

DESCOMPACTACIÓN MECÁNICA DEL SUELO

Roberto H. Balbuena y Jorge A. Claverie

Si bien los suelos en producción bajo sistemas de no labranza frecuentemente ofrecen una mayor capacidad portante y, en consecuencia, una mayor resistencia a la deformación y a la compactación por el tránsito de vehículos, 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.

En este marco, los procesos de autoestructuración del perfil tales como ciclos de humectación- desecación, congelamiento- descongelamiento, actividad biológica, generación de poros por acción de las raíces, la estrategia de rotación de cultivos, la planificación de las labores mecanizadas y el uso de descompactadores, se presentan como los factores atenuantes de los efectos de los procesos de compactación.

Las características inherentes a la labor de descompactación han determinado que prácticamente la totalidad de los implementos estén equipados con arcos rígidos, a diferencia de los de arcos flexibles que alcanzaron una gran difusión desde mediados de la década del 70. Maroni (1990), analizó la evolución en el mercado de los equipos de labranza vertical sobre los implementos de labranza convencional. Tomando como base 100 las ventas de arados de reja y vertedera, encontró que el porcentaje para los equipos de labranza vertical evolucionó del 13% en 1976 al 59% en 1983, 125% en 1986 y 180% en 1989. Las limitaciones encontradas para el laboreo en diferentes tipos y estados del terreno determinaron la introducción y desarrollo de distintos órganos activos que, colocados sobre un mismo arco, permitieran incrementar la oportunidad de labor. Pese a ello, muchos de los mismos no resultaron mayormente difundidos y adaptados debido a la inadecuada caracterización y determinación de su prestación. (Balbuena, *et al.*, 1992 a).

Bajo el nombre de descompactadores pueden incluirse una serie de implementos que efectúan una labor de escarificado del suelo, entendiendo como tal el trabajo con máquinas que, si bien realizan principalmente una remoción vertical, producen importantes efectos laterales de roturación en relación al ancho del órgano activo. Principalmente pueden caracterizarse por una baja translocación de los estratos del suelo, una cobertura de residuos vegetales posterior a su pasaje variable de acuerdo al diseño, configuración y operación del implemento, su versatilidad y facilidad de operación en comparación con otros implementos de labranza.

La característica común a estos implementos es la presencia de arcos o montantes rígidos, a diferencia de los escarificadores o arados de cinceles, de amplia difusión entre las décadas de los 80 y 90, equipados con arcos flexibles.

Los equipos destinados a la descompactación de suelos pueden clasificarse en implementos con montantes rectos e implementos con montantes inclinados.

Los primeros reciben la denominación de cinceles de arcos rígidos, escarificadores, subsoladores. Aquellos de montantes inclinados se conocen generalmente por la marca o nombre comercial de mayor difusión. Por ejemplo, los de montantes inclinados de lámina recta se denominan vulgarmente

paraplow y paratill, mientras que los de lámina curva se los reconoce como cultivie, ecoltier, siendo todas ellos marcas registradas.

Los escarificadores, flexibles o rígidos son máquinas agrícolas de sencilla construcción y operación. Sus órganos activos son de formas simples que habitualmente presentan simetría lateral o, en caso contrario, se disponen de forma tal que el conjunto de órganos activos presentan simetría en su configuración, lo que implica que no se generen componentes laterales sobre el implemento que dificulten el desplazamiento rectilíneo del mismo. Estos aspectos resultan en una facilidad de regulación y trabajo que es reconocida a nivel técnico y productivo. Pese a ello, los principios de trabajo y roturación del suelo de los escarificadores que deben usarse en procesos de descompactación de suelos no son habitualmente conocidos o comprendidos. Esto conlleva no solamente la posibilidad de realizar un trabajo ineficiente desde el punto de vista energético, sino también que la labor no genere los efectos agronómicos buscados. En el presente capítulo serán abordados los principales aspectos concernientes a las características del trabajo con descompactadores.

Patrón de roturación:

En relación a los patrones de roturación del suelo, Spoor & Godwin, (1978), empleando diferentes modelos de órganos activos y dos profundidades de trabajo, hallaron que a la menor profundidad el patrón de roturación del suelo era similar para todos los modelos, pero diferían a la mayor profundidad .

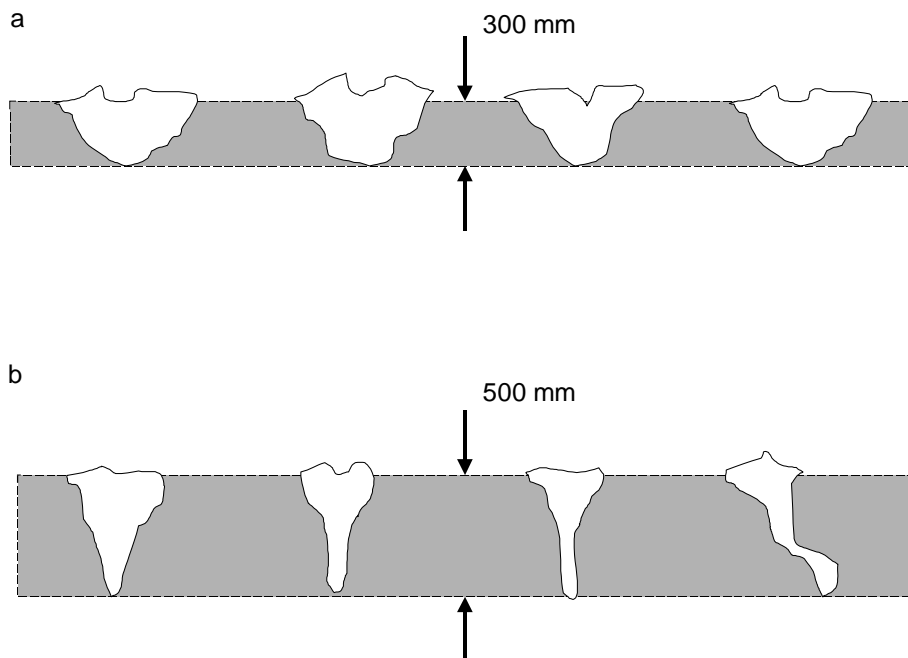


Figura 1: Patrones de roturación de diferentes órganos activos, trabajando a dos profundidades de trabajo: a) 300 mm; b) 500 mm. (Adaptado de Spoor y Godwin, 1978).

Dicha forma de fracturamiento se encontraba con frecuencia para un

amplio rango de texturas, contenidos de humedad y densidades. A niveles superficiales, el suelo era desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo un patrón de roturación denominado fracturamiento o falla creciente, rompiéndose a lo largo de planos bien definidos que se propagaban desde el extremo de la reja hacia la superficie con una angulación aproximada a los 45° con respecto a la horizontal.

El modelo de ruptura continuaba con el incremento de la profundidad, hasta que a un determinado nivel, denominado profundidad crítica, el suelo comenzaba a deslizarse solamente hacia adelante y los lados (fracturamiento lateral), generando compactación en profundidad, la cual dependía de la geometría de la reja.

Sus observaciones a campo dieron por resultado que la profundidad crítica para órganos activos de 65 mm de ancho se producía en un rango de entre 300 y 400 mm, es decir, a relaciones profundidad/ancho de 5 a 7, alcanzando niveles más superficiales en la medida que el suelo se torna más plástico o los horizontes superficiales más secos.

Concluyeron caracterizando a la profundidad crítica como aquella a la cual se produce compactación más que una efectiva remoción del suelo, dependiendo de las características geométricas de la reja, de la humedad y densidad del suelo. Destacaron que debido a las variables implicadas y las variaciones en el suelo resultaba impracticable establecer su predicción con exactitud.

Godwin & Spoor (1977) puntualizaron que para lograr una roturación efectiva del suelo se debe producir fracturamiento creciente y, por lo tanto, la profundidad crítica tenía influencia sobre la máxima profundidad a la que podría ser empleada una determinada reja. Dicho fracturamiento ocurría cuando la resistencia al corte en sentido vertical era menor que la lateral, igualándose ambas a la profundidad crítica.

Spoor & Fry (1983) encontraron que la naturaleza del tipo de fracturamiento depende principalmente del grado de compresibilidad del suelo y de la magnitud de sus tensiones internas. Resultados obtenidos a partir de ensayos en canales edafométricos mostraron una generación regular de planos curvos de fracturamiento que se extienden desde la base de la reja hacia la superficie del suelo. El alcance hacia adelante de esos planos disminuía con el aumento de la profundidad de trabajo, hasta aproximarse, en el límite, a que el suelo se comprimiera sobre la cara del órgano activo. Señalaron, además, que cuanto mayor es la profundidad de trabajo y más compresible es el suelo, mayor es el esfuerzo requerido para lograr un fracturamiento completo.

Sobre la misma temática, Mouazen & Neményi (1999), detectaron que por delante del arco se producía una elevación del suelo en forma de cuña. Por encima de la reja el suelo se desplazaba hacia arriba, hacia adelante y en forma lateral, iniciándose la elevación a partir del extremo de la reja, determinando un incremento de volumen de la totalidad del suelo por delante del escarificador. En virtud de los resultados observados, el arco tendría un rol importante en el efecto final de la herramienta sobre el suelo.

Lo expuesto, indica que existe una clara dependencia entre los factores enumerados: ancho del órgano activo, profundidad de trabajo, estado del suelo. Resultados de investigaciones previas permitían inferir algunos de estos aspectos, pese a que no se había logrado, a partir de los resultados de los mismos, explicar los procesos. Payne & Tanner (1959), realizaron importantes avances en la incidencia del ancho de la herramienta sobre aspectos de diseño y

energía requerida para la labor. Sus evaluaciones efectuadas sobre la incidencia del ancho del órgano activo sobre los efectos laterales de roturación del suelo, establecieron que a partir de 50,8 mm los mismos permanecen constantes, en el rango de profundidades ensayadas, incrementándose el frente de labor únicamente en función del aumento de la superficie de la reja. Además, menores anchos de la reja generaban menores efectos laterales, es decir menor área roturada en el plano transversal al desplazamiento del implemento. A su vez, Willat & Willis (1965) modelizaron el área trabajada por escarificadores de arcos flexibles a partir de los datos relevados en ensayos en campo, estableciendo que los planos de roturación del suelo alcanzaban un ángulo de 45°, en la medida que la profundidad de trabajo no sobrepasaba una profundidad de 150 mm a partir de la cual el coeficiente de ajuste entre los valores medidos y los obtenidos a partir del modelo se alejaba significativamente de la unidad.

Las relaciones establecidas por los distintos autores determinan que la simple decisión de realizar un trabajo de escarificación y más aún de descompactación obliga a realizar un proceso de análisis, que pocas veces se efectúa a nivel de producción, que requiere al menos contestar los siguientes cuestionamientos:

- 1) ¿El estado del suelo es el adecuado para efectuar un trabajo de roturación en profundidad?
- 2) ¿Las características de diseño del órgano activo y del montante que lo soporta permitirán realizar un trabajo de roturación efectiva del suelo (bajo el patrón de fallas crecientes), garantizando el fracturamiento de las capas compactadas?

La primera pregunta implica que se debe valorar el estado del suelo a través de una mínima calicata y observar la condición del suelo por debajo de la capa compactada que se quiere roturar. En acuerdo con los resultados experimentales, el suelo debe estar seco o poco húmedo en profundidad, de forma tal que las fallas crecientes abarque una porción importante de la zona compactada, sin generar problemas por superar la profundidad crítica y provocar compactación en profundidad por desplazamiento lateral del suelo.

La segunda cuestión debe tenerse en cuenta al momento de seleccionar, comprar el implemento o contratar su uso. Sin embargo, las alternativas de anchos de la reja en los escarificadores están bastante acotadas entre los 50 y 100 mm entre los distintos descompactadores y generalmente entre 50 y 80 mm. Los mayores anchos permitirán a las rejas de diseño convencional trabajos más profundos sin modificar el patrón de roturación pero incrementarán los esfuerzos de tracción en forma importante, limitando las posibilidades de conformación armónica de conjuntos tractor-apero.

Influencia del ángulo de ataque:

Payne & Tanner (1959), trabajando con una amplia gama de ángulos de ataque (definiendo como tal al formado por la inclinación de la reja con respecto a la horizontal en la dirección de avance), encontraron que con valores de hasta 45° el suelo provee una componente vertical que contribuye a la penetración de los órganos activos, cuyo sentido se invierte para mayores angulaciones. Asimismo, detectaron significativas variaciones en la eficiencia, medida en función del esfuerzo traccional por unidad de área de suelo removida, la cual resultó ser 8 veces mayor para ángulos de 20° con respecto a 160°. En cuanto al esfuerzo de

tracción, este se mantenía relativamente constante para ángulos de entre 20° y 50°, incrementándose significativamente para mayores angulaciones.

Spoor & Godwin (1978) puntualizan que a profundidad constante, el suelo se fractura hacia arriba con escasa compactación (bajo el modelo de falla creciente), con ángulos de 25°, produciéndose compactación con valores de 70°. Si bien los principios de roturación del suelo para implementos de montantes flexibles y rígidos son los mismos, estos últimos, al no experimentar variaciones en el ángulo de ataque, resultan energéticamente más eficientes. Debido a los menores valores de resistencia específica obtenidos, según Claverie *et al.*, (1995), quienes encuentran además que los rangos de variación en la resistencia específica para los arcos flexibles resultan de mayor magnitud que para los arcos rígidos. Ensayos de tracción de arcos flexibles realizados por Claverie (1997) permitieron determinar que cuando la tracción ejercida sobre un arco flexible igualaba a los valores medios medidos en ensayos de campo, los ángulos de ataque inicialmente de 45° alcanzaban valores de 60° a 65°, los cuales se encontraban por encima de los citados por Payne & Tanner (1959) como determinantes de la mayor eficiencia energética y muy próximos a los mencionados por Spoor & Godwin (1978) como limitantes del patrón de roturación en fallas crecientes. En relación a los esfuerzos de tracción, a profundidad constante, resultaron significativamente menores para los arcos rígidos, con valores de 3600 N, comparativamente a los arcos flexibles, que alcanzaron 4200 N

Abreu de Figueiredo & Magalhaes (1993) evaluando combinaciones de arcos rígidos y flexibles con diferentes ángulos de ataque y profundidades de labor determinaron una mayor área removida para los arcos rígidos con reja con 45° de ángulo de ataque con respecto al arco flexible con 20° de ángulo de ataque, mientras que arcos rígidos con 65° de ángulo de ataque alcanzaron una remoción intermedia entre los anteriores. Los aperos con arcos rígidos permitirían en parte alcanzar una labor más eficiente a partir de una adecuada selección de su diseño

Resultados similares fueron reportados por Ayala *et al.*, (1996), quienes registran una disminución del 27% en el coeficiente de labranza de arcos rígidos respecto de arcos flexibles.

Balbuena *et al.*, (1997) en ensayos con escarificadores de arcos rígidos con interacción, realizados en dos suelos Argiudoles de la región Pampeana, evaluaron los efectos de diferentes ángulos de ataque de la reja sobre los parámetros de prestación energética. La resistencia específica al laboreo resultó siempre mayor para el ángulo de 45°, con respecto a los de 38° y 32°, alcanzando diferencias significativas con respecto al menor ángulo en cada uno de los ensayos realizados. Por otra parte, el área trabajada resultó también significativamente mayor para el menor ángulo ensayado en los diferentes suelos (32° y 38). Estos resultados son básicamente coincidentes con los alcanzados por Payne & Tanner (1959). El plano de roturación lateral no mostró diferencias a nivel estadístico pese a que se mantuvo una tendencia similar, correspondiendo la menor angulación del plano de falla al mayor ángulo de ataque de la reja. Al realizar cálculos del área roturada por los distintos tratamientos en función de la profundidad de trabajo, se alcanza una adecuada correlación entre las áreas medidas y calculadas (suponiendo un ángulo de fracturamiento teórico de 45°) para los tratamientos de 32° y 38°. Para el ángulo de 45° en cambio el área de suelo movilizada resultó un 22,26% menor.

Esto indicaría la existencia de una modificación en la forma de roturación del suelo que produciría el incremento manifestado en los cálculos de resistencia específica al laboreo, asociada al predominio de las fallas crecientes por sobre las fallas horizontales para la menor angulación y , al menos, una reducción de las mismas en profundidad, pese a que la misma no superó en promedio los 220 mm, por debajo de los límites mencionados de 5 a 7 veces el ancho de labor del implemento utilizado (50 mm) para superar la profundidad crítica. El incremento de la resistencia específica podría en parte deberse también, tal como lo expresa Mckyes (1989), al aumento de la roturación del suelo dentro de la zona trabajada (frente de labor) por el órgano activo para el mayor ángulo de ataque.

Tal como se desprende del análisis de los resultados de los distintos trabajos de investigación, el trabajo con arcos flexibles no resultaría adecuado para la realización de trabajos de descompactación. El ángulo de ataque de la reja es un factor determinante, tanto de la capacidad de penetración del implemento, como en los aspectos relacionados a la energía requerida para la labor, incidiendo además sobre la profundidad crítica y el grado de roturación. En condiciones en las cuales el esfuerzo de tracción es elevado, como en todo proceso de descompactación profunda del suelo, los arcos o montantes flexibles se deformarán, incrementando el ángulo de ataque de la reja, aumentando los esfuerzos de tracción, hasta el momento en que la pérdida de la capacidad de penetración por disminución de las componentes en el plano vertical determina reducciones en la profundidad de labor y el esfuerzo de tracción. El proceso, de esta forma, se transforma en cíclico, ocasionando no solamente ineficiencia energética sino irregularidad y en el trabajo del suelo y los efectos de roturación alcanzados.

Los descompactadores de arcos rígidos presentan habitualmente posibilidades de modificación o selección del ángulo de ataque, quedando a criterio de los usuarios, la responsabilidad de la selección. La variación de la posición se alcanza en muchos diseños a través de la ubicación del montante sobre la pieza que lo une al bastidor, en forma discontinua, por el perno que cumple las funciones de fusible de seguridad ante incrementos importantes del esfuerzo de tracción. Los ángulos de ataque de la reja se encuentran en el orden de 30° a 50°. Se podrá, en acuerdo con la decisión tomada trabajar con los menores ángulos, produciendo mayores efectos laterales y hacia delante, con bajos esfuerzos de tracción, con menor resistencia específica y roturación en agregados de mayor tamaño. En contraposición, los mayores ángulos de ataque provocarán efectos contrarios a los enunciados. Cabría preguntarse, cuales serían los beneficios efectivos de la mayor roturación del terreno, es decir, de alcanzar un tamaño de agregados menor en una labor de descompactación, tanto en condiciones de sistemas de labranza convencional como de siembra directa. Al respecto, deben relacionarse no solamente los aspectos energéticos sino también las consecuencias que dicha decisión tiene sobre la persistencia de los efectos de la descompactación, sobre las propiedades físicas del suelo, tal como será analizado posteriormente. No obstante ello, es importante que exista sobre el implemento la posibilidad de variar el ángulo de ataque de los órganos activos, ya que dicha regulación permitirá contar con una máquina más versátil. La versatilidad en las máquinas agrícolas es uno de los aspectos de mayor relevancia, al poder con una misma estructura básica cumplir con diferentes objetivos de labor y adecuar los requerimientos energéticos dentro de rangos

relativamente estrechos para cada tipo de reja y conformación de conjunto

Proceso de interacción:

Los escarificadores, cualquiera sea su diseño constructivo básico y objetivos de labranza que alcanzan los mismos, se diferencian de las otras máquinas usadas para labranza en los procesos de interacción desarrollados entre los órganos activos. Estos procesos, por lo tanto, también ocurren en los descompactadores del tipo de montantes rígidos, rectos o angulados. Esta característica diferencial surge de la forma de roturación, es decir de los patrones de trabajo de los distintos órganos activos, principalmente a partir de los efectos producidos bajo el sistema de fallas crecientes. Una manera de definir en forma sencilla el concepto es identificar el predominio de los efectos laterales al órgano activo en relación al área de suelo directamente en contacto con la reja del apero. De su comprensión dependerá la correcta selección y preparación del implemento para la realización de la labor, como así también la eficiencia de roturación de la capa compactada y la energía requerida para la realización de la labor

Con referencia al trabajo desarrollado por órganos activos adyacentes, Willat & Willis (1965) mencionaron que cuando dos de ellos operan con un determinado distanciamiento entre sus rectas de acción, los perfiles de roturación que producen pueden superponerse, existiendo dos condiciones limitantes: cuando el distanciamiento es lo suficientemente reducido como para producir un perfil de trabajo plano en profundidad, y, por otra parte, cuando el mismo alcanza una magnitud tal que se forman perfiles de trabajo independientes, designando con el nombre de interacción a la situación intermedia de superposición de los perfiles trabajados. Un distanciamiento de 305 mm (12 pulgadas) podía provocar un camellón sin disturbar entre órganos adyacentes de una altura igual a tres cuartas partes de la profundidad de labor, tornando imprescindible realizar un segundo pasaje para lograr una adecuada roturación y mencionando como adecuado un distanciamiento de 228.6 mm (9 pulgadas), que si bien podría provocar un incremento en el esfuerzo traccional, debido a la necesidad de mayor cantidad de órganos activos para un determinado ancho de trabajo, eliminaría la necesidad de una segunda labor.

De las situaciones descritas existen dos que se verifican en la mayoría de los escarificadores: En los planos de acción delanteros de los mismos, la distancia entre órganos activos adyacentes en un mismo plano implica que el trabajo lo realicen sin interacción, en forma aislada o individual. En los planos de acción posteriores, los órganos activos trabajarán el suelo entre las líneas de acción de las rejas delanteras, con interacción, o sea con superposición entre los perfiles trabajados por las rejas traseras con las líneas adyacentes delanteras

Sobre la misma temática, Soomro *et al.*, (1982), señalaron que cuando dos órganos activos trabajan a una determinada distancia, la interferencia de uno sobre los límites de trabajo del otro provoca un considerable cambio en los requerimientos energéticos de ambos y tiene influencia sobre la disturbación de suelo resultante.

Determinaron, además, que dos rejas operando con interacción a la misma profundidad producen una mayor disturbación del suelo que trabajando en forma aislada, con una reducción del esfuerzo de tracción.

De acuerdo a estos autores, el esfuerzo de dos rejas interdependientes es función de la distancia entre ellas y la profundidad de trabajo. El mínimo esfuerzo se encuentra cuando la distancia es igual a 0.34 veces la profundidad, siendo el esfuerzo un 10% mayor que para una única reja. El esfuerzo se torna máximo para distancias de 0.043 veces la profundidad (extremadamente cercanas), y para distanciamientos equivalentes a 2.5 veces la profundidad, cuando trabajan independientemente. Concluyeron que las rejas interactuando con un espaciamiento de 1 a 1.5 veces la profundidad de trabajo producen una gran remoción de suelo con un menor esfuerzo con respecto a rejas sin interacción.

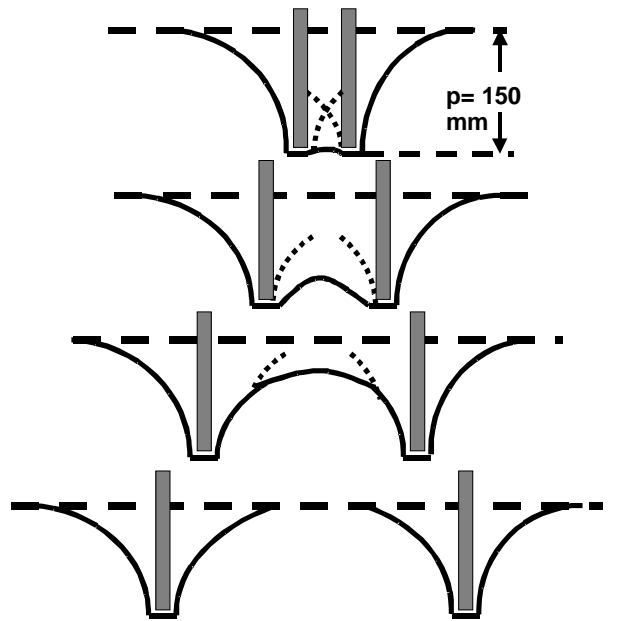


Figura 2: Proceso de interacción, a profundidad constante, para diferentes distanciamientos entre órganos activos. (Adaptado de Soomro et al., 1982).

Ensayos llevados a cabo por Godwin *et al.*, (1984) arrojaron como resultado valores mínimos de resistencia específica y uniformidad en el laboreo con espaciamientos entre órganos activos del orden de $1.4 \pm 25\%$ veces la profundidad de trabajo

Si bien los límites de distanciamiento, entre líneas de acción de las rejas, encontrados por estos autores, entre 1,05 y 1,75 parecen amplios, los valores medios de 1,4 a 1,5 veces la profundidad de labor son altamente consistentes, en acuerdo con resultados obtenidos en numerosos ensayos experimentales realizados en canales edafométricos y en campo. En este sentido, Benez *et al.*, (1991), en trabajos con subsoladores, informaron que las relaciones distanciamiento entre arcos/profundidad de trabajo y profundidad de trabajo/ancho de reja con mejor desempeño en cuanto a ancho de labor y área de suelo removida se hallaban en valores de 1.5 y 6.35, respectivamente.

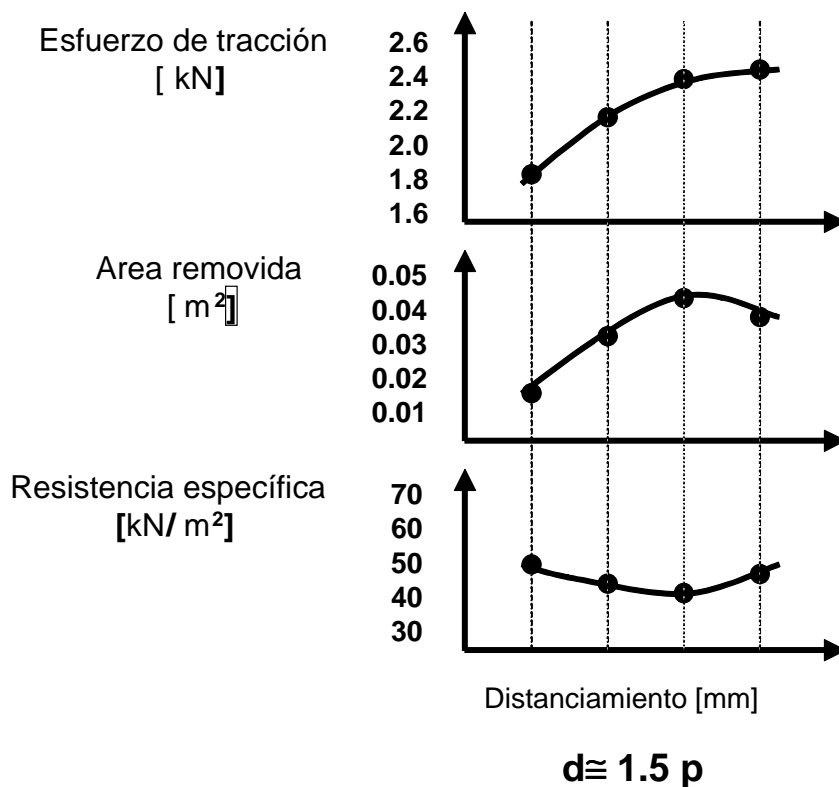


Figura 3: Relación entre esfuerzo de tracción y área removida en función del distanciamiento entre órganos activos. (Adaptado de Godwin et al., 1984).

La calificación de las labranzas ha sido un aspecto problemático que hasta el presente no ha tenido resolución. Resulta difícil acordar sobre una problemática que conlleva tantas calificaciones y opiniones como objetivos diferentes se busquen a través de las mismas. Sin embargo, en algunos aspectos parciales vinculados a la prestación tractiva de distintos diseños de implementos agrícolas, ha existido un amplio consenso entre los distintos grupos de investigación en Ingeniería Rural. Chisholm *et al.*, (1970) definieron a un sistema de labranza eficiente como aquél que minimiza la energía requerida para el laboreo, cuantificada a través de la resistencia específica. Es decir, un sistema de labranza o una máquina en particular será tanto más eficiente cuanto menor sea el esfuerzo de tracción requerido para trabajar cada unidad de área de suelo. Prácticamente la totalidad de los investigadores que desarrollan trabajos experimentales con distintos diseños de máquinas agrícolas, incluyen determinaciones de esfuerzo de tracción (componente en el plano horizontal del esfuerzo traccional total del apero), por medio de dinamómetros de tracción, área de suelo removida (frente de labor, perpendicular a la dirección de avance del implemento de labranza), obteniendo la resistencia específica como cociente de ambos valores. Si bien en aperos como los arados de reja y vertedera la determinación del área es sencilla, en el caso de los escarificadores resulta de mayor complejidad: Los planos de fractura son irregulares, la labor no es homogénea en profundidad y la zona de interacción, forma y altura del lomo entre

2 líneas de trabajo contiguas dependerá de las relaciones profundidad/ ancho de la reja, distancia entre los órganos activos y estado del terreno, entre los principales factores. La metodología más utilizada a nivel experimental es la remoción manual del suelo trabajado y el cálculo del área a partir de los datos medidos por medio de un perfilómetro que abarque el ancho de labor del apero o por medio de algún proceso de automatización de las lecturas de profundidad de trabajo, una vez removido el suelo labrado. Balbuena *et al.*, (1994) determinaron que el grado de interacción puede ser valorado a través de la resistencia específica al laboreo, encontrándose ambos parámetros en relación inversa. En tal sentido, Balbuena *et al.*, (1996 a) hallaron que el trabajo con escarificadores en dos pasajes incrementaba los valores de resistencia específica y potencia insumida, concluyendo que la labranza en un solo pasaje resultaba energéticamente más eficiente. En este contexto, el objetivo de eficientizar la labor ha conducido al estudio del efecto del trabajo de implementos cuyos órganos activos se disponen en estratos crecientes de profundidad. Soomro *et al.*, (1982) citan que el laboreo en dos estratos permite reducciones del 50% del esfuerzo de tracción en comparación con la misma labor efectuada a la misma profundidad con una configuración convencional. Spoor & Godwin (1978) concluyen que el empleo de órganos activos trabajando en forma superficial por delante de rejas más profundas determinaba incrementos en el área removida y disminución de la resistencia específica. Resultados similares fueron obtenidos por Balbuena *et al.*, (1992 c), en trabajos con rejas convencionales y de diseño alado. Adicionalmente Hamza & Anderson (2005), citan la consecuente reducción en el costo de la labor mediante un solo pasaje de implementos de cuatro estratos de profundidad. Es de importancia destacar, que la mayor eficiencia no resulta únicamente de la disminución de la energía requerida para trabajar una cierta sección del terreno sino también sobre otros parámetros de la labor. Al disminuir la carga normal que ejercen las capas superiores del suelo sobre las inferiores, se reducen los riesgos de superar la profundidad crítica y por lo tanto, de generar compactación en profundidad. A su vez, al realizarse un único pasaje sobre el terreno se reduce el número de pasajes sobre el suelo, los riesgos de aumentar la compactación inducida por tránsito de vehículos, por el aumento del número de pasadas sobre un suelo que presenta lógicamente, mayores riesgos de compactabilidad. Al no realizar, con los implementos que trabajan en 2 estratos, una pasada luego del laboreo superficial para alcanzar la profundidad final de labor, se reducen las pérdidas de potencia variables, patinamiento y resistencia a la rodadura, que suelen adquirir valores muy elevados en el segundo pasaje, puesto que el suelo ha disminuido sustancialmente su capacidad portante en los primeros 150 mm de profundidad, generando deformaciones en los planos horizontales y verticales al paso de las ruedas del tractor que generan dichas pérdidas.

No obstante lo expuesto en los párrafos precedentes, debe tenerse en cuenta, independientemente de la mayor eficiencia, que los esfuerzos de tracción de cualquier alternativa de descompactación del perfil en un solo pasaje (ya sea en uno o dos estratos) serán muy altos. Esto implica que los costos de la labor serán elevados y que la conformación de equipos o conjuntos armónicos no resultará sencilla. En un análisis elemental de la problemática puede entenderse fácilmente que los mayores requerimientos tractivos implicarán al menos las siguientes consecuencias: 1) Será necesario contar con tractores pesados, en lo posible de alta relación peso/ potencia, para trabajar con valores de patinamiento

bajos. 2) El tractor deberá vencer un elevado par resistente, por lo que se necesitará trabajar con motores que ofrezcan un elevado par nominal, potentes y seguramente en marchas de relativamente alta relación de transmisión, lo cual implica una baja velocidad de desplazamiento sobre el terreno. El hecho de conformar un equipo de descompactación en el cual el implemento cubra al menos en su labor la distancia entre caras externas del tractor, habitualmente genera esfuerzos de tracción que determinan la condición especificada en los puntos 1 y 2, por lo cual la capacidad de trabajo del conjunto será no muy elevada, tanto por la velocidad de trabajo como por el ancho de labor.

Características operativas:

Las condiciones de trabajo de los descompactadores, en sistemas de labranza conservacionista, frecuentemente determina que la labor deba realizarse en presencia de abundantes residuos vegetales en superficie. La aptitud para trabajar el suelo sin presentar frecuentes problemas de atoraduras es de relevancia, relacionándose íntimamente con la capacidad de paso del implemento y su oportunidad de trabajo. En el trabajo con escarificadores ha sido reiteradamente mencionada la dificultad para el desplazamiento sobre el suelo con restos vegetales en superficie debido al diseño de los montantes y la configuración espacial de los órganos activos. Esto implica una serie de características de diseño que resultan importantes tener en cuenta al momento de evaluar la prestación de los implementos, entre las cuales pueden destacarse:

- Despeje
- Presencia de órganos de corte de residuos vegetales
- Número de planos de acción y distancia entre planos de acción de los órganos activos.

El despeje del implemento (distancia entre el extremo de la reja y el punto más bajo en la vinculación del montante al bastidor) adquiere importancia, ya que cuanto mayor sea, se incrementarán las posibilidades de evitar el atoramiento del equipo, determinando además su capacidad para el trabajo a mayores profundidades.

Las cuchillas circulares son empleadas para auxiliar en el corte vertical del suelo y para cortar los residuos vegetales, de manera de disminuir las posibilidades de atoraduras (Srivastava *et al.*, 1994). De acuerdo a lo citado por Riley & Fielke (1990) el corte de los residuos producido por la cuchilla circular provoca la formación de un canal a través del cual el órgano activo puede desplazarse sin inconvenientes. La utilización de las mismas en laboreo primario con cinceles es aún poco difundida y generalmente ofrecida como equipamiento opcional en los equipos comerciales. Existen 2 diseños difundidos de ubicación de las cuchillas circulares en escarificadores: a) en forma individual, inmediatamente por delante de cada arco y b) en forma conjunta, en la parte anterior del bastidor, pudiendo el corte producido por cada cuchilla coincidir o no con la línea de acción de los arcos. La adaptación de cuchillas circulares en la parte frontal de los cinceles genera, por lo tanto, distintas configuraciones espaciales en relación a la ubicación relativa de la línea de trabajo de cuchillas y rejas. Fielke & O'Driscoll (1986) trabajando con cuchillas circulares por delante de rejas de 0,4 m de ancho concluyeron que la adición de aquellas favorecía el movimiento del suelo hacia los costados en detrimento de la elevación del mismo. Indicaron, además, la formación de un

cuerpo de arcilla por delante de la reja, que no es desplazado de ese sitio debido al corte del terreno producido por las cuchillas cuando las mismas trabajaron en la línea de acción de las rejas, con una visible reducción de la remoción del suelo. Balbuena *et al.*, (1996) realizaron una serie de ensayos que incluyeron la evaluación de montantes rígidos y flexibles interactuando con cuchillas trabajando sobre la línea de acción de las rejas y montantes rígidos con y sin interacción, colocando por delante de los mismos, en ambos ensayos, cuchillas circulares sobre y entre las líneas de acción de las rejas sobre el terreno. En cada serie tomaron como testigo el trabajo de arcos sin cuchillas circulares. Informaron que durante los ensayos fue posible visualizar que el corte producido por la cuchilla favorecía para el caso de la ubicación en la línea de trabajo del arco una mayor cobertura de rastrojo, al disminuir el entremezclado del mismo con el suelo. Atribuyeron este efecto, a la disminución de la elevación del terreno sobre el arco durante el desplazamiento del conjunto, lo cual coincidiría en parte con lo reportado por Fielke & O'Driscoll (1986), para rejas de escardillo. Además indicaron que fue también posible observar en el tratamiento con cuchillas sobre la línea de trabajo, la presencia sobre la reja del escarificador de un cuerpo de tierra que no se desprendía durante el proceso de elevación de los órganos activos. A su existencia, en forma permanente durante el trabajo del implemento sería posible atribuir el mayor esfuerzo traccional con respecto al tratamiento con cuchillas entre las líneas de acción pese a que la sección trabajada por este último haya sido superior. En relación al área trabajada, adjudicaron a la colocación de cuchillas sobre la línea la reducción significativa del frente de labor de dicho tratamiento con respecto a la ubicación entre las líneas de acción. Concluyeron que el uso de cuchillas circulares incide sobre la energía requerida para la labranza del suelo con escarificadores de arcos rígidos y que la colocación de cuchillas circulares por delante y en la misma línea de acción de las rejas disminuye el área de suelo removida. Terminiello *et al.*, (1997) arribaron a similares conclusiones afirmando que el uso de cuchillas circulares reduce los esfuerzos de tracción, y su ubicación relativa sobre arcos rígidos, incide sobre la resistencia específica.

En el conjunto de ensayos, con y sin interacción, puede visualizarse que los efectos de la colocación y ubicación de cuchillas circulares presentan variaciones según los órganos activos se encuentren interactuando o no, sin que ello implique un cambio de tendencias. En los trabajos sin interacción las diferencias entre tratamientos con cuchillas entre las líneas de acción y sobre las mismas son máximas, tanto en área removida como en resistencia específica. Esto implica, tal como resulta lógico esperar, que los procesos de interacción disminuyan el efecto de la adición de cuchillas y su ubicación, pero no los eliminan. Por el contrario, resulta también claro que ante la presencia de un importante volumen de residuos vegetales, la posición que en mayor medida favorece la capacidad de paso del conjunto será la colocación de las cuchillas por delante y coincidente su alineación con el órgano activo del escarificador. Si se atiende a las hipótesis ad-hoc enunciadas en los trabajos, surgen algunas recomendaciones de carácter general que podrían resumirse en los siguientes ítems: a) La colocación de cuchillas circulares resulta siempre conveniente, con respecto a su no inclusión, puesto que se mejoran aspectos operativos y de prestación tractiva del conjunto; b) podría deducirse que en condiciones en las cuales la presencia de residuos resulta limitante, es conveniente colocar las

cuchillas en la misma línea de trabajo de las rejas, pero aumentando el grado de interacción entre los órganos activos, acercándose a una relación distancia entre rejas/profundidad de labor menor a 1,4. De esta forma, se minimizarían tanto las dificultades de capacidad de paso, como así también los efectos negativos sobre la prestación tractiva; c) en condiciones de ausencia de residuos, sería conveniente colocar cuchillas circulares entre las líneas de trabajo de las rejas, lo cual mejora la prestación tractiva, principalmente por los efectos sobre los arcos que se disponen en los primeros planos de acción, sin interacción.

El número de planos de acción, mencionado en forma precedente, implica la posibilidad que, respetando las relaciones entre profundidad de trabajo y distancia entre líneas de acción de los órganos activos indicadas por Soomro *et al.*, (1982), Godwin *et al.*, (1984) y Benez *et al.*, (1991) entre otros, permita distanciamientos entre órganos activos de un mismo plano, que no limiten la capacidad de paso del implemento.

Otras características de diseño de los descompactadores que resultan de importancia analizar son:

- Alternativas de rejas que pueden utilizarse.
- Tipo de arco

El tipo de reja constituye un elemento de importancia para la adaptación de los descompactadores a diferentes condiciones del terreno. Spoor y Godwin (1978) trabajando sobre subsoladores, subsoladores alados y cinceles rígidos encuentran que la profundidad crítica puede alcanzar mayores valores en la medida que se adicionan alas a los órganos activos. Spoor y Godwin (1978), Ahmed y Godwin (1983), afirman que la utilización de las alas acopladas al subsolador si bien incrementan el esfuerzo de tracción, producen una disminución en la resistencia específica al laboreo o coeficiente de labranza del implemento debido al importante incremento en el frente de labor. Magalhaes & de Souza (1990), encontraron que la incorporación de alas en la zapata de un subsolador, incrementó significativamente tanto el esfuerzo traccional como el frente de labor, pero no encontró en ninguna de las variantes de alas ensayadas una disminución significativa del coeficiente de labranza del implemento. Balbuena *et al.*, (1992), en trabajos con diferentes tipos de rejas y profundidades, detectan que los niveles máximos de profundidad de trabajo para las distintas rejas resultan similares. Concluyen además que las rejas aladas muestran una mayor aptitud para la remoción del suelo en profundidad. Soomro *et al.*, (1982) concluyen que tanto la disposición, distanciamiento, profundidad y adición de alas influyen sobre el esfuerzo traccional, el área removida y la resistencia específica al laboreo. En relación con el uso de rejas aladas, determinaron que el distanciamiento entre las líneas de acción de los arcos con el cual se alcanzaron los menores valores de resistencia específica, fue aproximadamente 2 veces la profundidad de labor. Balbuena *et al.*, (1992), encuentran también diferencias altamente significativas en el área trabajada por rejas de diseño alado, del tipo denominado comercialmente "pata de ganso" en comparación con rejas convencionales, a la vez que aquellas registraron los menores valores de resistencia específica.

En función de lo antedicho, técnicamente resultaría recomendable la utilización de rejas de diseño alado que, si bien demandan mayores esfuerzos tractivos, permiten incrementar la roturación en profundidad, a la vez que permiten aumentar la eficiencia de la labor desde el punto de vista energético. Por

otra parte, posibilitan contar con una mayor oportunidad para la realización de la labranza, en la medida que se adecuan a trabajar con mayores tenores de humedad que las rejas convencionales. Pese a ello, hasta el presente no se han difundido mayormente en el mercado argentino descompactadores con rejas de diseño alado, a diferencia de lo ocurrido tanto en Estados Unidos como en Europa a partir de la última década del siglo XX. Estas diferencias en la adopción de las alternativas tecnológicas podrían explicarse a partir de un conjunto de factores técnicos, productivos y económicos. Por un lado, la problemática de los procesos de compactación y su incidencia en los sistemas productivos no ha sido visualizada con claridad. A su vez, en la década del noventa, la rápida evolución de la siembra directa de cultivos sin remoción previa del terreno, coincidió lógicamente con la disminución de los sistemas de labranza mínima o reducida con utilización de implementos de labranza vertical. La oferta, de alternativas tecnológicas de aperos para la descompactación también se redujo como consecuencia de estos cambios. Por otra parte, los diseños alados requieren que el fabricante dimensionen el conjunto montante-reja para los mayores esfuerzos requeridos, debiendo modificar para ello también la estructura del bastidor. En un contexto de reducción de ventas de equipos de labranza, necesidad de readecuación de los diseños existentes y de mantenimiento de altos niveles de cobertura del suelo, estas alternativas encuentran todavía escasas posibilidades de adopción en el medio productivo.

En cuanto al tipo de montante utilizado en los descompactadores, pueden considerarse tradicionales o convencionales a los de montante recto, en relación a los de montante angulado (recto o curvado) en el plano transversal a la dirección de avance, conocidos como *Paratill*, *Paraplow* o *Cultivie* entre otras denominaciones técnicas y comerciales. En estos implementos, el trabajo sobre el suelo es realizado en parte por la reja que se encuentra sobre la zapata del subsolador y principalmente por la reja que se encuentra adosada sobre la lámina curva o recta angulada del montante. Teniendo en cuenta las dimensiones de la reja adosada a la zapata, la misma tendría importancia en la penetración inicial del equipo, más que la roturación del suelo en profundidad. En virtud de las características diferenciales de los distintos diseños de descompactadores, variará la adecuación y aptitud de los implementos para su inclusión en diferentes sistemas de labranza. En los sistemas de conservación del suelo, en general, y en el sistema de siembra directa en particular, resulta prioritario mantener una elevada cobertura de residuos, como así también la superficie del terreno sin mayores irregularidades, para evitar inconvenientes en la siembra de los cultivos. Pidgeon (1983) indicó que el *Paraplow* puede ser utilizado, como máquina de labranza, para extender los sistemas conservacionistas a suelos que son naturalmente inapropiados para técnicas de mínima y no labranza. Según Mallet y Lang (1987) el *Paraplow* provoca el desmenuzamiento del suelo, con una mínima alteración de la superficie del suelo, dejando abundante cobertura sobre la misma. Los escarificadores de montantes inclinados lateralmente, en general, tendrían ventajas comparativas en función de la menor remoción superficial del terreno que generan, en relación con los de montantes rectos y rejas convencionales.

Tal como fuera indicado en el análisis de los patrones de roturación de los descompactadores, Spoor & Godwin (1978) determinaron que las características de roturación de los subsoladores de montantes inclinados, rectos, son similares a los de otros diseños de escarificador. Vinculado a estos

conceptos, Casão Junior & Chang (1993), trabajaron con montantes inclinados a escala reducida, con 45° de ángulo lateral, estableciendo una adecuada relación entre las áreas medidas y las calculadas a partir de la propuesta de Willat & Willis (1965).

Con respecto a los requerimientos tractivos de estos implementos, se ha informado un requerimiento de 883 daN por arco, en trabajos a 0,4 m de profundidad y 7 km/h, sobre suelos francos (PAMI, 1991). Hilbert & Tesouro (2000) realizaron evaluaciones de la energía requerida para el trabajo con subsoladores de montantes curvos, las cuales arrojaron resultados similares a las evaluaciones realizadas sobre implementos angulados lateralmente de montantes rectos. Claverie *et al.*, (1998) realizaron ensayos de arcos de Paratill, evaluando 2 distanciamientos laterales, 0,35 y 0,45 m, para 2 montantes dispuestos en forma convergente, en un mismo plano de acción. Determinaron que los menores valores de resistencia específica se correspondieron con el mayor distanciamiento entre órganos activos, con una relación entre distancia entre rejas y profundidad de labor de 1,42. Sin embargo, la configuración espacial de los órganos activos, en los subsoladores de montantes angulados, varía en los implementos, tanto en la distancia entre las líneas de acción de las rejas, como así también en la simultaneidad y progresividad del proceso de interacción. Balbuena *et al.*, (2003) evaluaron distintas alternativas de configuración de subsoladores de montantes curvos angulados lateralmente sobre un suelo Argiudol típico. En concordancia con lo indicado por Godwin *et al.* (1984) y Claverie *et al.* (1998), la menor resistencia específica se correspondió con una relación distancia entre líneas de acción y profundidad del órgano activo de 1,528, cercana a los valores medios de 1,4 y 1,42 mencionados por los mismos respectivamente.

Concluyeron que la resistencia específica es independiente de la disposición de los montantes y variable en relación a la distancia entre los órganos activos. Sin embargo, los parámetros de prestación, esfuerzo de tracción y área de suelo removida, son afectados por la disposición y distanciamiento de los montantes y órganos activos. El análisis de los resultados indica que el área trabajada es mayor para la disposición con arcos convergentes por pares, lo cual determina una mayor homogeneidad en la profundidad de labor. En correlación con el incremento del área trabajada, los esfuerzos de tracción fueron también mayores para esta disposición en relación a los registrados cuando el proceso de interacción se genera por el trabajo de montantes ubicados por detrás de otro delantero y lateral con la misma disposición. En función de las perfilometrías realizadas, para la separación entre arcos que tuvo la menor resistencia específica, la altura del sector no trabajado entre las rejas alcanzó en promedio 0,10 m (28,57% de la profundidad de labor), mientras que para los arcos convergentes en conjunto, el sector de suelo no roturado llegó a una altura de 0,15 m (42,8% de la profundidad de las rejas). Esto podría configurar una limitación, en la medida que sea necesario por algún motivo, una remoción homogénea en profundidad y superior a los 0,20 m.

En un análisis general, los descompactadores de montante angulado parecieran adecuarse a las condiciones de los planteos productivos bajo siembra directa de cultivos, en función de lo mencionado respecto de la cobertura del suelo con residuos vegetales, como así también la menor rugosidad de la superficie del suelo con respecto a otros implementos. Este

último aspecto es fácil de visualizar, en la medida que los mismos incluyan entre los órganos de laboreo del terreno rodillos desterronadores que roten los agregados de gran tamaño que quedan sobre la superficie del suelo, eliminando el pasaje posterior de una rastra de casquetes. A esta mayor o menor uniformidad, contribuye el ángulo lateral del montante, variable entre 30°, 45° y 60° con respecto a la superficie del terreno. Los mayores ángulos producirían menor remoción superficial, mientras que angulaciones de 45° y 30° favorecerían una mayor elevación de la cota del terreno y modificación de la posición de los agregados del suelo, que podría favorecer una mayor duración de los efectos de la labor.

Persistencia de la labor:

La duración de los efectos de las labores de descompactación adquiere relevancia en relación con la energía requerida para la misma, los costos que conlleva y los menores o mayores beneficios generados, desde el punto de vista de las propiedades físicas del suelo como así también de los efectos sobre el rendimiento de los cultivos. Además, la persistencia de las condiciones de baja resistencia a la penetración, debidas a la labranza profunda, es relevante al momento de definir la frecuencia de este tipo de operación (Barber, 1994). Al respecto, los resultados y conclusiones producto de numerosos trabajos de investigación muestran una gran diversidad en los distintos aspectos enunciados

Sojka et al., (1990), sostienen que los beneficios, de aflojamiento del perfil mediante el subsolado, dependen de la profundidad y magnitud de la disrupción y de la persistencia de la misma a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo.

Busscher et al. (1986), observaron que un suelo franco arenoso, débilmente estructurado, la resistencia a la penetración postlabor se había incrementado de 1,5 a 2,5 MPa luego de un año de haber sido descompactado, punto a partir del cual el suelo fue restrictivo para las raíces y toda traza del subsolado previo, había desaparecido dentro de los dos años posteriores a la labranza.

Sojka et al. (1990), trabajando en un suelo similar al anterior (Paleudult franco arenoso), encontró que la reconsolidación ocurrió dentro de un período de 27 días después del subsolado, produciéndose después de una lluvia, y todos los signos del subsolado habían desaparecido al final de la estación del cultivo.

Unger, (1993) encontró que el aflojamiento del suelo, a través del cincelado, era de corta duración, debido a las subsecuentes labranzas y reconsolidación del suelo. Este mismo autor, evaluó la duración del efecto del aflojamiento con paraplow (MR), utilizando las variaciones en la resistencia a la penetración y en la densidad aparente como indicadores de la reconsolidación del suelo y encontró que no existía una tendencia clara de como el suelo volvía a su condición original, atribuyéndolo a variaciones en el contenido de humedad del suelo al momento de realizar el subsolado y en las operaciones de labranza secundaria.

Carter, (1988 (a)), comparó la persistencia del aflojamiento del suelo con arado de rejas, paraplow y siembra directa. Encontró que al cabo de 5 meses después de la labor, la profundidad de suelo aflojado con arado de rejas había

declinado en un 30% y en el caso del suelo laboreado con paraplow en un 60%. Observó, además, que en el transcurso de la estación de crecimiento del cultivo, en todos los tratamientos, se produjo un incremento gradual de la resistencia a la penetración. Esto, probablemente se debió a la reconsolidación producida por las operaciones de manejo de postsiembra y a las uniones entre partículas y agregados del suelo, debido a los procesos de humedecimiento y secado bajo la influencia de las raíces de plantas (Koolen y Kuipers, 1983).

Vepraskas et al., (1995), encontraron que el efecto residual del subsolado sobre el crecimiento de raíces, se mantenía alrededor de los dos años posteriores a la labranza, para desaparecer al tercer año por efecto de la recompactación. Estos autores sostienen, además, que el beneficio máximo de la labranza profunda, sobre los rendimientos, ocurrió cuando la misma se realizó anualmente, coincidiendo con lo postulado por Busscher et al., (1986), quienes plantean que el efecto del subsolado se manifiesta en las etapas tempranas del crecimiento de las raíces de cultivos, ya que posteriormente se produce la recompactación de las capas aflojadas.

Por otro lado, Karlen et al. (1991), sugirieron que dos o tres años de subsolado, generarían una fragmentación estable de la capa laboreada, lo que podría proveer, a largo plazo, efectos benéficos para el crecimiento de cultivos, sin necesidad de subsolar anualmente.

En relación a esta problemática, Carter et al. (1996) estudiaron la persistencia de la labor de aflojamiento bajo condiciones de mínimo tráfico vehicular. Encontraron que la recompactación, de las capas aflojadas, se produjo dentro de los tres años posteriores a la labranza, iniciándose durante el primer año después de la misma. Puntualizaron, además, que los cambios periódicos que ocurren en la geometría porosa como resultado de ciclos de humedecimiento - secado, congelamiento - deshielo, podrían favorecer el proceso de reconsolidación.

Barber (1994) en un ensayo de 4 años de duración, observó que la reconsolidación, posterior a la labranza, no afectaba el crecimiento de raíces tan severamente como el suelo compactado previo a la labranza. Las diferencias, con respecto a una situación de labranza convencional, se mantuvieron por al menos 3 años posteriores a la labranza. Este mismo autor probó diferentes labranzas profundas y en todas ellas observó una reducción de la resistencia del suelo por efecto de la labranza. Sin embargo, en todas ellas se produjo recompactación, alcanzando valores de resistencia a la penetración restrictivos para la raíz, después de los dos años de la labor. El proceso de recompactación se produjo tanto desde abajo hacia arriba, como desde arriba hacia abajo.

Por otra parte Balbuena *et al.*, (1996 c), trabajando sobre un suelo Argiudol típico, evaluaron la persistencia de la labor mediante penetrometría. Concluyen que lo limitado de la persistencia de la disminución de dicho parámetro respecto del testigo sin descompactación (6 meses) tornaría inadecuada la realización de la labor en forma muy anticipada.

En tal sentido, Claverie *et al.*, (1996), sugieren que en este tipo de suelo la presencia de arcillas del tipo montmorilloníticas e ilíticas, debido a sus características de variación del volumen en función de la hidratación, resultarían determinantes de procesos de autoestructuración del perfil, que limitarían los beneficios de los efectos de la labranza. Con relación a estos aspectos,

En un suelo recién laboreado, la macroporosidad es función del arreglo y

tamaño de los agregados o terrones (Baver, et al. 1972). Con el transcurso del tiempo, a través de procesos de consolidación del suelo, actividad biológica, ciclos de humedecimiento y secado, se produce un cambio en la naturaleza, distribución y continuidad de poros (Cassel y Nelson, 1985).

Dexter (1991), sostiene que un suelo con inadecuadas condiciones físicas (sin agregación, masivo, duro, anaeróbico), puede ser transformado, temporalmente, a través de la labranza, en un suelo con estructura aparentemente cercana a la óptima (cama de siembra con agregados entre 1-5 mm de diámetro, sobre un subsuelo flojo y bien drenado). Sin embargo, esta estructura está lejos de encontrarse en equilibrio, siendo inestable mecánicamente, con posibilidades de colapsar cuando se humedece, pudiendo quedar físicamente tan mal o a veces peor que antes del laboreo.

Barber (1994) explica este comportamiento, sosteniendo que cuando las precipitaciones ingresan al perfil disgregan los terrones débilmente estructurados, promoviendo un rearrreglo y empaquetamiento cerrado de las partículas, conformando nuevamente una matriz densa. Sojka et al. (1990) sostienen que la reconsolidación de la capa laboreada después de una lluvia, es un problema común en suelos Paleodults franco arenosos finos. Otra de las posibles causas de este comportamiento estaría relacionada a la baja capacidad de autoregeneración estructural que presentan los suelos de textura franco limosa, atribuida a la falta de minerales expansibles, lo que ocasiona un moderado cambio de volumen y por lo tanto una escasa formación de porosidad de aire (microgrietas y fisuras) a medida que el suelo se seca (Jayawardane y Greacen, 1987; Dexter, 1988). Consentino et al. (1998) evaluaron las curvas de expansión-contracción, de suelos con 30% de arcillas illíticas de la Pampa Ondulada, y encontraron que las mismas tenían un comportamiento muy rígido. Tendencias similares fueron halladas por (Taboada et al. (1996), aunque Barbosa et al. (1999) concluyen que los suelos franco limosos no son totalmente rígidos y que la baja capacidad de regeneración de poros no se relaciona con la falta de arcilla expansible.

Barbosa et al. (1997) estudiaron el efecto del régimen de humedad sobre la regeneración de la estructura y encontraron que los pequeños macroagregados, microagregados y partículas inicialmente presentes, al ser puestos a humedad constante, tendieron a unirse naturalmente entre si, dando así lugar a un aumento en el DPM de agregados. La probabilidad de contacto entre partículas aumenta con la presión ejercida por el mismo suelo, lo cual podría explicar los aumentos de DPM observados en las capas subsuperficiales. A ello se sumaría, el efecto de la compactación inducida por el tránsito de tractores y máquinas agrícolas cuando los mismos poseen una masa/eje superior a los 4 a 6 Mg. Cuando se produjeron ciclos de humedecimiento-secado, con vegetación presente, el DPM de los agregados fue mayor que a humedad constante, debido probablemente a que la extracción de humedad por las raíces generó un desecamiento más pronunciado del suelo, favoreciendo el endurecimiento debido a la cementación que sufren las partículas por óxidos de Fe, Al y Si.

La velocidad de secado del suelo, según Gerard et al. (1962) es otro factor que influiría en el grado de empaquetamiento generado posteriormente a la labranza. Cuando el secado es lento, el empaquetamiento es más compacto, con ligaduras físico-químicas más fuertes entre partículas, que cuando el mismo se produce rápidamente. El secado lento según estos autores genera

una mejor distribución y orientación de las partículas, especialmente de arcilla y limo, mientras que en el desecamiento rápido, se produce una acción disrruptiva de la estructura, al perderse las moléculas de agua, generando de este modo un mayor espacio de poros que en el secado lento. Estos autores sostienen, además, que la velocidad de reordenamiento de las partículas es relativamente rápida, por lo que los efectos benéficos del subsolado tendrían poca duración.

Cholaky (2003), en trabajos sobre un suelo Haplustol típico, concluye que el efecto de la descompactación persiste durante el período de desarrollo del ciclo de un cultivo anual, cuando no se efectúa tránsito luego de la labor.

Quiroga *et al.*, (1999), en tanto, sostienen que la relación entre ciertas propiedades físicas y el contenido de materia orgánica puede determinar si la labranza realmente contribuye a combatir la compactación del suelo. En algunos casos, el laboreo puede resultar inapropiado, ya que la consecuente pérdida de materia orgánica puede agravar el problema debido a las posibilidades de recompactación.

En este contexto, Raper (2005) menciona que el escarificado a profundidades excesivas, además de implicar un incremento en la energía necesaria para su realización, puede promover futuros problemas y a mayores profundidades, como consecuencia del tráfico posterior a la labranza.

Perspectivas y conclusiones:

La variabilidad de la persistencia del efecto, el costo de la labor, así como la solución de compromiso que implica el empleo de herramientas que, paradójicamente, deben ser operadas por tractores de elevado peso para paliar las consecuencias del tránsito de vehículos de alta carga por eje, indican que los esfuerzos deben concentrarse en pos de atacar las causas, de manera de disminuir la compactación ocasionado por el tránsito de tractores y máquinas agrícolas y no sobres las consecuencias.

La descompactación mecánica del suelo es la última de las diferentes alternativas a tener en cuenta en un sistema productivo como forma de retardar, reducir o minimizar los efectos de la compactación del suelo.

La decisión de realizar un trabajo de descompactación mecánica del suelo agrícola, conlleva necesariamente a la modificación de la planificación de las actividades mecanizadas, reduciendo al mínimo posible el tránsito de tractores, máquinas y carros sobre el terreno, en pos de disminuir la periodicidad de las acciones de descompactación.

