

Effect of rotary plows on some physical properties of a clay loam soil*

Efecto de los arados rotativos sobre algunas propiedades físicas de un suelo franco arcilloso

Efeito do arado rotativo em algumas propriedades físicas de um solo argiloso

Samir Safar^{1*}, I. Agrónomo; Hugo González², I.A, cPhD; Nelson Luis Cappelli³, I.A, PhD.

* Autor para correspondencia: Samir Safar. Carrera 14 A No 127 B 61, Apartamento 602, Edificio Norcarolina, Bogotá, DC.

¹ Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. safarabis001@hotmail.com

² Profesor Asistente - Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Ingeniería Agrícola. A.A. 568. hagonzal@unal.edu.co.

³ Universidade Estadual de Campinas – SP- Brasil. cappelli@agr.unicamp.br.

(Recibido: 29 de julio, 2010; aceptado: 5 de abril, 2011)

Abstract

The effect of rotating plows (rotavator, power harrows and motorhoes) on some of the main physical properties in a clay loam soil Vertic Haplustalf, with alluvial parent material and slope less than 3%, was studied. Twelve experimental parcels were established and three different treatments and a control were applied to the soil. Values of soil bulk density, total porosity, gravimetric moisture content, penetration resistance, distribution and structural stability of aggregates were determined for treated parcels. Only significant difference was found ($p < 0,05$) in the penetration resistance between control soil and treated with rotavator and power harrows. The remaining soil physical properties evaluated showed some variation, but were not statistically significant, so we conclude that these (rotary plows) did not alter or affect the properties in question representatively.

Keywords

Mechanization of the soil, motorhoes, physical properties of the soil, power harrows, rotavator.

*Para citar este artículo: Safar S, González H, Capelli NL . 2011. Efecto de los arados rotativos sobre algunas propiedades físicas de un suelo franco arcilloso. Rev CES Med Vet Zootec. Vol 6 (1): 32-44

Resumen

Se estudió el efecto de diferentes arados rotativos (rotavator, grada rotativa y motoazada) sobre algunas de las principales propiedades físicas de un suelo *Vertic Haplustalf*, franco arcilloso, con material parental aluvión y pendiente <3%. Se establecieron 12 parcelas experimentales, en tres diferentes tratamientos y un tratamiento control. Se determinaron valores de densidad aparente, porosidad total, contenido de humedad gravimétrica, resistencia a la penetración, distribución y estabilidad estructural de agregados por parcelas tratadas. Sólo se encontró diferencia significativa ($p < 0,05$) en la resistencia a la penetración entre el suelo testigo y los tratados con rotavator y grada rotativa. Las restantes propiedades físicas del suelo evaluadas presentaron algunas variaciones, pero no fueron estadísticamente significativas, por lo que se concluye los arados rotativos no alteraron, ni afectaron representativamente las propiedades en cuestión.

Palabras Clave

Grada rotativa, mecanización del suelo, motoazada, propiedades físicas del suelo, rotavator.

Resumo

Estudou-se o efeito de diferentes arados giratórios (rotador, grade rotativa e cultivador) sobre algumas das principais propriedades físicas de um solo *Vertic Haplustalf*, franco argiloso, com material de origem aluvial e declividade <3%. Foram estabelecidas 12 parcelas experimentais em três tratamentos diferentes e um tratamento controle. Foi determinada valores da densidade aparente, a porosidade total, o teor de umidade por gravimetria, a resistência à penetração, distribuição e estabilidade estrutural dos agregados nas parcelas tratadas. Apenas uma diferença significativa ($p < 0,05$) foi encontrada na resistência à penetração entre o solo controle e os tratados com rotador e grade rotativa. As propriedades físicas restantes do solo avaliadas apresentaram alguma variação, mas não foram estatisticamente significativas, ao que se conclui que os arados rotativos não alteraram nem afetaram representativamente as propriedades em questão.

Palavras-chave

Cultivador, grade rotativa, mecanização do solo, propriedades físicas do solo, rotador.

Introducción

Dentro de los problemas más comunes generados por una inadecuada labranza se encuentran el aumento de la densidad aparente, la pérdida de macroporosidad, la compactación; la reducción en la infiltración, la conductividad hidráulica, el almacenamiento de agua y la estabilidad estructural, así como el aumento de la escorrentía y la erosión¹⁴.

Los suelos del Centro Agropecuario Cotové, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, donde por muchos años se ha implementado el

modelo de labranza convencional, posiblemente no han quedado exentos de los efectos nocivos de estas prácticas inapropiadas.

Los arados rotativos como el rotavator, la grada rotativa y la motoazada, entre otros, son herramientas rotacionales que roturan, cortan y mezclan el perfil del suelo. Constan de un rotor provisto de cuchillas accionado por la toma de potencia del tractor (excepto la motoazada que es accionada por su propio motor), de manera que en una sola pasada realizan

el rompimiento y mezcla del suelo ²³. Estos equipos pueden ser considerados implementos críticos en regiones con clima tropical, por su fuerte impacto sobre la estructura del suelo y el alto riesgo de erosión relacionado con ellos ⁹.

En ocasiones se considera la labranza rotativa como labranza reducida por el número limitado de operaciones en la preparación del suelo. Esta práctica contribuye a disminuir la compactación, gracias al menor número de pasadas y a la reducción del peso del tractor por la tracción negativa dada por el empuje hacia delante que ejercen las herramientas rotativas sobre el tractor ⁶.

Una de las críticas a estas herramientas se relaciona con la fragmentación del suelo que daña la estructura. Se ha encontrado que el grado de pulverización está influenciado por la cantidad de avance por corte ⁶. Para Lozano (2002) ¹⁵ en las zonas mecanizables de los altiplanos andinos donde se cultiva papa tradicionalmente la labranza se basa en el uso de arados de discos y rotativos (rotavator) que han generado capas compactadas de suelo entre 200 mm y 300 mm de profundidad y la pérdida de la estructura en las capas superiores.

Bonilla y Murillo (1998) ⁵ evaluaron el efecto de la labranza profunda utilizando arado de cincel vibratorio y grada rotativa comparada con la convencional con arado de discos, rastra pesada y pulidor, estudiando las propiedades físicas del suelo y el desarrollo y producción del cultivo de algodón, y concluyeron que el arado de cincel vibratorio combinado con la grada rotativa mejora en forma significativa las propiedades físicas de los suelos tratados.

Las motoazadas son equipos versátiles y están equipados con motores de combustión interna. Se utilizan en todo tipo de suelo con topografía desde plana hasta pendiente. En particular sirven para roturar y desterronar el suelo antes de la siembra, para incorporar material triturado como turba o abono, así como para eliminar hierbas indeseables.

El manejo de esta clase de implementos de labranza requiere el conocimiento técnico de los mismos y la evaluación de los efectos que su empleo intensivo causa a la estructura del suelo. En el presente estudio se evaluó la interacción arados rotativos/suelo con el fin de determinar el grado de deterioro que los primeros ocasionan en el segundo y así establecer la opción (rotavator, grada rotativa o motoazada) que presenta menor riesgo para el deterioro de la estructura del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Centro Agropecuario Cotové, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, está localizado en la vereda el Espinal del municipio de Santa Fé de Antioquia, al occidente del departamento de Antioquia (Colombia) a 6° 33' 32" norte y 77° 04' 51" oeste, en la zona de vida bosque seco tropical (bs-T) con una temperatura anual, promedio, de 27 °C; precipitación, promedio anual, de 1031 mm, y a 540 m.s.n.m ¹⁸. El área experimental se encuentra en una terraza aluvial plana (pendiente <3%), con suelos dominantes arcillosos, moderadamente profundos, de buena fertilidad, clasificados como *Vertic Haplustalfs* franco fino, mezclado, isohípertermico, superficial ²².

Diseño experimental y procedimientos

Se utilizó un diseño completamente al azar con tres tratamientos, más un tratamiento control, con tres repeticiones para cada tratamiento. Antes de aplicar los tratamientos se determinaron las propiedades del suelo (Tabla 1). Los tratamientos consistieron en un pase previo con cortamalezas y desbrozadora en el área de estudio con la finalidad de erradicar la vegetación presente. Las parcelas experimentales medían 21 m x 30 m cada una. Los tratamientos consistieron en:

1. Rotavator (TRV), dos pases de rotavator de cuchilla con ángulo de 135° (HR 2.7) a 150 mm de profundidad

conectado al tractor (5500 JD) con tiempo real de trabajo de 18 min por parcela.

2. Grada rotativa (TGR), dos pases de grada rotativa (HRB-182) a 170 mm de profundidad conectada al tractor (5500 JD) con tiempo real de trabajo de 16 minutos aproximadamente por parcela.

3. Motoazada (TMO), dos pases de motoazada (3001-G) a 120 mm de profundidad conducida por un operador y con tiempo real de trabajo de 90 min por parcela.

4. Parcelas sin intervenir o testigo (TGO), consistente en cobertura vegetal natural en crecimiento.

Tabla 1. Propiedades iniciales del suelo antes de los ensayos.

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>	1,27
<i>Densidad real (g/cm³)</i>	2,53
<i>Porosidad total (%)</i>	49,73
<i>Textura</i>	Franco arcillosa
<i>Resistencia a la penetración (a 10 cm, kPa)</i>	170,10
<i>Tamaño de agregados (mm)</i>	
>6,3	24,12
6,3 – 4,0	17,49
4,0 – 2,0	16,55
2,0 – 1,0	13,11
1,0 – 0,5	8,65
< 0,5	20,08
<i>Índice de estabilidad</i>	1,26
<i>Estado de agregación (%)</i>	79,92
<i>Diámetro ponderado medio (mm)</i>	3,43
<i>Diámetro geométrico medio (mm)</i>	1,99

Tabla 2. Características de los equipos y calibraciones realizadas antes de los ensayos de campo.

<i>Parámetros</i>	<i>Rotavator</i>	<i>Grada rotativa</i>	<i>Motoazada</i>
	Howard HR 27		
<i>Marca, modelo y lugar de fabricación</i>	Barcelona, España	Kunh HRB 182 Passo Fundo, Brasil	Agria 3001-G Alemania
<i>Fuente de potencia</i>	Tractor, 5500 Jhon DeereD	Tractor, 5500 Jhon eere	Autopropulsada
<i>Potencia requerida</i>	30 kW	40 kW	5 kW
<i>Velocidad de avance (km/h)</i>	2,22	,2	0,7
<i>Velocidad tangencial de cuchillas (m/s)</i>	3,93	,6	2,8
<i>Velocidad del rotor (r.p.m.)</i>	141	253	164
<i>Profundidad de trabajo promedio (cm)</i>	15	17	12
<i>Ancho teórico de trabajo (m)</i>	1,61	,8	1,0
<i>Número de cuchillas</i>	36	12	32
<i>Tipo de cuchillas</i>	C- ángulo de 135	Recta	C- ángulo de 135
<i>Posición de la tapa</i>	Tapa abajo	--	

Previamente los equipos fueron calibrados y estandarizados teniendo en cuenta varios parámetros técnicos, como: velocidad de avance, velocidad del rotor, profundidad de trabajo, número de cuchillas, tipo de cuchillas y posición de la tapa (Tabla 2).

Después de 30 días de realizadas las labores en cada parcela se tomaron muestras de suelo en cada parcela experimental a una profundidad entre 0 y 10 cm, con el fin de determinar los cambios en las propiedades físicas del suelo.

La resistencia a la penetración se midió en campo con un penetrómetro de cono Royal Gauge con cono de 20 mm de diámetro, medidor de reloj y resolución de 4 psi.

Siguiendo la metodología propuesta por Gómez y Jaramillo (1986) ¹³ se tomaron en campo las muestras al azar en varios sitios de cada parcela, así: para densidad aparente cinco muestras por parcela experimental; para humedad gravimétrica cinco muestras por parcela; distribución de agregados y estabilidad estructural una muestra compuesta por parcela; densidad real cinco muestras al azar en el lote; y textura una muestra compuesta en el lote.

Los métodos empleados en la determinación de las propiedades físicas fueron: cilindro biselado (densidad aparente), picnómetro (densidad real), gravimétrico (humedad), Yoder (estabilidad estructural de agregados), Bouyoucus (textura). Para el análisis de distribución de tamaños de agregados se realizó un tamizado a la muestra de suelo que permitió separar los agregados que la conformaban en varios grupos por tamaño estableciendo así el porcentaje correspondiente a cada grupo. En el cálculo de la porosidad total se empleó la ecuación siguiente:

$$P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) * 100 \quad (1)$$

donde,

P : porosidad total (%), D_a densidad aparente (g/cm³) y D_r : densidad real (g/cm³).

Análisis de resultados

Para cada variable se hizo un análisis de varianza y se usó el estadístico 'F' para probar la hipótesis nula que no existe diferencia entre tratamientos. También se hizo la prueba de amplitud múltiple de Duncan ($p < 0,05$) para la comparación de medias entre tratamientos. Los datos se analizaron utilizando el software S.A.S (Statistical Analysis System) (Tablas 7 y 8).

Resultados

En la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos en el lote de estudio de la densidad aparente, porosidad total, humedad gravimétrica y resistencia a la penetración (profundidad de 0-10 cm).

Tabla 3. Promedios de densidad aparente, porosidad total, humedad gravimétrica y resistencia a la penetración después de los tratamientos (profundidad 0-10 cm).

Propiedades	Tratamientos							
	TRV		TGR		TMO		TGO	
	valor	DE	valor	DE	valor	DE	valor	DE
Densidad aparente (g/cm ³)	1,57 ^a	0,07	1,64 ^a	0,08	1,54 ^a	0,26	1,34 ^a	0,02
Porosidad total (%)	37,94 ^a	3,08	35,18 ^a	3,42	39,26 ^a	10,43	48,88 ^a	1,20
Humedad gravimétrica (%)	18,93 ^a	6,75	19,99 ^a	3,35	13,25 ^a	4,34	20,65 ^a	2,42
*Resistencia a la penetración (kPa)	402,21 ^a	71,76	484,95 ^a	62,56	625,15 ^{ab}	219,05	767,64 ^a	79,61

TRV: rotavator, TGR: grada rotativa, TMO: motoazada, TGO: testigo, DE: desviación estándar
*Valores con letras distintas son significativamente diferentes ($p < 0,05$), según prueba de Duncan.

En la Figura 1 se muestra el efecto de cada tratamiento (TRV, TGR y TMO) y el testigo (TGO) sobre los agregados de diferente tamaño del suelo. En la Tabla 4 se presenta el porcentaje (%) de agregados menores de 0,5 mm por tratamiento y en la Tabla 5 se observa el índice de estabilidad estructural por tratamiento.

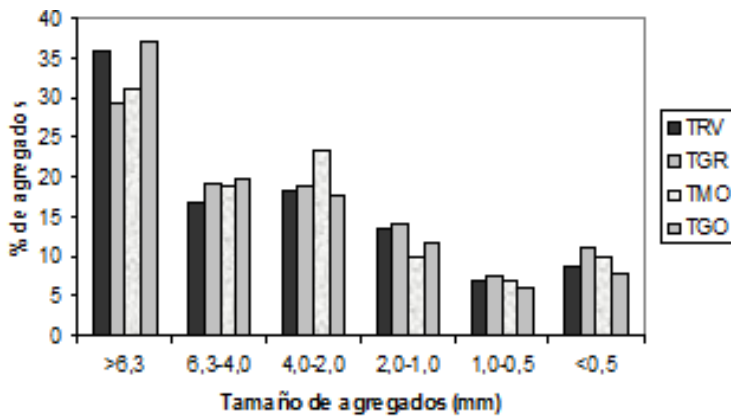


Figura 1. Efecto de los tratamientos sobre los agregados de diferente tamaño del suelo. Profundidad entre 0 y 10 cm.

Tabla 4. Valores promedios de porcentajes de agregados con tamaño inferior a 0,5 mm en cada tratamiento.

<i>Tratamientos</i>	<i>Agregados < 0,5 mm (%)</i>	<i>DE</i>
<i>TRV</i>	8,64 ^a	6,05
<i>TGR</i>	10,98 ^a	5,15
<i>TMO</i>	9,88 ^a	0,34
<i>TGO</i>	7,88 ^a	6,59

TRV: rotavator, TGR: grada rotativa, TMO: motoazada, TGO: testigo; DE: desviación estándar. Valores con igual letra no presentan diferencia significativa ($p>0,05$).

Tabla 5. Promedios de valores de índices de estabilidad estructural por tratamiento.

<i>Propiedades</i>	<i>Tratamientos</i>							
	<i>TRV</i>		<i>TGR</i>		<i>TMO</i>		<i>TGO</i>	
	<i>valor</i>	<i>DE</i>	<i>valor</i>	<i>DE</i>	<i>valor</i>	<i>DE</i>	<i>valor</i>	<i>DE</i>
<i>Índice de estabilidad</i>	1,37 ^a	0,67	1,78 ^a	1,04	1,47 ^a	0,25	1,68 ^a	1,24
<i>Estado de agregación (%)</i>	91,35 ^a	6,03	89,02 ^a	5,15	90,12 ^a	0,34	92,12 ^a	6,59
<i>Diámetro ponderado medio (mm)</i>	4,25 ^a	0,97	3,96 ^a	1,19	4,12 ^a	0,29	4,44 ^a	0,90
<i>Diámetro geométrico medio (mm)</i>	3,1 ^a	1,03	2,86 ^a	1,22	2,9 ^a	0,29	3,27 ^a	0,80

TRV: rotavator, TGR: grada rotativa, TMO: motoazada, TGO: testigo, DE: desviación estándar
Valores con igual letra no presentan diferencia significativa ($p>0,05$).

Discusión

La resistencia a la penetración fue la única propiedad que presentó diferencia significativa ($p < 0,05$) entre las medias de los tratamientos (Tabla 7) y concretamente entre el testigo y los tratamientos TGR y TRV (Tabla 3). Entre los tratamientos de las propiedades densidad aparente, porosidad total, humedad gravimétrica, contenido de agregados finos $< 0,05$ mm, índice de estabilidad, estado de agregación, diámetro ponderado medio y diámetro geométrico medio, no se detectaron diferencias significativas ($p > 0,05$) (Tablas 3 y 7).

Es probable que la falta de significancia en la mayoría de los resultados se debió a que la aplicación de los tratamientos no fue lo suficientemente intensivo y continuo en el tiempo (por la metodología del ensayo) como para marcar diferencias estadísticas. Adicionalmente se debe tener presente la capacidad natural de resiliencia que tiene el suelo, es decir la habilidad de recuperarse y revertir a su estado original después de que las fuerzas perturbantes o presiones externas se han producido. En este sentido Fernández y González (1998)¹⁰ afirman que la resiliencia permite al suelo recobrar su organización o estructura primitiva por procesos de agregación natural una vez se reducen las fuerzas causantes de la degradación.

A continuación se discuten los hallazgos por propiedad, donde se incluye también análisis de las tendencias (tratamientos estadísticamente no significativos) encontradas, y se considera que las explicaciones e hipótesis planteadas serán de interés para tenerse presentes en futuras investigaciones sobre el tema.

Resistencia a la penetración

Debido al corte, levante y aflojamiento del perfil con las cuchillas de las máquinas, los suelos arados presentan menores valores de resistencia (Tabla 3). Se detectó diferencia significativa ($p < 0,05$) entre el suelo testigo y los tratados con rotavator y grada rotativa; entre el TGO y el suelo labrado TMO no se encontraron diferencias, como tampoco entre los suelos TRV, TGR y TMO ($p > 0,05$) (Tabla 8). Se observa que el menor valor de resistencia lo presentó el suelo TRV seguido por una resistencia ligeramente más alta el TGR, lo

que se debió al efecto de labrado de cada máquina (corte, penetración y fragmentación que las cuchillas causan en el suelo), ya que los contenidos de humedad fueron similares en los tratamientos. En la misma Tabla 3 se observa que entre los suelos arados, el TMO tiene la mayor resistencia, lo que es debido al menor contenido de humedad y al bajo efecto disturbador que causa la motozada sobre el suelo. Todos los valores de resistencia de los suelos tratados se encontraron en el nivel medio, entre 0,1 MPa y 2,0 MPa de acuerdo a la clasificación del SSDS²¹.

Densidad aparente

Para el cálculo de la D_a se tomó la D_r ($2,53 \text{ g/cm}^3$) inicial. En la Tabla 3 se observa que el suelo en el tratamiento TGR presentó una tendencia de densidad más alta, en contraste con el tratamiento testigo (TGO). En general, hasta 10 cm de profundidad en el suelo los tratamientos con arados rotativos aumentaron el valor de D_a , pero sin diferencia estadística significativa. Cortés y Malagón (1984)⁷ consideran que en un suelo de textura media, como el del presente estudio, valores $> 1,4 \text{ g/cm}^3$ se consideran altos.

El aumento estadísticamente no significativo de la D_a de los suelos después de los tratamientos se debió, posiblemente, a la desintegración de los agregados (Tabla 4) ya que se observó un mayor contenido de agregados finos ($< 0,5$ mm) en los suelos tratados con arados, evidenciando la desagregación ocasionada por la rotación de las cuchillas sobre el suelo. Lo anterior originó una disminución del volumen de poros entre agregados (macroporosidad) y consecuentemente un incremento no significativo de la densidad aparente en los suelos arados. Para Bernal *et al.* (2008)⁴ el efecto de los arados rotativos es desagregar el suelo, causando el predominio de agregados pequeños e incremento de la microporosidad, al mismo tiempo que disminuye la macroporosidad. Lo que se comprueba al observar los valores de porosidad total obtenidos (Tabla 3) en las parcelas tratadas. Jaramillo (2002)¹⁴ considera que la densidad aparente es válida como parámetro para estimar el grado de deterioro del suelo, teniendo en cuenta que a medida que su valor aumenta se produce una degradación de la estructura.

Porosidad total

No se evidencia diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95% en el resultado de la porosidad para los tratamientos. Sin embargo, en la Tabla 3 se observa que el mayor valor de porosidad correspondió al suelo TGO y el menor al suelo tratado con grada rotativa (TGR). En todos los tratamientos mecanizados la porosidad del suelo fue <40%, valor muy bajo según la clasificación de Kaurichev (1984)⁸. La tendencia en la disminución de porosidad total registrada en las parcelas tratadas en relación con el testigo, también se explica por la desagregación del suelo causada por el accionar de las cuchillas de las máquinas, que ocasionan una disminución en la macroporosidad y como consecuencia, la reducción del porcentaje de porosidad total. Pagliai *et al.* (2004)¹⁷ encontraron que en la capa superficial del suelo (0-10 cm), con labranza convencional, la macroporosidad es significativamente menor que en un suelo con mínima labranza. En este sentido Almanza *et al.* (2006)² consideran que la cuantificación de la porosidad y sus componentes (macro, meso y micro) permite observar en detalle el efecto de una determinada práctica de manejo de suelos.

Humedad gravimétrica

No se presentó diferencia estadísticamente significativa entre los tres tratamientos (TRV, TGR y TMO) y el TGO. Aunque, la mayor acumulación de humedad en el suelo ocurrió en el testigo TGO (Tabla 3), lo cual es debido al efecto de la cobertura vegetal no alterada que reduce la evaporación. La acumulación de residuos vegetales sobre la superficie del suelo reduce la evaporación y conserva la humedad a mediano plazo que, a su vez, incrementa el contenido de materia orgánica, la capacidad para almacenar y retener agua aprovechable y mejora la estructura²⁰. El menor porcentaje de humedad ocurrió con el uso de motozadora (TMO) y los tratamientos TRV y TGR conservaron un contenido de humedad menor que TGO, aunque muy similar a éste.

Distribución de agregados y contenido de agregados finos (Figura 1 y Tabla 4)

La separación de agregados por tamizado en húmedo en varias clases de tamaño (distribución de agregados) y la expresión de los resultados como porcentaje del peso total de la muestra, permiten presentar hipótesis acerca de la estructura de los suelos o correlacionar tratamientos¹. Para Gómez (1995)¹² los agregados <0,5 mm son los más susceptibles a la pérdida por erosión siendo indicadores de la estabilidad estructural del suelo. En la Tabla 4 se incluyen los promedios de porcentajes de agregados <0,5 mm por tratamiento.

El contenido de agregados finos (<0,5mm) fue más bajo en el TGO, aunque no fue diferente con los demás tratamientos ($p>0,05$) (Tabla 4). Esto indica una mejor estructura y menor susceptibilidad a la erosión en los suelos sin disturbar y sugiere la importancia de mínima labranza en la preparación de suelos cultivados.

Por otro lado, el aumento en el contenido de agregados <0,5 mm en los tratamientos TGR, TRV y TMO influyó en el incremento de la D_a y la consecuente disminución de la porosidad total en los suelos que recibieron estos tratamientos.

Índice de estabilidad estructural

Para el cálculo de los índices estructurales del suelo (Tabla 5) se emplearon muestras tamizadas en húmedo. No se encontraron diferencias ($p>0,05$) entre tratamientos, aunque el suelo con TGR presentó un mayor valor. En todos los tratamientos predominaron los agregados de tamaño medio (Tabla 6a). Barthes *et al.* (2002)³ señalan que la susceptibilidad del suelo a la escorrentía y la erosión está estrechamente relacionada con la estabilidad de los agregados de la superficie (0-10 cm). De acuerdo con los porcentajes de agregados finos (Tabla 4) y los valores en la Tabla 6b, el valor de TGR (10,98%) se encuentra entre 10,1 - 20,0, rango clasificado por Montenegro y Malagón (1990)¹⁶ como estabilidad estructural alta clase 2, a diferencia de los suelos testigo y tratados que presentaron estabilidad estructural muy alta, clase 1.

El mayor estado de agregación correspondió al suelo TGO y el menor al TGR (Tabla 5), lo cual indica un mayor porcentaje de agregados >0,5 mm en el primer caso y como era de esperar una mejor agregación de las

partículas del suelo testigo no disturbado por el cultivo. Se observa que el suelo con tratamiento TGR presentó el menor estado de agregación pero a la vez el mayor índice de estabilidad estructural, lo cual aparentemente es contradictorio, sin embargo, esto se explica porque muchos de los macroagregados del suelo (>6,3 mm) fueron convertidos a tamaños intermedios (entre <6,3 mm y >0,5 mm) lo que fundamenta el mayor índice de estabilidad de acuerdo a Pla (1977)¹⁹. En este mismo sentido algunos agregados intermedios y pequeños existentes en el suelo antes de la aplicación de los tratamientos fueron convertidos en microagregados (<0,5 mm), aumentando su contenido y reduciendo el contenido total de agregados >0,5 mm, lo que explica el menor estado de agregación para suelos tratados con TGR según Montenegro y Malagón (1990)¹⁶.

Diámetro ponderado medio (DPM)

A nivel estadístico no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos y el TGO. Al analizar la tendencia general (Tabla 5), se plantea que el valor más elevado lo tiene el tratamiento TGO y el más bajo el tratamiento TGR. Según Pla (1977)¹⁹ cuando se comparan diferentes situaciones y/o tratamientos dentro de un mismo suelo, obviamente valores más bajos de DPM o del porcentaje en los diámetros mayores señalan un deterioro en la estabilidad estructural y desde el punto de la susceptibilidad a la pérdida de suelo, esta será menor para DPM > 2,0 mm.

En la Tabla 5 se observa que el suelo TGR tiene el valor más bajo de DPM, lo que se correlaciona con el estado de agregación para este suelo TGR que también mostró el nivel más bajo, lo que indica la pérdida de agregados de tamaño >0,5mm debido a la reducción del diámetro de sus agregados. Por otro lado, en el suelo testigo se evidenció lo contrario, el mayor índice tanto en el estado de agregación como en el DPM, lo que se manifiesta en el mayor contenido de agregados > 0,5 mm en relación con los otros tratamientos.

La estabilidad de los agregados del suelo testigo y los sometidos a los distintos tratamientos, se considera en relación al diámetro ponderado medio como estable (Tabla 6c) según la clasificación de Montenegro y Malagón¹⁶.

Diámetro geométrico medio (DGM)

No se observó diferencia estadísticamente significativa ($p>0,05$), esta característica no varió entre tratamientos. No obstante el mayor valor se presentó en el TGO y el menor en el suelo arado con grada (Tabla 5). Según Gardner (1956)¹¹ el diámetro geométrico promedio caracteriza mejor el diámetro dominante en los agregados del suelo que el diámetro ponderado promedio. En la Tabla 5 se observa que el diámetro geométrico promedio de los agregados del suelo TGR es bajo, lo que se asocia con el menor estado de agregación en los suelos de este tratamiento.

Tabla 6. Índices estructurales del suelo y su interpretación de acuerdo a sus resultados para cada tratamiento.

<i>Tratamiento</i>	<i>Índice estabilidad^a</i>	<i>Tamaño de agregados*</i>	<i>Estabilidad estructural^b</i>	<i>Clase</i>	<i>Estabilidad estructural^c</i>
TRV	>1	Intermedios	(<10) muy alta	1	(3 - 5 mm) estable
TGR	>1	Intermedios	(10,1 - 20) alta	2	(3 - 5 mm) estable
TMO	>1	Intermedios	(<10) muy alta	1	(3 - 5 mm) estable
TGO	>1	Intermedios	(<10) muy alta	1	(3 - 5 mm) estable

a. índice de estabilidad estructural 19, b. Estabilidad estructural según porcentaje de contenido de agregados finos <0,5 mm 16, c. Estabilidad estructural según diámetro medio ponderado 16.

* Agregados retenidos en tamices con abertura 4 mm, 2 mm, 1 mm, y 0,5 mm.

Tabla 7. Análisis de varianza aplicados a los resultados de propiedades físicas de los suelos.

<i>Fuente de variación</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrados medios</i>	<i>F</i>
<i>Densidad aparente</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	0,14	0,05	2,5 ns
<i>Error</i>	8	0,16	0,02	
<i>Total</i>	11	0,30		
<i>Porosidad total</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	319,67	106,56	3,24 ns
<i>Error</i>	8	263,23	32,90	
<i>Total</i>	11	582,90		
<i>Humedad gravimétrica</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	102,71	34,24	1,68 ns
<i>Error</i>	8	163,26	20,41	
<i>Total</i>	11	265,97		
<i>Resistencia a la penetración</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	221065	73688,33	4,65*
<i>Error</i>	8	126775,75	15846,97	
<i>Total</i>	11	347840,75		
<i>Agregados finos <0,5 mm</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	16,79	5,60	0,21 ns
<i>Error</i>	8	213,45	26,68	
<i>Total</i>	11	230,24		
<i>Índice de estabilidad</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	0,32	0,11	0,14 ns
<i>Error</i>	8	6,34	0,79	
<i>Total</i>	11	6,66		
<i>Estado de agregación</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	16,78	5,59	0,21 ns
<i>Error</i>	8	213,35	26,67	
<i>Total</i>	11	230,13		
<i>Diámetro ponderado medio</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	0,37	0,12	0,15 ns
<i>Error</i>	8	6,53	0,82	
<i>Total</i>	11	6,9		
<i>Diámetro geométrico medio</i>				
<i>Tratamiento</i>	3	0,33	0,11	0,13 ns
<i>Error</i>	8	6,58	0,82	
<i>Total</i>	11	6,91		

* $F_{0,05, 3,8} = 4,07$; $F_{0,01, 3,8} = 7,59$; hay diferencia significativa al 5% de probabilidad, ver prueba de Duncan (tabla 8). *ns*: no significativo.

Tabla 8. Prueba de amplitud múltiple de Duncan para diferencias entre tratamientos (para la resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad).

<i>Conjuntos de rangos significativos. 8 grados de libertad y $\alpha=0,05$.</i>	<i>Rangos de significación mínima.</i>	<i>Resultados de comparaciones.</i>
$r_{0,05} (2,8) = 3,26$.	$R_2 = r_{0,05} (2,8) S_{y_i} = (3,26) (72,68) = 236,93$.	TG0 vs TRV = 767,64 - 402,21 = 365,43 > 252,20 (R4).* TGO vs TGR = 767,64 - 484,95 = 282,69 > 246,38 (R3).*
$r_{0,05} (3,8) = 3,39$.	$R_3 = r_{0,05} (3,8) S_{y_i} = (3,39) (72,68) = 246,38$.	TGO vs TMO = 767,64 - 625,15 = 142,49 < 236,93 (R2). TMO vs TRV = 625,15 - 402,21 = 222,94 < 246,38 (R3).
$r_{0,05} (4,8) = 3,47$.	$R_4 = r_{0,05} (4,8) S_{y_i} = (3,47) (72,68) = 252,20$.	TMO vs TGR = 625,15 - 484,95 = 140,20 < 236,93 (R2). TGR vs TRV = 484,95 - 402,21 = 82,74 < 236,93 (R2)
	TRV TGR TMO TGO 402,21 484,95 625,15 767,64	

Cuadrado medio error: $Mse=15846,97$; $n=3$; grados de libertad=8. Error estándar: $S_{y_i} = \sqrt{(Mse/n)} = \sqrt{(15846,97/3)} = 72,68$. *Diferencia significativa $p < 0,05$

Teniendo presente el análisis de los resultados de cada propiedad podemos concluir que: la motoazada fue el equipo que causó menor efecto de corte, levante y debilitamiento en los agregados del suelo; la diferencia ($p < 0,05$) en la resistencia a la penetración entre el suelo testigo y los suelos tratados con TGR y TRV fue el resultado del corte, penetración y fragmentación que las cuchillas de estas máquinas causaron en el suelo y sus agregados, lo que produjo una menor resistencia a la penetración en estos suelos que en el TGO; así mismo, la resistencia a la penetración no fue diferente ($p > 0,05$) entre el suelo TMO y el TGO, lo cual se debió no sólo al menor efecto de remoción del suelo que causó la motoazada si no también al nivel más bajo de humedad con que se realizaron las mediciones en el suelo TMO, lo que incrementó su resistencia a valores muy similares del TGO; y finalmente los suelos tratados con arados presentaron un índice de estabilidad estructural > 1 con predominio de agregados intermedios, de igual forma observaron una estabilidad estructural calificada como estable según el diámetro medio ponderado.

Agradecimientos

Al DIME (Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín), por financiar los proyectos con códigos 20201007760 y 20201008056. A los integrantes del grupo de Investigación en Arados de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Referencias

1. Alegre JC, Cassel DK. 1986. Effect of land-clearing methods and post clearing management on aggregate stability and organic carbon content of soil in the humid tropics. *Soil Science*; 142 (5):289-295.
2. Almanza E, Bernal J, Arguello O. 2006. Indicadores físicos de sostenibilidad edáfica. Plegable divulgativo No.48. Villavicencio: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

3. Barthes B, Roose E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*; 47:133-149.
4. Bernal N, Chaparro O, Ipaz S, Montealegre G, Ramirez L. 2008. Efecto de cuatro métodos de labranza sobre las propiedades físicas y la pérdida de suelo en la rotación papa-pastos en áreas de ladera en una región alto andina de Colombia. *Acta Agronómica*; 57 (1):35-42.
5. Bonilla R, Murillo J. 1998. Desarrollo de sistemas de manejo para la recuperación de suelos compactados de los departamentos de la Guajira, Cesar y Magdalena. Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Memorias, Santafé de Bogotá.
6. Botero J. 1994. Preparación de suelos. 1ra ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
7. Cortés A, Malagón D. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
8. Kaurichev IS. 1984. Prácticas de edafología. 1ra ed. Moscú: Mir.
9. FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de Tierras y Aguas No. 8. Roma.
10. Fernández R, González P. 1998. Influencia del contenido en materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo. *Cadernos Lab Xeolóxico de Laxe*; 23:101-119.
11. Gardner WR. 1956. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Sci Soc Amer Proc*; 20:151-153.
12. Gómez E. 1995. Conservación de suelos, manual de prácticas de laboratorio y de campo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
13. Gómez E, Jaramillo D. 1986. Manual de prácticas de suelos I. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
14. Jaramillo D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. 1ra ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
15. Lozano F. 2002. Proyecto piloto en labranza cero y otras tecnologías utilizadas en ladera. Programa nacional de maquinaria agrícola y postcosecha Corpoica. [acceso: 8 de mayo de 2006]. <http://www.redepapa.org/lozano.pdf>.
16. Montenegro H, Malagón D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
17. Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Tillage Res*; 79:131-143.
18. Pérez E, Barreiro H. 1986. Análisis de régimen de lluvias de la estación experimental El Espinal, Centro Cotové. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
19. Pla I. 1977. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Maracay: Universidad Central de Venezuela.
20. Rodríguez L, Rizo H. 1999. Subsolador Sp-280 en la preparación de suelos. *Revista Cañaveral*; 5 (3): 50-51.
21. Soil Survey Division Staff (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No.18. Washington D. C: USDA.
22. Vallejo G, Camargo D. 1998. Respuesta del pasto ángleton (*Dichantium aristatum* (Pair) C.E Hubbard) a la fertilización química y biológica de un Alfisol de Santafé de Antioquia. Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 62 p.
23. Villa R. 1998. Labranza del suelo. 4ta ed. Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.