 0,125 m; B: 0,35 m; C: 60°; D: 0,25 m; E: 0,37 m; F: 0,57 m; G: 25°.

Figure 1. SB dimensions: A: 0,125 m; B: 0,35 m; C: 60°; D: 0,25 m; E: 0,37 m; F: 0,57 m; G: 25°.

la U.N.L.P., 34°55S, 57°57W, sobre un suelo clasificado como Argiudol típico (Soil Taxonomy, 1999). El ensayo se llevó a cabo en un lote con pasto natural, sobre el cual se realizó oportunamente la henificación de la biomasa. Como se observa en la Figura 9, el suelo se encontraba compactado, ya que entre los 0,08 m y los 0,12 m la RP fue de 2 MPa, incrementándose en profundidad.

Maquinaria utilizada

Para la experiencia se utilizó un tractor de tracción asistida (FWA), de 73,5 kW y un peso total de 44,9 kN. Se utilizó un bastidor de arrastre, sobre el que se acoplaron 2 órganos activos de cada diseño. Se establecieron 2 tratamientos en correspondencia con el diseño de los órganos activos: 1) AR (Fig. 1); 2) AC (Fig. 2), ambos con disposición por pares en forma convergente, mientras que se tomó como subtratamientos a la disposición espacial de los mismos: A) Mismo Plano de Acción (MPA); B) Distinto Plano de Acción (DPA).

Para ambos tratamientos y subtratamientos la distancia entre puntas de reja fue 0,35 m para alcanzar una PT teórica de 0,22-0,24 m, de acuerdo con la relación distancia entre rejas de 1,5 veces la PT, para alcanzar la mínima RE (Godwin *et al.*, 1984). Para el ARDPA y ACDPA, los montantes estuvieron distanciados en 1,10 m entre planos de acción. Para asistir al paso del implemento se le colocaron cuchillas lisas para cortar el rastrojo de 0,4 m de diámetro a una profundidad media de labor de 0,06 m en la línea de cada montante. En todos los tratamientos se transitó a una velocidad teórica de 2 m s⁻¹, iniciando el trabajo 15 m antes del comienzo de las parcelas de ensayo para recorrer los 30 m a la misma velocidad y profundidad.

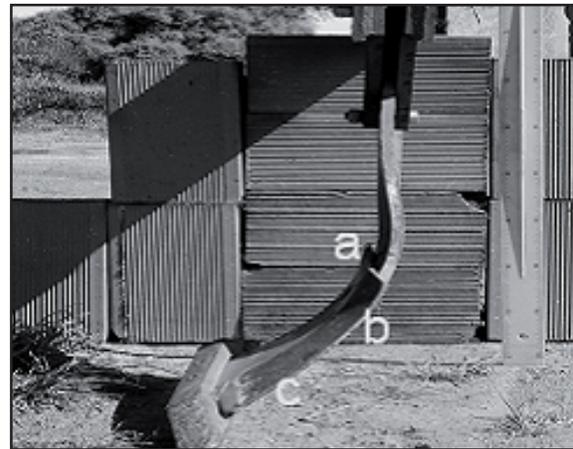


Figura 2. Dimensiones del montante AC. Medidas de los radios de curvatura anterior y posterior respectivamente: a (3,727 m; 3,588 m), b (4,131 m; 1,333 m), c (9,747 m; 6,739). Ángulo de ataque de la reja: 20°.

Figure 2. CB dimensions. Measures of the radius of curvature anterior and posterior respectively: a (3.727 m; 3.588 m); b (4.131 m; 1.333 m), (9.747 m; 6.739). Rake angle: 20°.

Variables experimentales

Área trabajada

Para la determinación del AT se realizaron un total 6 trincheras, es decir, 6 repeticiones por cada tratamiento/subtratamiento. Se removió el suelo laboreado de forma manual para luego colocar un perfilómetro (Fig. 7, Fig. 8) similar al descrito por Willat & Willis (1965) y por Stafford (1979). En gabinete mediante diferentes softwares, se determinaron las AT. Con el CorelDraw X3 se dibujó cada AT y con el CobCal 2 Versión 2.1 se la calculó.

Resistencia a la penetración

Se determinó mediante un penetrómetro de cono electrónico RIMIX CP20, construido bajo Norma ASAE S312.2 (1992). Se empleó un cono de 30°, con diámetro de 0,01283 m. Asimismo, con el objeto de poder comparar los valores de RP, se determinó la humedad *in situ* por el método gravimétrico, en los estratos: 0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m; 0,30-0,40 m, efectuándose 4 repeticiones por cada subtratamiento.

El estado mecánico del suelo se caracterizó cada 0,025 m de profundidad hasta 0,60 m, a través de transectas a la dirección de desplazamiento del equipo, obteniendo valores que variaron, en promedio de cada rango de profundidad, entre 1,2 MPa y 5 MPa, sin diferencias significativas entre los distintos sitios de muestreo en cada estrato de medición.

Para las 6 estaciones de medición se realizaron transectas en forma perpendicular a la dirección de avance, abarcando 0,8

m de ancho. En las mismas se efectuaron 9 perfiles de RP (desde la superficie hasta los 0,6 m de profundidad), uno por fuera de cada montante, uno en la línea de cada montante, uno en correspondencia con la punta de cada reja y tres entre rejas.

A partir de los datos de RP se realizaron mapas de curvas de iso-resistencia a la penetración mediante el software Surfer 12 (Golden Software, Inc.).

Diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques al azar, donde se distribuyeron las parcelas de medición correspondientes a cada tratamiento y subtratamiento. Se realizaron 3 bloques; cada parcela de medición tuvo una dimensión de 32 m de largo y 8 m de ancho, dentro de las cuales se efectuaron dos pasajes de cada configuración, es decir que se realizaron 8 subparcelas por bloque.

Los resultados se analizaron mediante un ANOVA y las medias se compararon por el test de LSD ($P \leq 0,05$). Para el análisis estadístico se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Área trabajada

En la Figura 3 se visualizan los resultados obtenidos por los AR y AC, en MPA y DPA. En la misma se aprecia una mayor AT, aproximadamente un 40% superior, a favor de

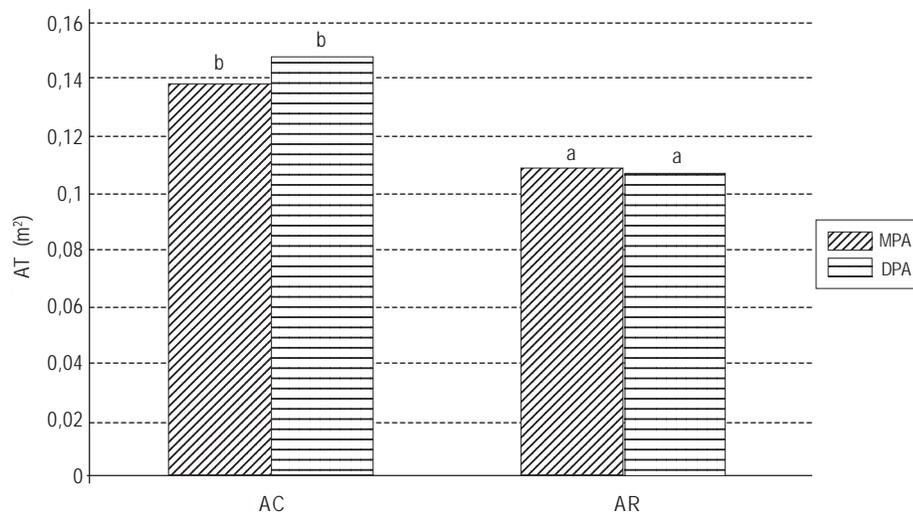


Figura 3. AT en m² por AR y AC, en las disposiciones MPA y DPA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) LSD.
Figure 3. TA in m² SB and CB, in the setting SAP and DAP. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0,05$) LSD.

los AC, la que es estadísticamente significativa, sin que existiera significancia de la interacción entre tratamientos y subtratamientos.

Estas diferencias, en primera instancia, podrían atribuirse a las características de diseño del montante fundamentalmente, ya que las condiciones de trabajo trataron de mantenerse invariables entre los tratamientos. Sin embargo, durante el procesamiento y análisis de las perfilometrías efectuadas, se detectaron variaciones en la profundidad de trabajo que pudieron afectar el AT. En virtud de ello, se determinó la PT de trabajo efectiva a partir de las perfilometrías realizadas para cada tratamiento y subtratamiento. La PT a nivel de la reja (Fig. 4) se tomó como promedio de las máximas medidas correspondientes a cada uno de los montantes utilizados, mientras que la PT a nivel de la zona

central (Fig. 5), de interacción entre los dos montantes, se calculó a partir del promedio de los 3 valores centrales, con una equidistancia de 0,06 m a partir de la medición central.

El análisis indica que la PT alcanzada por los AC fue significativamente mayor que la correspondiente a los AR, sin que se registraran efectos de MPA o DPA sobre este parámetro, como así tampoco interacción entre montantes y disposición.

En la Figura 4 se observa que en ambos montantes, DPA, resultó en una mayor PT media. Ello podría atribuirse a que el escarificador quedó ligeramente desnivelado, en sentido antero posterior, clavándose en mayor medida en la parte delantera que en la trasera. La menor PT correspondió a los AR en el MPA y la mayor a DPA del AC. Las diferencias

Figura 4. Profundidad de trabajo de la reja para los distintos diseños y configuraciones y configuraciones espaciales. AR: Angulados Rectos; AC: Angulados Curvos. MPA: mismo plano de acción; DPA: diferente plano de acción. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) LSD.

Figure 4. Operation depth of the point in relation to spatial settings and designs. SB: a straight bentleg; CB: curved bentleg. SAP: same action plan; DAP: different action action plan. Different letters indicate statistically differences ($P < 0.05$) LSD.

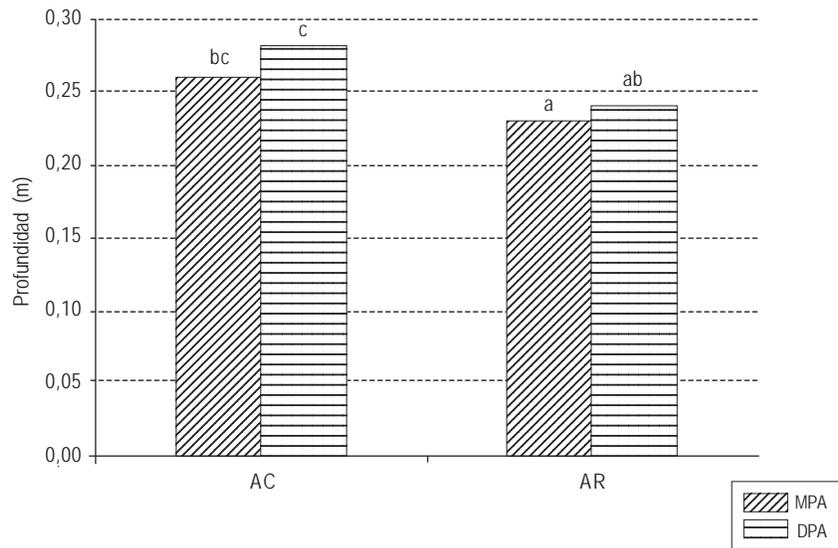
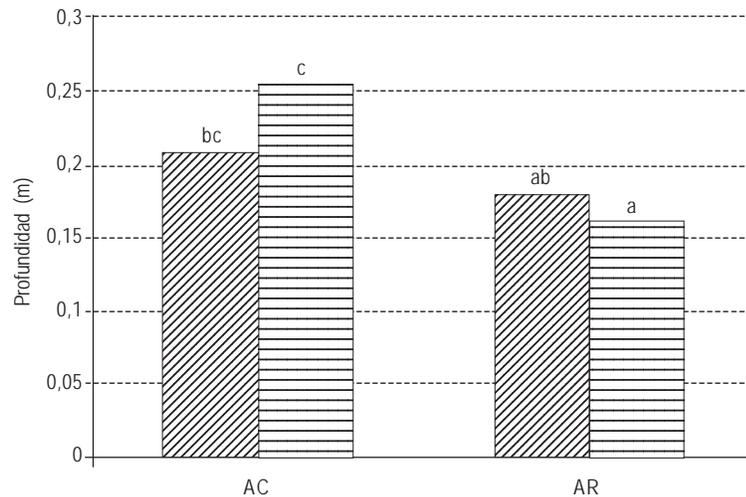


Figura 5. Profundidad de trabajo del sector medio entre rejas para los distintos diseños y configuraciones espaciales. AR: Angulados Rectos; AC: Angulados Curvos. MPA: mismo plano de acción; DPA: diferente plano de acción. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) LSD.

Figure 5. Operation depth of the middle section between points in relation to spatial settings and designs. SB: straight bentleg; CB: curved bentleg. SAP: same action plan; DAP: different action plan. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$) LSD.



en profundidad pueden haberse generado por las lógicas dificultades de alcanzar una misma PT a partir de órganos activos con diferente despeje, como así también en diferencias en la capacidad de penetración dada por una mayor succión ocasionada por las diferencias de diseño de ambos implementos, ya que los AC presentan una reja de mayores dimensiones, de sección rectangular, con corte angulado y bisel dirigido hacia el centro, con un ángulo de ataque algo menor al del AR, tal como es posible visualizar en la Figura 1 y Figura 2. Debe entenderse, al respecto, que la mayor o menor succión que presente un diseño sobre el otro puede afectar la PT por las modificaciones de la carga vertical que soportan las ruedas del equipo, a la cual se oponen a través de la presión de inflado, pudiendo las mismas sufrir una mayor deflexión y en consecuencia producir variaciones en la PT.

Las principales diferencias, significativas, de la PT se encuentran entre el AC en DPA y el AR en MPA. Si se calculan las AT en función del modelo propuesto por Willat & Willis (1965) a partir de los patrones de roturación establecidos por los mismos (Fig. 6), pueden explicarse en gran medida las diferencias en AT entre los distintos montantes; por lo cual, se supondría que el AT debería presentar un ordenamiento de menor a mayor ARMPA, ARDPA, ACMPA, ACDPA, en función de las PT alcanzadas por cada uno de los tratamien-

tos. Sin embargo, se produjeron variaciones en las áreas medidas, resultando invertido el ordenamiento para ARMPA que fue mayor a ARDPA. Esto indicaría, que además de la PT como determinante del AT existiría algún factor asociado a la disposición y al diseño del equipo.

Si se eliminan los posibles efectos de la PT, los resultados en un análisis general serían coincidentes con los informados por Raper (2005) quien trabajando con AR y AC no encontró diferencias estadísticamente significativas entre las AT por ellos. Los resultados del ensayo, al igual que los de Raper (2005) guardan relación con lo encontrado por Willat & Willis (1965) para el trabajo con escarificadores rectos, ya que el AT calculada a partir de la PT, teniendo en cuenta un ángulo de roturación del suelo de 45° en forma lateral, resulta adecuadamente predicha por el cuadrado de la PT de la reja. Para los resultados de Raper (2005) la estimación es de $0,1089 \text{ m}^2$, para una PT de $0,33 \text{ m}$, cercano a los registros de $0,1028 \text{ m}^2 \text{ montante}^{-1}$ AR y $0,1075 \text{ m}^2 \text{ montante}^{-1}$ AC. Sin embargo, cuando se realiza el análisis de regresión de los datos del ensayo, sin tener en cuenta tipo de montantes y disposición, el R^2 es de $0,23$, indicando una alta variabilidad y escasa correlación, que podría ser explicado en parte por la propia variabilidad en la roturación del suelo y los procesos de interacción entre órganos activos.

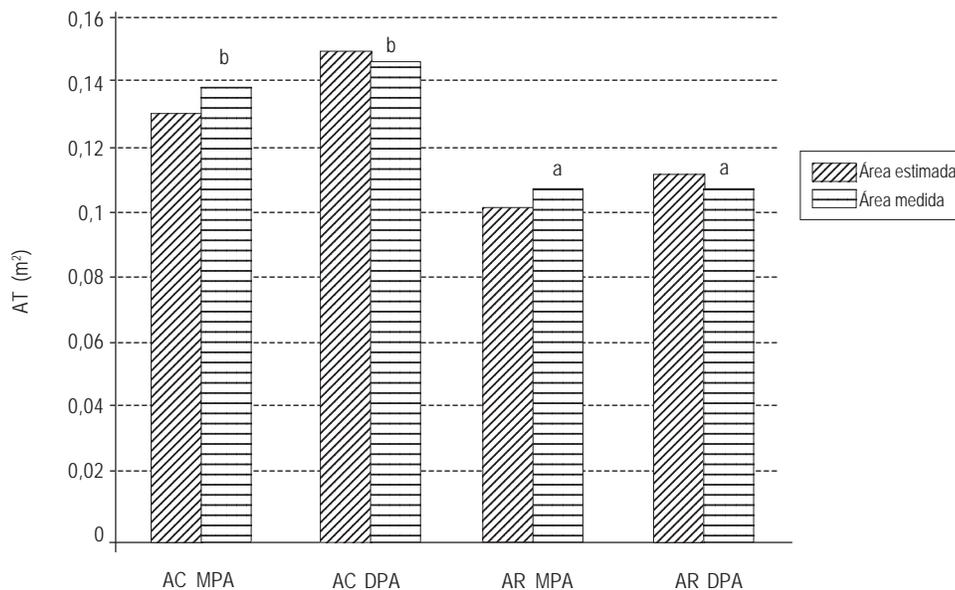


Figura 6. AT estimadas y medias para los distintos diseños y configuraciones espaciales. AC: Angulados Curvos; AR: Angulados Rectos; MPA: mismo plano de acción; DPA: diferente plano de acción. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) LSD.

Figure 6. Estimated and measured areas in relation to spatial settings and designs. SB: straight bentleg; CB: curved bentleg; SAP: same action plan; DAP: different action plan. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$) LSD.

En relación a ellos, los efectos de interacción pueden ser valorados, en parte, a través de la PT efectiva en la zona central roturada por cada par de órganos activos. Los valores medios de profundidad en dicho sector, se visualizan en la Figura 5. La misma fue significativamente mayor para los AC, pero también fue significativa la interacción entre diseño de montantes y disposición, lo cual indica que los distintos diseños no tuvieron la misma respuesta para este parámetro. En los AC, DPA alcanzó una profundidad de 0,25 m, ligeramente inferior a la profundidad alcanzada por las rejas para ese mismo subtratamiento, con diferencias significativas con el AR para cualquiera de sus disposiciones. En forma contraria, para los AR la disposición que alcanzó una mayor profundidad de roturación fue la correspondiente a MPA, aunque sin diferencias significativas con DPA. Esto marca, en parte, una diferencia con lo que se registró para la PT de las rejas, para este subtratamiento. A su vez, en el AC las diferencias entre DPA y MPA resultaron mayores que las medidas para la PT de las rejas. Lo expuesto

indicaría que independientemente que el AT se relacione inexorablemente con la PT, existen otros factores de diseño y disposición que inciden sobre las características del perfil trabajado por el descompactador. Lo antedicho tiene importancia en función de la eventual necesidad de roturar capas compactadas, puesto que aquellos diseños con menores diferencias de profundidad entre los sectores correspondientes a las rejas y el lomo, permitirán trabajar a una menor profundidad para alcanzar el aflojamiento de la misma. En la Figura 7 y Figura 8 se muestran las características de roturación de los AC y AR.

Respecto al AT, Vallejos *et al.* (2010) calcularon un frente de labor de 0,48 m² para cuatro AR, es decir, que para dos el AT es de 0,24 m², más del doble al determinado en este ensayo, pero con una PT máxima para las rejas de 0,35 m. Si se estima el AT, en función del cuadrado de la profundidad, se tendrá nuevamente una adecuada aproximación entre valores predichos y medidos.

Figura 7.
Roturación de AR.
Figure 7. SB tillage.

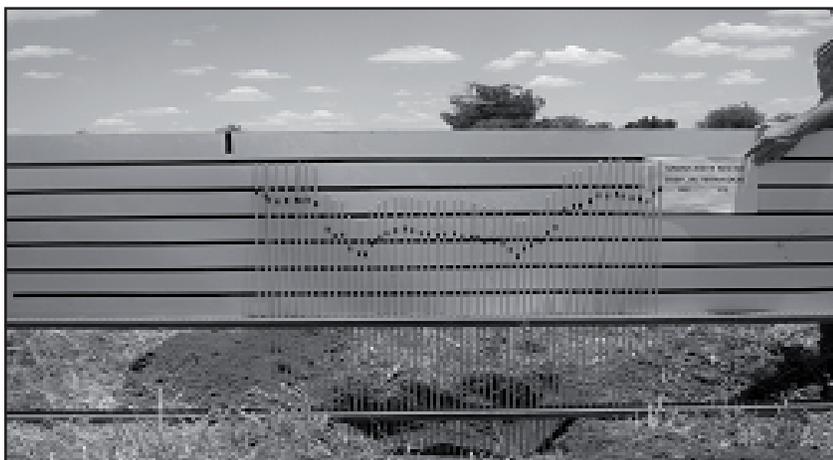
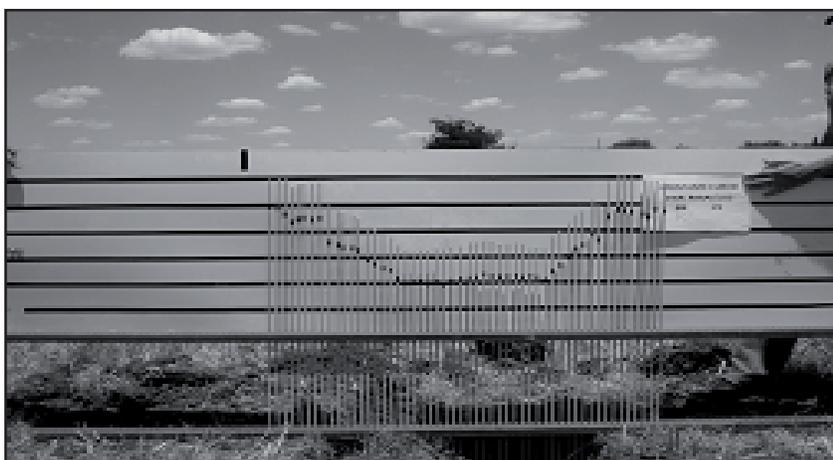


Figura 8.
Roturación de AC.
Figure 8. CB tillage.



Esto implica que a nivel técnico, es posible validar en acuerdo con los resultados de AT, que los diseños de descompactadores de montantes angulados, independientemente de su diseño AC o AR, roturan el suelo de manera similar a la de los escarificadores de montante recto, pese a las diferencias de diseño de sus órganos activos y cabría efectuar arreglos espaciales de distanciamiento entre órganos activos de 1,5 veces la PT, si es que se mantiene una adecuada eficiencia desde el punto de vista energético.

Pese a ello, en los gráficos presentados por Vallejos *et al.* (2010) se visualiza claramente que existen diferencias entre la roturación de aquellos montantes que trabajan en un MPA hacia el centro, con aquellos que trabajan por detrás y al costado con la misma disposición que su predecesor. En el primer caso, el AT es mayor, con una menor altura del lomo, con respecto a lo que ocurre con los de la segunda disposición. Similares consideraciones realiza Elisei (2013) para el trabajo con descompactadores AC, por diferencias en la RP en los sectores centrales y laterales. Por otra parte, los resultados obtenidos por Balbuena *et al.* (2003) con AC, indican diferencias en las características de roturación según la configuración sea por pares hacia el centro en MPA o en DPA en conjunto hacia el centro. Para el primer caso detallan una mayor PT efectiva en el sector central entre las rejas y una mayor uniformidad en ese

parámetro, llegando a un 72% de la medida para las rejas. En este caso, para los AC se registró en promedio un 85% aproximadamente en el sector medio con respecto a las rejas, mientras que en los AR dicha relación fue del 78% algo mejor en conjunto que lo establecido por Balbuena *et al.* (2003).

Resistencia a la penetración

En la Figura 9 se visualizan los valores de RP en función de la profundidad para la situación testigo del ensayo. Los contenidos de humedad promedio en los primeros 0,4 m fueron 26,87% para ARMPA, 26,41% ARDPA, 27,43% ACMPA y 25,18% ACDPA, sin diferencias significativas entre los mismos. En la Figura 9 se observa que a escasa profundidad, los registros de RP superan los valores de 2 MPa indicados por Dexter (1987) para reducir el crecimiento radical o impedirlo según Threadgill (1982). Asimismo, a profundidades menores a los 0,10 m ya se supera el límite de 1,5 MPa que reduce la tasa de crecimiento de las raíces (Threadgill, 1982). Resultados similares de RP, en tratamiento testigo, fueron hallados por Simoes *et al.* (2009), Balbuena *et al.* (2003), Karlen *et al.* (1991), los cuales justifican la necesidad de intervenir mecánicamente el suelo para atemperar las limitaciones encontradas.

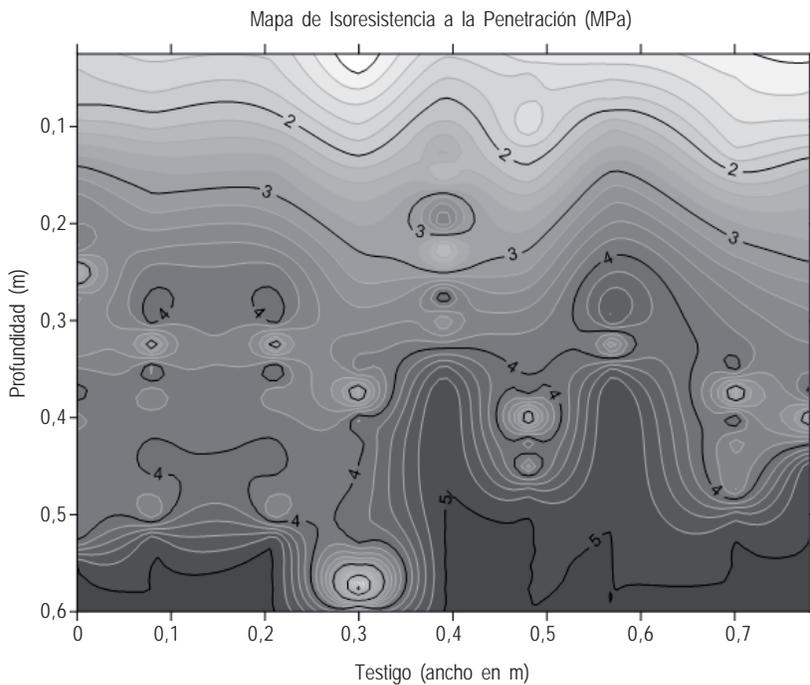


Figura 9.
Isoresistencia a la penetración. Testigo.
Figure 9.
Penetration isoresistance. Control.

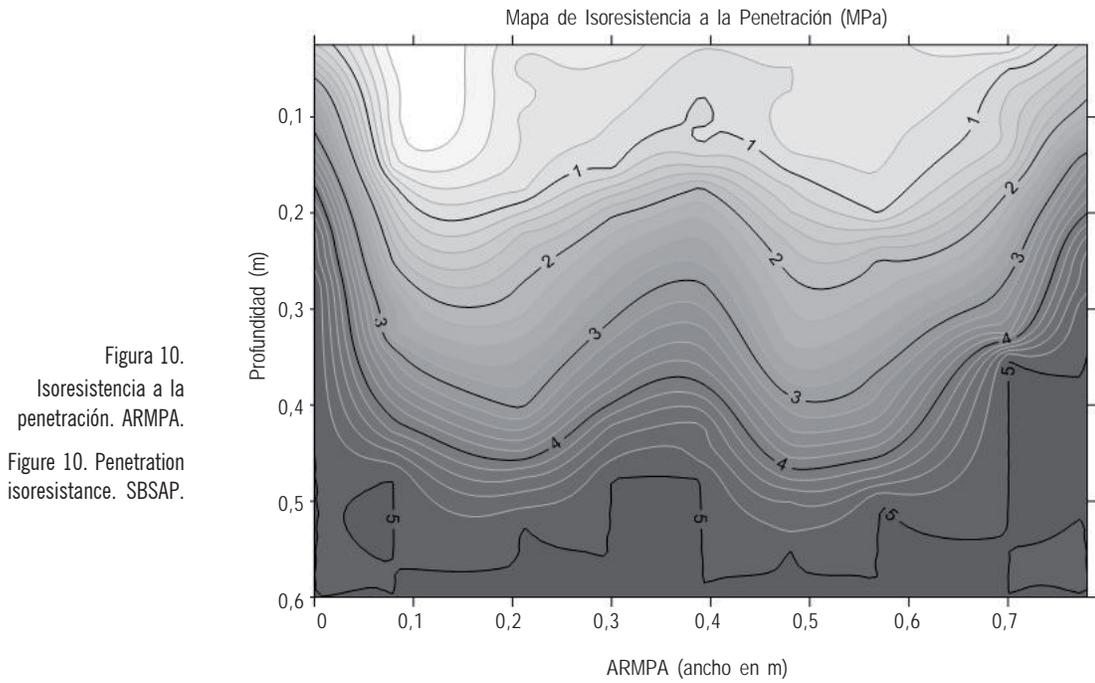


Figura 10. Isoresistencia a la penetración. ARMPA.
Figure 10. Penetration isoresistance. SBSAP.

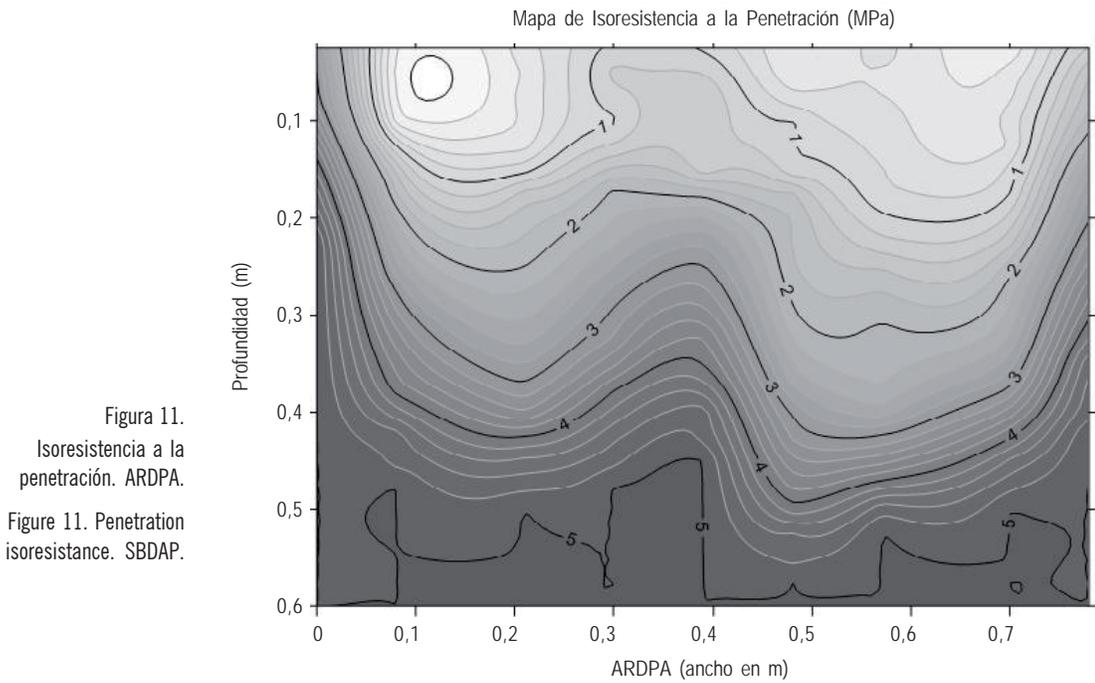


Figura 11. Isoresistencia a la penetración. ARDPA.
Figure 11. Penetration isoresistance. SBDAP.

El análisis de los resultados de RP para los distintos tratamientos y subtratamientos indicó la interacción entre los factores de variación, montantes, disposición, sectores de medición y profundidad, por lo cual se efectuaron las particiones correspondientes y se analizaron los efectos sobre la RP para cada uno de los factores a cada profundidad.

No obstante, en un análisis general, surge que la RP tuvo una marcada disminución para ambos montantes y para cada disposición a nivel de la reja (Fig. 14) por debajo de la PT, con respecto a la situación original. Los resultados encontrados resultan relevantes, puesto que situaciones similares han sido escasamente informadas y menos aún

discutidas. Los mismos son en parte coincidentes con lo encontrado por Hilbert & Pincu (2000) para montantes de diseño similar a AR ya que registran que la RP disminuyó por debajo de la PT, hasta aproximadamente 0,45 m cuando la profundidad media alcanzó aproximadamente 0,31 m. También se determinó en el mismo ensayo un efecto cuantificable hasta los 0,28 m, cuando la PT fue de 0,17 m. En la evaluación de los AR y AC de este ensayo, la PT varió entre valores mínimos de 0,23 m y máximos de 0,28 m para

los distintos diseños y disposiciones, por lo que los efectos también se habrían extendido aproximadamente entre 0,12 m y 0,17 m por debajo de la profundidad media. También resultan semejantes a los resultados obtenidos por Simoes *et al.* (2009) ya que la labor de los descompactadores a 0,38 m de profundidad se extendió hasta más de 0,5 m de profundidad, independientemente del diseño del órgano activo utilizado en la descompactación, en el primer año de ensayo, mientras que en el segundo los efectos en profun-

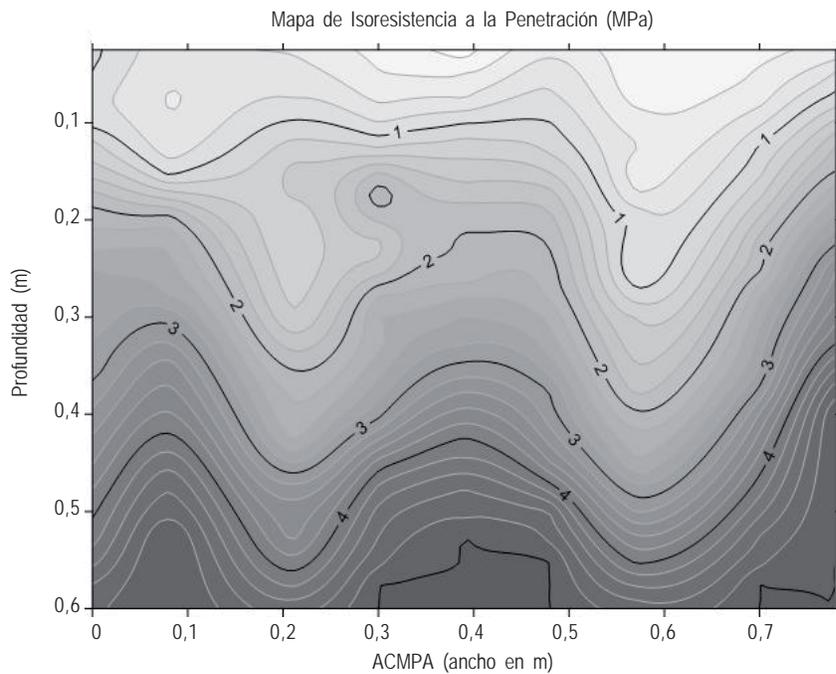


Figura 12.
Isoresistencia a
la penetración. ACMPA.

Figure 12.
Penetration
isoresistance. CBSAP

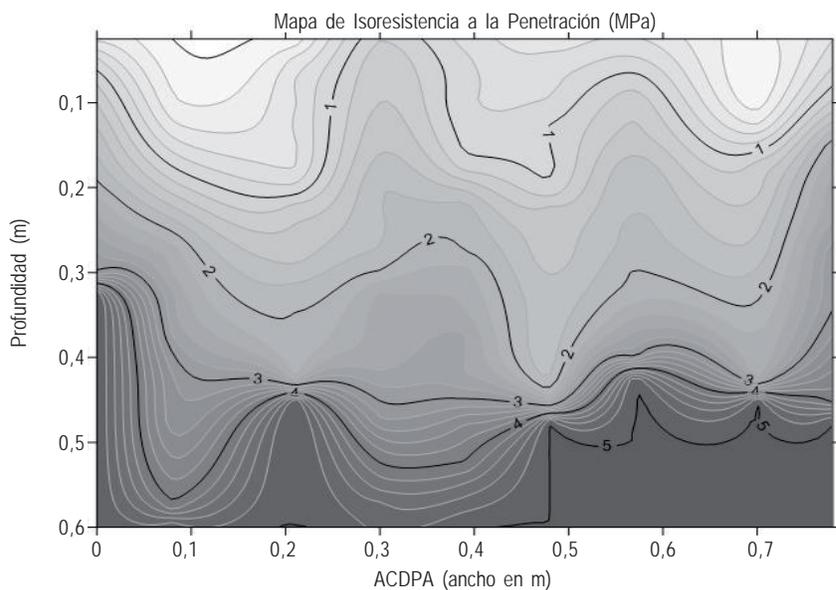


Figura 13.
Isoresistencia a
la penetración. ACDPA.

Figure 13.
Penetration isoresistance. CBDAP.

didad disminuyeron, pero siempre se detectó una reducción de la RP por debajo de la profundidad de la reja. Aspectos similares se interpretan en el trabajo de Elisei *et al.* (2012) donde la PT fue de 0,32 a 0,35 m y la incidencia en la RP llegó a los 0,4 m en el trabajo con montante AC. También Cholaky *et al.* (2009) a través de la técnica del Perfil Cultural muestran la existencia de aflojamiento del suelo por debajo de la PT. La roturación por debajo de la PT de las rejas también fue documentada por Colareda (2013). Tal como fuera hipotetizado por el mismo, estos efectos pueden atribuirse en parte a las características del filo de las rejas utilizadas. Habitualmente, el mismo es cementado sin rectificación (afilado) por piedra, lo que implica que una superficie roma es la que ataca, tensionando el suelo. En relación con ello, Fielke (1996) estableció la existencia de procesos de roturación y desplazamiento del suelo, por debajo de la PT de los órganos activos, cuando las rejas se encuentran desafiladas. Los procesos mencionados por este autor, relacionados a rejas gastadas o desafiladas se manifestaban solamente en los primeros 0,05 m por debajo de las mismas. En este caso, las rejas de los descompactadores no presentan filo y por el contrario poseen una superficie cementada, gruesa e irregular que podría haber incrementado dicho efecto. Además, podría sumarse a ello el estado de compactación del suelo al momento de realizar la labor que, al trabajar el subsolador sometiendo a la tensión una masa de suelo relativamente dura y uniforme en profundidad, habría favorecido no solamente la rotura en acuerdo con el modelo de fallas crecientes, sino también a que los efectos de tensión y posterior fractura del suelo se expandieran hacia adelante y hacia abajo, seguramente con un incremento importante del esfuerzo de tracción. Dicha situación también se visualiza claramente en el testigo bajo siembra directa del trabajo de Simoes *et al.* (2009).

El perfil roturado bajo el patrón de falla creciente, en acuerdo con lo establecido por Spoor & Fry (1983), es el frecuentemente desplazado a mano para la identificación del patrón de roturación (Spoor & Godwin, 1978) y surge de la acción de la cara superior angulada de los órganos activos sobre el suelo. Dicha metodología no permite evaluar los límites reales del aflojamiento, en los sectores por debajo de la máxima PT alcanzada por la reja y menos aún en los sectores intermedios entre las mismas. La evaluación aleatoria de la RP en parcelas descompactadas por escarificadores tampoco brinda una adecuada resolución de la problemática analizada, ya que terminan prome-

diándose valores correspondientes a sectores ubicados sobre la línea de acción de la reja y sectores distanciados de la misma e intermedios entre el trabajo de 2 órganos activos contiguos. Por ello, la realización de una transecta en forma sistemática es la única que facilita dicha evaluación y la determinación de hasta qué profundidad el suelo, aunque firme, modificó su estado mecánico y qué posibilidades de colonización radical se generaron.

En el sector correspondiente a las rejas se encontraron diferencias de RP entre los distintos montantes y disposiciones utilizados en diferentes PT, lo cual puede relacionarse a las características diseño y configuración de los mismos.

Tal como se dijo anteriormente la labor de descompactación tuvo efectos significativos con respecto al testigo en todas las profundidades hasta el estrato de 0,35 m a 0,4 m para ambos diseños de montante y disposiciones. Por debajo de dicha profundidad, también existieron diferencias con respecto al testigo hasta los 0,5 m, salvo en el ARDPA. Por lo tanto, al igual que lo ocurrido con AT, el subtratamiento de ARDPA fue el de mayor ineficiencia en la roturación en este aspecto.

A nivel superficial, todos los tratamientos y subtratamientos fueron capaces de reducir la RP a valores menores a 1 MPa hasta los 0,10 m y desde la superficie hasta los 0,20 m ARMPA fue significativamente menor a los demás. Por debajo de esa profundidad, hasta los 0,35 m ARMPA tuvo los menores valores, pero no alcanzó a diferenciarse de ACDPA, mientras que por debajo de los 0,35 m tuvo valores similares a ACMPA, sin diferenciarse en forma constante de ACDPA. En general, todas las labores redujeron la RP por debajo de 1,5 MPa hasta los 0,20 m y no superaron los 2 MPa (Threadgill, 1982) por encima de los 0,3 m, salvo el ARDPA.

Los menores valores de los tratamientos de AR en los primeros estratos del terreno pueden asociarse a las características de diseño del montante, con menor separación lateral entre el mismo y la posición de la reja, lo que hace a mayores efectos de interacción entre la lámina oblicua y la reja y posiblemente mayor grado de roturación en dicho sector. La ausencia de diferencias entre ARMPA y ACDPA entre los 0,25 y 0,30 m de profundidad puede en parte explicarse por la mayor superficie de trabajo de la reja del AC, que favorecería una mayor intensidad de roturación en el área circundante a la misma.

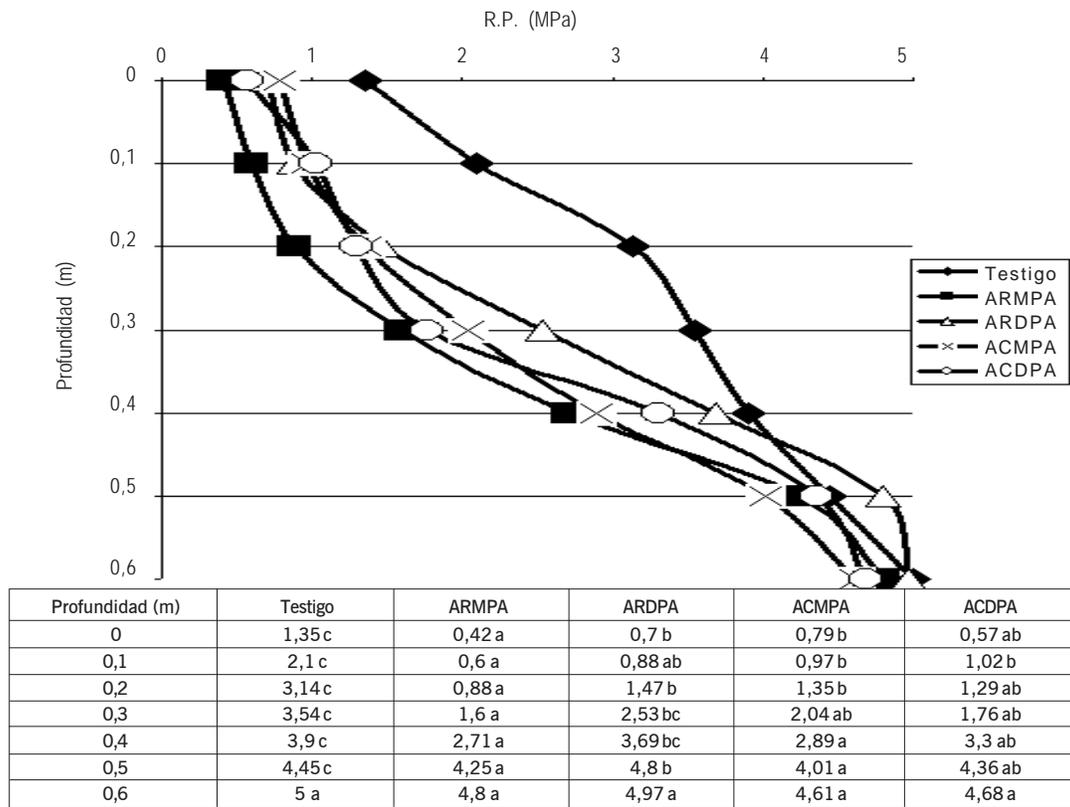


Figura 14. Perfiles y valores medios de RP para la posición Reja en los distintos tratamientos y subtratamientos. Letras diferentes entre filas indican diferencias significativas. ($P < 0,05$) LSD.

Figure 14. PR profiles and mean values for between points for different treatments and subtratamientos. Different letters in the same row indicate significant differences. ($P < 0,05$) LSD.

En la Figura 15 se observan los perfiles de RP para el sector medio entre las rejas.

En esta posición, promedio de los tres valores centrales de RP, se encontraron diferencias significativas en la totalidad de los tratamientos y subtratamientos con respecto al testigo hasta los 0,25 m, estrato en el cual el ARDPA tuvo valores similares al mismo y diferentes al resto de los tratamientos y subtratamientos. Por otra parte, ARDPA presentó los mayores valores, sin ser significativos, con respecto a las demás alternativas de diseño y configuraciones, desde la superficie y hasta los 0,55 m de profundidad.

Las configuraciones que lograron un mayor grado de roturación, valorado a través de la RP, fueron ARMPA y ACDPA, las cuales tuvieron valores significativamente menores desde 0,10 m a 0,30 m con respecto al resto de las configuraciones; así también, ARMPA se diferenció del ACMPA en los primeros 0,10 m. Entre las configuraciones

ARMPA y ACDPA se alcanzaron diferencias significativas, con menores valores para ACDPA entre los 0,35 m y los 0,45 m y en general sin mayores diferencias con ACMPA.

Los registros, a diferencia de lo acontecido en la posición reja, superan los valores de 1,5 MPa a partir de los 0,10 a 0,20 m y los 2 MPa a partir de 0,20 a 0,3 m. Por debajo de dicha profundidad, si bien pueden detectarse diferencias entre las distintas configuraciones, los valores resultan en su totalidad restrictivos del crecimiento radical.

En una evaluación general, ARDPA fue la de menor eficiencia de roturación. La condición mecánica del suelo lograda es suficiente en el sector cercano al trabajo de las rejas y el montante, pero insuficiente para el adecuado desarrollo radical en el sector intermedio entre las rejas, desde estratos relativamente superficiales. En el otro extremo, las configuraciones ARMPA y ACDPA fueron las que alcanzaron una mayor eficiencia de roturación, con esca-

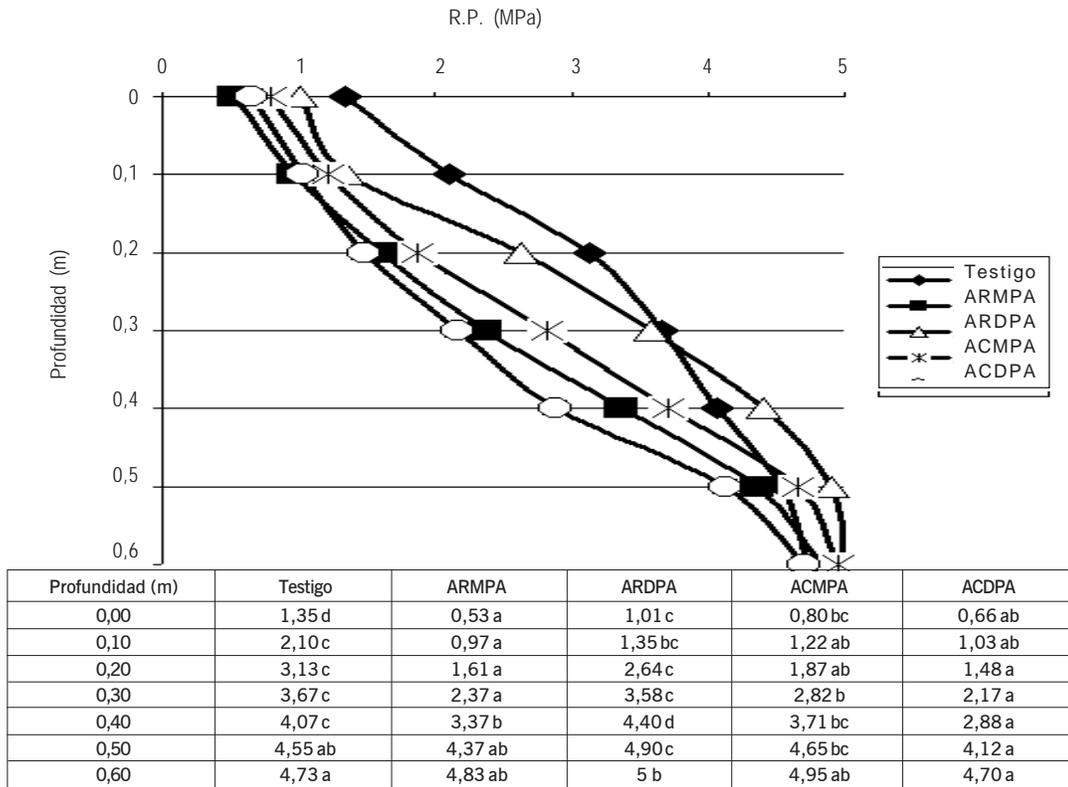


Figura 15. Perfiles y valores medios de RP para la posición entre rejas para los distintos tratamientos y subtratamientos. Letras diferentes entre las filas indican diferencias significativas. (P<0,05) LSD.

Figure 15. PR profiles and mean values for between points section for different treatments and subtratamientos. Different letters in the same row indicate significant differences. (P<0.05) LSD.

sas diferencias entre sí, con mejor prestación para los ARMPA en el área cercana a la reja y mayor roturación, menores valores de RP, para ACDPA en profundidad en el sector central trabajado entre las rejas. No obstante, el aflojamiento del suelo por el mismo no fue lo suficiente como para disminuir la capacidad portante del suelo como para favorecer procesos de recompactación a nivel subsuperficial por tránsito fundamentalmente, en acuerdo con los recaudos manifestados por Spoor *et al.* (2003) y Spoor (2006). En la Figura 10 y Figura 11 pueden observarse los perfiles de isoresistencia a la penetración de los AR en MPA y DPA, que incluyen la totalidad de las posiciones de la transecta.

Es interesante destacar, que por debajo y hacia el sector externo de la línea del montante (entre 0 a 0,1 m y entre 0,7 y 0,8 m sobre el eje de las abscisas) se detectan sectores en los cuales existe un incremento de los valores de RP con

respecto a la situación original. Esto puede interpretarse en función de que la parte externa del montante que no realiza trabajo sobre el suelo, es la que soporta las fuerzas laterales que se generan en los órganos activos asimétricos y el suelo, es el medio que les brinda el soporte y compensa a las mismas.

En la Figura 12 y Figura 13 se muestran los gráficos de isoresistencia a la penetración para los AC. Las características de diseño de los AC, parecieran limitar los efectos de incremento de RP hacia los laterales como consecuencia del radio de curvatura de los sectores cercanos a la reja. Asimismo, en ACDPA, se visualiza la escasa diferencia en la roturación de los sectores cercanos a la reja y los sectores centrales, brindando una labor más homogénea en el total del perfil trabajado.

La RP es una variable de la que se deduce cuál fue el efecto del apero sobre el suelo, en lo concerniente al grado de

roturación. A su vez la roturación del suelo indica el estado de las unidades estructurales, es decir, a mayor roturación, las unidades estructurales se encuentran más desagregadas. Entonces valores bajos de RP indicarían alto grado de roturación, condiciones muy favorables para la germinación de semillas y para el crecimiento y desarrollo del sistema radicular, pero desfavorables, para el tránsito de la maquinaria agrícola, con altos riesgos de recompacción debido a la pérdida de la capacidad portante del sustrato. En ocasiones, se entiende que una buena labor de descompactación es la de roturar intensamente el suelo o desagregarlo en la mayor medida posible, sin tener en cuenta las consecuencias que posee esta condición para el tránsito agrícola posterior y los procesos de recompacción. Spoor *et al.* (2003) proponen la fisuración sin aflojamiento como forma de trabajo con escarificadores para tratar de minimizar los riesgos planteados anteriormente.

CONCLUSIONES

- La roturación del suelo por los AC y AR posee una fuerte simetría lateral con respecto a la posición de la reja, similar a la que caracteriza a los implementos de montantes rectos.
- El AT es principalmente una función exponencial de la PT, independientemente de las características particulares del diseño del montante y de la reja.
- Los implementos de montantes rígidos causan aflojamiento de suelo por debajo de la PT de la reja, independientemente de su diseño y disposición.
- Tanto el diseño del montante como la configuración espacial de los montantes inciden sobre las características de roturación del suelo en los sectores correspondientes a la reja e intermedios entre las mismas, correspondiendo a ARMPA y ACDPA la mayor eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- ASAE. 1992. S 313.2: Soil cone penetrometer. *In: American Society of Agricultural Engineers (ed)*. ASAE Standards. St. Joseph, MI, p.611.
- Balbuena, R; J Ressia; J Claverie; M Cristiani; A Terminiello; G Mendivil & T Palancar. 2003. Descompactadores de montantes curvos. Efecto de la configuración espacial sobre la energía de la labor. VII Congreso Argentino de Ingeniería Rural, Balcarce, 2003, 6 pp.
- Casagrande, J; A Quiroga; I Frasier & JC Colazo. 2009. Aspectos de la evaluación y el manejo de suelos afectados por compactación en San Luis. *En: A Quiroga; J Casagrande & JC Colazo (eds)*, Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en el este de San Luis. Información Técnica 173, INTA San Luis, pp. 15-21.
- Cholaky, C; M Caciavillani & E Bricchi. 2009. Persistencia del efecto de descompactadores en suelos con historia de siembra directa. Experiencia en Haplustoles/udoles del sur de Córdoba. Tercer Taller de Física de Suelos, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, 3 y 4 de diciembre 2009, 8 pp.
- Claverie, JA & RH Balbuena. 2005. Descompactación por tratamiento mecánico. *En: Reología del suelo agrícola bajo tráfico*. Editor científico Daniel Jorajuría Collazo. Ed: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. La Plata, pp. 143-157.
- Colareda, GO. 2013. Persistencia de la descompactación en sistema de Siembra Directa. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina. 42 pp.
- Dexter, AR. 1987. Mechanics of root growth. *Plant and Soil* 98(3): 303-312.
- Domínguez, J; J Ressia; D Jorajuría; R Balbuena & G Mendivil. 2000. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. *En: Avances en Ingeniería Agrícola*. Editorial de la Facultad de Agronomía, pp. 110-115.
- Elisei, JH. 2013. Efecto del uso de diferentes escarificadores sobre las propiedades físicas de suelo y de cultivo en la secuencia maíz (*Zea mays*L.)-soja (*Glycine max*L. Merr.). M. Sc. Tesis. Facultad de Ciencias Agrarias UN Rosario, Rosario, Argentina. 89 pp.
- Elisei, J; B Bonel; C Iruirtia; N Gonzalez; C Senigagliesi & R Mon. 2012. Efectos de diferentes escarificadores en propiedades físicas de suelo y enraizamiento del cultivo de maíz. Istro paper número 299. 19th Istro Conference. IV SUCS meeting. Striving for Sustainable High Productivity, 24 al 28 de septiembre, 2012, Montevideo, Uruguay, 7 pp.
- Fielke, JM. 1996. Interactions of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil. *J. agric. Engng Res.* 63: 61-72.
- Godwin, RJ; G Spoor & MS Soomro. 1984. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. *J. Agric. Engng. Res.* 30: 47-56.
- Hilbert, JA & M Pincu. 2000. Demanda energética de subsoladores Paratill. VI Congreso Argentino de Ingeniería Rural, II Congreso Americano de Educación en Ingeniería Agrícola. Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. Universidad de la Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Argentina.
- INTA. 2011. Actualización Técnica N° 58 - Febrero 2011. Disponible en: http://www.inta.gob.ar/documentos/siembradirecta/at_multi_download/file/Siembra%20Directa%202011.pdf. Último acceso: Marzo 2016.
- Jorajuría, D. 2005. Compactación del suelo agrícola por tráfico vehicular. Una revisión. *En: Reología del suelo bajo tráfico*. Editor científico Daniel Jorajuría Collazo. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires. Argentina, pp. 39-55.
- Karlen, DL; WJ Busscher; SA Hale; RB Dodd; EE Strickland & TH Garner, 1991. Drought condition energy requirement and subsoiling effectiveness for selected deep tillage implements. *Trans. ASAE* 34(5): 1967-1972.
- Koostra, BK & TS Stombaugh. 2003. Development and Evaluation of a Sensor to Continuously Measure Air Permeability of Soil. 2003 ASAE Annual International Meeting, pp. 1-9.

- Raper, RL. 2005. Force Requirements and Soil Disruption of Straight and Bentleg Subsoilers for Conservation Tillage Systems. 2002 ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress, pp 1-16.
- Raper, RL & J Mac Kirby. 2006. Soil compaction: how to do it, undo it, or avoid doing it. 2006 Agricultural Equipment Technology Conference Louisville, Kentucky, USA, pp 1-14.
- Simoes, RP; RL Raper; FJ Arriaga; KS Balkcom & JN Shaw. 2009. Using conservation systems to alleviate soil compaction in a Southeastern United States ultisol. *Soil and Tillage Research* 104(1): 106-114.
- Soil Taxonomy. 1999. Agriculture Handbook. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. 871 p. Washington, DC 20402. Disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf. Último acceso: Marzo 2016.
- Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage.* 22: 113-122.
- Spoor, G & RK Fry. 1983. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. *J. Agric. Engng. Res.* 28: 217-234.
- Spoor, G & RJ Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. Agric. Engng. Res.* 23(3): 243-258.
- Spoor, G.; FG J Tinjink & P Weisskopf. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage Research* 73: 175-182.
- Stafford, JV. 1979. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and Speedy. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 24: 41-56.
- Threadgill, ED. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE* 25(4): 859.
- Vallejos, A; C Zajac; J Silenzi & N Echeverría. 2010. Descompactación de un suelo y demanda energética de un arado paratill a tres profundidades y dos ancho de labor. *Agro-Ciencia* 26(2): 99-108.
- Willat ST & AH Willis. 1965. A study of the through formed by the passage of tines through soil. *Journal of Agricultural Engineering Research* 10: 1-4.

