

Respuesta de las propiedades físicas del suelo después de 11 años de manejo bajo siembra directa y rotación de cultivos en Turén, estado Portuguesa, Venezuela

Abelardo Ospina^{1*}, Adriana Florentino¹, Lorenzo Velázquez² y Daniel Araujo²

¹Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101, Aragua. Venezuela

²Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Centro de Investigaciones del estado Portuguesa. Acarigua, Portuguesa, Venezuela

RESUMEN

La degradación de las propiedades físicas del suelo es una de las principales limitaciones en los suelos agrícolas de Venezuela, por lo que hace necesario implementar prácticas de manejo orientadas a su recuperación. Con la finalidad de determinar la respuesta del suelo, expresada en sus propiedades físicas, a 11 años de manejo bajo diferentes sistemas de labranza y rotaciones de cultivos, se realizó un ensayo de larga duración ubicado en Turén, estado Portuguesa. Los sistemas de labranza evaluados fueron labranza convencional y siembra directa, y las rotaciones incluyeron los cultivos maíz-algodón y maíz-frijol. Los tratamientos se establecieron en parcelas dispuestas en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Las propiedades que presentaron cambios asociados al manejo fueron la estabilidad de agregados, el contenido de carbono orgánico, el porcentaje y cantidad de residuos en superficie y la conductividad hidráulica del sello superficial. En todas estas propiedades físicas del suelo se observaron cambios favorables en los sistemas bajo siembra directa en comparación con los suelos sometidos a labranza convencional y al igual que la rotación maíz-algodón donde también se observó una mejora en las mismas propiedades respecto a la rotación maíz-frijol.

Palabras clave: Suelos tropicales, rotación maíz-frijol, rotación maíz-algodón.

Response of soil physical properties after 11 years of and crop rotation in Turén, Portuguesa state, Venezuela

ABSTRACT

Soil physical degradation is a major constraint in agricultural soils of Venezuela, making it necessary to implement management practices that contribute to their recovery. In order to study the impact of different management systems on some soil physical properties, the effects of 11 years of tillage and crop rotation management were evaluated in a long term field experiment located in Turén (Portuguesa state). The evaluated tillage systems were no tillage (NT) and conventional tillage (CT) and the crop rotation treatments were maize-cotton and maize-bean. Treatments were established in plots arranged in a randomized block design with three replicates. The soils properties more sensitive to management were aggregate stability, organic matter content, saturated hydraulic conductivity of surface sealing and crop residues coverage and quantity. Soil physical properties were significantly better under NT than CT and in maize-cotton rotation than in maize-bean rotation.

Key words: Tropical soils, maize-cotton rotation, maize-bean rotation.

*Autor de correspondencia: Abelardo Ospina

E-mail: oabelardo@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, y en particular en la región de los llanos, un aspecto limitante de la producción agrícola es la disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos. La ocurrencia de lluvias estacionales, erráticas, de alta intensidad y corta duración, aunado a una alta demanda evapotranspirativa, reducen la posibilidad de obtener más de una cosecha al año cuando no se dispone de riego (Lobo y Gabriels, 2004). Bajo estas condiciones, el suelo juega un papel muy importante en la regulación del balance hídrico, al controlar la entrada, flujo y retención de agua y su disponibilidad para los cultivos, de allí que su calidad física sea un elemento crítico para superar estas limitaciones.

Se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con el efecto de la implementación de diferentes sistemas de labranza y prácticas conservacionistas sobre las propiedades físicas del suelo (Espinoza *et al.*, 2007, Lipiec *et al.*, 2006; Torres *et al.*, 2006; Bronick y Lal, 2005); no obstante, todavía existen muchas interrogantes al respecto, debido a las diferencias que se observan en el efecto de estas prácticas cuando varían factores, tales como el tipo de suelo, historia de uso y manejo, tipo y profundidad de la labranza y el lapso durante el cual se han implementado prácticas conservacionistas. Este último aspecto representa un elemento crítico, ya que la mayoría de las investigaciones se realizan en lapsos muy cortos, usualmente insuficientes para observar cambios en las propiedades evaluadas (Palma *et al.*, 2009; León y Florentino, 2007; Rivero y Paolini, 1994).

El presente trabajo tuvo por finalidad evaluar cambios en las propiedades físicas de un suelo Fluventic Haplustept ubicado en la Colonia agrícola de Turén, después de 11 años bajo sistemas de manejo conservacionista que incluían la siembra directa y la rotación de cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las evaluaciones se realizaron en el mes de julio de 2006 en el campo experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), ubicado en el municipio Turén del estado Portuguesa, Venezuela, debido a la tradición agrícola de la zona, a los altos niveles de degradación física presente en sus suelos y a las condiciones climáticas presentes. El suelo sobre el cual se llevó a cabo esta investigación pertenece a la familia Fluventic Haplustept, francosa fina, mixta, isohipertérmica (Espinoza *et al.*, 2007) y estuvo sometido a sistemas de labranza convencional antes del establecimiento del ensayo, por lo que presentaba claras evidencias de degradación de sus propiedades físicas. El Cuadro 1 presenta las principales características del suelo evaluado.

El ensayo donde se realizó esta investigación se instaló en 1995. Los tratamientos de labranza utilizados fueron labranza convencional con cuatro pases de rastra de disco (LC) y siembra directa sobre los residuos del cultivo anterior (SD). Los cultivos sembrados en rotación fueron maíz-frijol (MF) y maíz-algodón (MA); el maíz se sembró en la época de lluvia (inicios del mes de junio) y el frijol y algodón inmediatamente después de la cosecha del maíz en la época seca. La identificación de los tratamientos fue T1: labranza convencional con rotación maíz – algodón (LCMA), T2: labranza convencional con rotación maíz – frijol (LCMF), T3: siembra directa con rotación maíz – algodón (SDMA) y T4: siembra directa con rotación maíz – frijol (SDMF). Los tratamientos se establecieron en parcelas de 10 m de ancho por 32 m de largo, dispuestas en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones.

En cada parcela se ubicaron tres sitios de muestreo, en una cuadrícula de 10 x 10 m, georreferenciando cada sitio con un sistema de posicionamiento global (GPS). La toma de muestras de suelo se realizó en el hilo de siembra, cerca de la base del tallo de las plantas de maíz cuando el cultivo tenía 30 días de haber sido sembrado. Para ello se procedió a realizar un corte vertical en el suelo, hasta una profundidad de 45 cm y se identificaron las cuatro primeras capas, considerando diferencias de textura, estructura y distribución de raíces. Las propiedades físicas evaluadas fueron distribución de tamaño de partículas, porosidad total (EPT), macroporosidad (poros con diámetro equivalente mayor a 30 μm , MAC) y microporosidad (poros con diámetro equivalente menor a 30 μm , MIC), densidad aparente (DA), resistencia mecánica a la penetración (RMP), profundidad de enraizamiento (PE), proporción de macroagregados estables al agua (AE250), estabilidad de agregados frente al impacto de la lluvia sin cobertura (K_p) y con cobertura (K_{100}), carbono orgánico total (CO), cantidad de residuos en superficie (IRES) y agua disponible (AD).

La distribución de tamaño de partículas se determinó siguiendo la metodología de Bouyoucos modificada por Day (1965) descrita por Pla (1983) y Gee y Bauder (1986). EPT, MAC y MIC se determinaron en las muestras de suelo no alteradas por medio del procedimiento descrito por Vomocil (1965). La DA se determinó mediante el método del cilindro, en muestras de suelo no alteradas, de acuerdo al procedimiento descrito por Blake y Hartge (1986) y la RMP se determinó en campo utilizando un penetrómetro de punta de cono, según metodología de Bradford (1986). El CO se determinó por combustión húmeda (Allison, 1965).

Los AE250 (agregados estables con diámetro equivalente $> \alpha$ 250 μm) se determinaron tamizando en húmedo agregados con un rango de diámetros equivalentes

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo estudiado (Campo experimental del INIA, Turén, estado Portuguesa)

Característica	Descripción			
Clasificación (USDA)	Fluventic Haplustept, francosa fina, mixta, isohipertérmica			
Profundidad (cm)	0 – 10	10 – 23	23 – 33	33 – 45
Arena (g/kg)	376,0	367,9	430,9	611,8
Limo (g/kg)	502,9	499,0	448,4	311,0
Arcilla (g/kg)	121,2	133,1	120,8	77,2
Clase textural	Franco limoso	Franco	Franco	Franco arenoso
Reacción (pH)	7,29	7,58	7,66	7,70
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,59	0,35	0,28	0,24
Carbono orgánico (g/kg)	18,11	12,15	9,64	6,44
Fósforo disponible (mg/kg)	14,95	3,52	1,82	1,14
Potasio (mg/kg)	15,00	9,76	8,36	7,77
Calcio (mg/kg)	2234,29	1873,90	1766,91	1587,27
Magnesio (mg/kg)	22,38	20,19	18,82	15,77
Sodio (mg/kg)	4,90	4,33	4,45	4,68

Fuente: Ospina, 2009.

entre 2 y 4 mm, utilizando un aparato de tamizado en húmedo marca Eijkelkamp, de acuerdo al procedimiento descrito por Kemper y Rosenau (1986), modificado por Florentino (2007). La estabilidad de agregados frente al impacto de la gota de lluvia se determinó en laboratorio, utilizando agregados con diámetro equivalente entre 2 y 4 mm, siguiendo la metodología descrita por Pla (1983). Para cada muestra se determinó la conductividad hidráulica del sello superficial en dos condiciones: suelo desnudo (K_s) y suelo con 100% de cobertura (K_{100}). La cobertura empleada estaba constituida por residuos de maíz, frijol y algodón colectados en el ensayo. La cantidad de residuos empleada fue de 5 g, lo que equivalía a una dosis aproximada de 7 Mg/ha, cercano al promedio observado en campo. La intensidad de lluvia promedio aplicada fue de 87,8 (\pm 14,4) mm/h.

Para evaluar la cantidad de residuos en superficie (CRS) se procedió a recolectar la totalidad de los residuos que se encontraban sobre el suelo, tomando como referencia un marco metálico de 23 x 23 cm. Posteriormente los residuos se colocaron en una estufa y se secaron a 65°C hasta alcanzar peso constante, para finalmente expresar los resultados en términos de masa de residuos secos por unidad de superficie. Este procedimiento se realizó por triplicado en cada bloque y en cada tratamiento.

La cantidad de AD se evaluó siguiendo la propuesta de Florentino (1998). Para ello se calculó la lámina de agua aprovechable en la profundidad efectiva y la lámina total de agua aprovechable hasta la profundidad de 45 cm y luego se relacionaron mediante la siguiente ecuación para determinar la proporción de agua realmente disponible, según la siguiente ecuación:

$$AD = \frac{\text{Lámina de agua en la profundidad efectiva}}{\text{Lámina de agua en los 45 cm superficiales del suelo}} \times 100$$

Para el cálculo del agua aprovechable se determinaron las curvas características de humedad para cada capa de suelo en cada sitio de muestreo, hasta la profundidad de 45 cm siguiendo el procedimiento descrito por Klute (1986) y Pla (1983). Los potenciales empleados para la elaboración de las curvas fueron -10, -33, -50, -100, -300, -500 y -1500 kPa. La profundidad efectiva se evaluó cuando el cultivo de maíz se encontraba en floración, evaluándose tres plantas en cada sitio de muestreo.

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de varianza, seguido de una prueba de medias de Duncan con un nivel de significancia de 5%, utilizando el software Infostat versión 1.1 (Infostat, 2002). También se realizaron análisis de correlación de algunas variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de tamaño de partículas y clase textural

La distribución de tamaño de las partículas minerales de los suelos (Cuadro 2) muestra un predominio de las fracciones con diámetro equivalente entre 2 y 250 μ m (limo, arena fina y arena muy fina) y un contenido muy bajo de partículas correspondientes a la fracción arcilla, lo cual les confiere una alta susceptibilidad al sellado, debido a la baja cohesión y al bajo nivel de resistencia a la separación y transporte que presentan estos tamaños de partícula cuando el suelo se humedece o es sometido al impacto directo de las gotas de lluvia (Ramos et al., 2003; Morgan, 1997; Ekwue, 1992; Florentino, 1989).

Al analizar los datos en función de la profundidad se observa un incremento del contenido de arena para

Cuadro 2. Distribución de tamaño de partículas y clase textural del suelo en cada tratamiento.

Trat ⁺	Profundidad (cm)	Arcilla (g/kg)	Limo (g/kg)	Arena (g/kg)						Clase textural [‡]
				Total	Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy gruesa	
LCMA	0 – 10	129,2	519,6	351,2	210,5	123,7	14,7	1,8	0,6	FL
	10 – 21	127,2	495,0	377,8	220,3	141,2	14,2	1,6	0,5	F
	21 – 32	109,7	466,5	423,8	218,9	170,8	32,5	1,4	0,2	F
	32 – 45	51,2	304,8	644,0	291,6	328,6	22,9	0,6	0,3	Fa
LCMF	0 – 12	120,0	512,5	367,5	224,7	124,2	14,0	3,0	1,7	FL
	12 – 25	131,5	519,8	348,6	215,1	118,9	12,2	1,6	0,9	FL
	25 – 36	116,6	452,2	431,2	225,7	185,3	18,5	1,2	0,4	F
	36 – 45	67,5	275,1	657,4	330,0	288,9	36,9	1,3	0,3	Fa
SDMA	0 – 9	119,7	508,1	372,3	203,7	145,9	19,3	2,3	1,2	FL
	9 – 22	141,1	512,9	346,1	205,1	122,6	15,9	1,9	0,6	FL
	22 – 33	135,0	494,3	370,8	182,9	164,4	21,3	1,5	0,7	F
	33 – 45	111,7	384,2	504,1	260,7	214,4	27,5	1,0	0,6	F
SDMF	0 – 9	115,7	471,4	413,0	216,5	169,9	22,5	2,8	1,4	F
	9 – 22	132,7	468,2	399,1	206,1	171,1	19,7	1,3	1,0	F
	22 – 33	121,8	380,5	497,7	199,6	258,5	38,5	0,8	0,4	F
	33 – 45	78,3	280,2	641,6	216,0	379,1	44,8	1,2	0,5	Fa

⁺LCMF= Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA= Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF= Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Algodón.

[‡]Franco limoso (FL), Franco (F), Franco arenoso (Fa).

todos los tratamientos, alcanzándose valores superiores a los 500 g/kg entre los 35 y 45 cm de profundidad. Estos cambios en el contenido de arena pueden estar incidiendo en la continuidad del flujo de agua en el suelo y, por ende, en su comportamiento hidrológico.

Carbono orgánico total y residuos en superficie

En relación al carbono orgánico total, los valores obtenidos (Cuadro 3) muestran un contenido desde alto (capa superficial) a medio y bajo, en todos los tratamientos. Cuando se comparan los contenidos de carbono orgánico entre tratamientos, sólo se encontraron diferencias significativas en la primera capa de suelo (0 a 5 cm), hallándose los valores más altos en el tratamiento SDMA.

Al analizar las variaciones en el contenido de CO en función de la profundidad se observa que los cambios entre la capa superficial del suelo y la capa subyacente son más abruptos en los tratamientos bajo siembra directa y más graduales en los que están sometidos a labranza convencional. Estos resultados coinciden con

lo señalado por Espinoza *et al.* (2007), Palma *et al.* (2009), Kay y VandenBygaart, (2002) y Lozano *et al.* (1997) y su estratificación en el perfil puede deberse a las diferencias existentes en cuanto a cantidad, calidad y disposición de los residuos en el suelo y a la velocidad con que éstos se descomponen y son incorporados al mismo bajo los diferentes sistemas de labranza (Blanco-Canqui y Lal, 2007; Soon *et al.*, 2006). En este sentido, la distribución del contenido de carbono orgánico en función de la profundidad evidencia el efecto de las labores de preparación del suelo, ya que los tratamientos bajo labranza convencional presentaron valores similares de carbono orgánico en las dos primeras capas del suelo, como resultado de la mezcla y homogeneización realizada por el equipo de labranza (Franzluebbers, 2002; Kay y VandenBygaart, 2002), en contraste con los tratamientos bajo siembra directa, particularmente en la rotación maíz – frijol, donde el aporte proveniente de los residuos y de las raíces del frijol está limitado a la primera capa, y por ende, los contenidos por debajo de los 10 cm superficiales fueron los más bajos.

Cuadro 3. Contenido de carbono orgánico total (CO) del suelo bajo los diferentes tratamientos.

Trat ¹ .	Profundidad (cm)	CO (g/kg)	Nivel
LCMA	0 – 10	17,47b	Alto
	10 – 21	12,24	Alto
	21 – 32	9,35	Medio
	32 – 45	5,27	Bajo
LCMF	0 – 12	14,61b	Alto
	12 – 25	12,83	Alto
	25 – 36	9,36	Medio
	36 – 45	5,35	Bajo
SDMA	0 – 9	23,19a	Alto
	9 – 22	13,07	Alto
	22 – 33	11,67	Alto
	33 – 45	7,92	Medio

¹LCMF= Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA= Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Algodón.

^{ab}Medias con superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos de la determinación de la CRS, coinciden con el planteamiento anterior y con otros investigadores (Benjamin *et al.*, 2008), ya que tal y como se puede apreciar en la Figura 1, existieron diferencias significativas entre el tratamiento LCMF y el resto de los tratamientos.

Los resultados anteriores son un indicio de que bajo siembra directa la mayor parte de los residuos de cultivo permanecen en la superficie y tardan más en ser incorporados al suelo, y dado que se reduce la roturación y capacidad de aireación del mismo, la velocidad con que éstos se descomponen, es relativamente menor, dando como resultado una acumulación de carbono orgánico en la capa superficial del suelo (Hernández y López, 2002; Kay y VandenBygaart, 2002; Franzluebbbers, 2002). En el caso del tratamiento LCMA los resultados obtenidos fueron estadísticamente similares, debido principalmente al aporte de residuos del cultivo de algodón y al hecho de que después de la cosecha, los restos del mismo no son incorporados inmediatamente al suelo sino que se dejan sobre el terreno hasta la próxima preparación de suelo previa a la siembra del maíz.

En el caso de los tratamientos que involucran la labranza convencional y la rotación con frijol, los aportes de residuos son menores en comparación con el algodón y las labores de preparación permiten la incorporación de

los residuos al suelo, favorecen la exposición de la materia orgánica protegida dentro de los agregados y mejoran temporalmente las condiciones de aireación, lo cual favorece la actividad biológica y permite un mayor contacto entre los residuos y los microorganismos, dando como resultado una disminución en el contenido de carbono orgánico a través del tiempo (Espinoza *et al.*, 2007; Caravaca *et al.*, 2004; Hernández y López, 2002).

Estado estructural del suelo

Para evaluar el estado estructural del suelo se consideró la porosidad total, la distribución del tamaño de poros, la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración. De acuerdo a los valores de EPT (Cuadro 4), todos los tratamientos evaluados presentan una alta porosidad.

Sin embargo, al analizar la distribución de tamaño de poros (MAC y MIC) se puede apreciar un claro predominio de los poros con un diámetro equivalente menor a $30 \mu\text{m}$ (MIC) en todos los tratamientos, lo cual representa una gran limitación durante la época lluviosa si se considera que los poros responsables del flujo de agua y aire en estos suelos (MAC) tienen un valor absoluto inferior al 10% del volumen total del suelo (Florentino, 1998; Pla, 1983).

Respecto a la MAC, sólo se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento LCMA y el resto de los tratamientos, observándose los valores más favorables para éste tratamiento. Esto es de esperarse, considerando que bajo siembra directa el suelo superficial no es roturado y tienden a presentar incrementos en la densidad aparente y una reducción en la porosidad (Fabrizzi *et al.*, 2005; Kay y VandenBygaart, 2002), mientras que bajo la labranza convencional la MAC es mayor debido principalmente al efecto de roturación de la labranza (Lipiec *et al.*, 2006).

No obstante, una mayor proporción de macroporos en el tratamiento LCMA no implica necesariamente una condición más favorable, ya que estos suelos presentan fuertes problemas de sellado y encostrado que reducen el intercambio de agua y aire y determinan que esos macroporos no sean del todo funcionales (Hernández *et al.*, 2000). Adicionalmente, algunas investigaciones señalan que, aún cuando los tratamientos bajo siembra directa pueden presentar menor porcentaje de macroporos, la presencia de bioporos orientados verticalmente y la ausencia de la labranza pueden estar asociados a una mayor continuidad y funcionalidad de los poros, por lo que se convierten en vías preferenciales para el intercambio gaseoso y la entrada y flujo de agua en el suelo (Kay y VandenBygaart, 2002). Por otra parte, en los tratamientos bajo labranza convencional, la ocurrencia de una mayor macroporosidad en las capas superficiales representa una

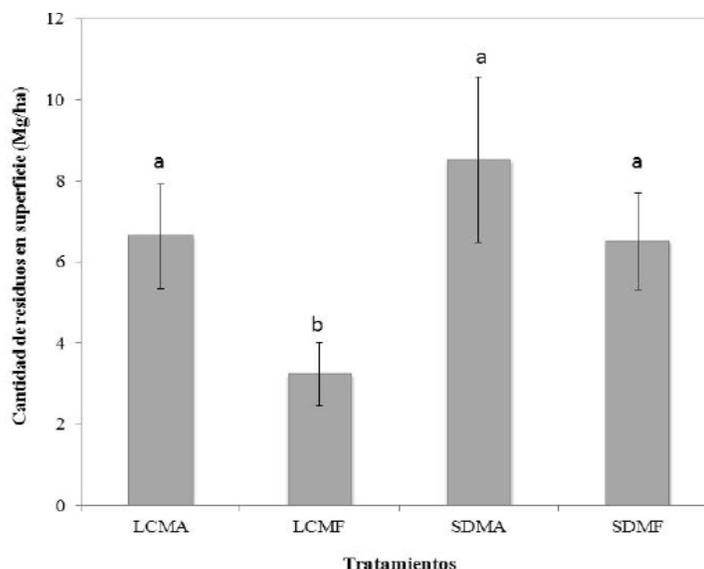


Figura 1. Cantidad promedio de residuos vegetales en superficie para los tratamientos evaluados (^{ab} Superíndices diferentes indican diferencias significativas; $p < 0,05$; LCMF = Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA = Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF = Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA = Siembra directa rotación Maíz – Algodón).

interrupción en el ascenso capilar, por lo que durante las épocas en que se presenten déficits de agua, la posibilidad de aprovechar la humedad presente en las capas más profundas se ve restringida. Bajo siembra directa ocurriría lo contrario, por lo que durante la época seca las plantas podrían tener una mayor disponibilidad de agua (Pagliai *et al.*, 2004).

Con relación a la densidad aparente (Cuadro 5), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las profundidades evaluadas.

Otro aspecto que resulta evidente es la presencia de una capa compactada por debajo de los 10 cm superficiales del suelo en todos los tratamientos, presentándose las mayores diferencias entre las dos primeras capas en los

Cuadro 4. Porosidad total (EPT) y distribución de tamaño de poros (MIC: microporos y MAC: macroporos).

Tratamiento ¹	Profundidad (cm)	EPT (%)	Limitación	MIC (%)	MAC (%)	Limitación
LCMA	0 – 10	47,70	Ninguna	39,62	8,09a	Alta
	10 – 21	47,21	Ninguna	41,13	6,08	Alta
	21 – 32	45,34	Ninguna	37,24	8,10	Alta
	32 – 45	44,60	Ninguna	33,33	11,27	Moderada
LCMF	0 – 12	47,43	Ninguna	41,26	6,17b	Alta
	12 – 25	45,15	Ninguna	39,07	6,08	Alta
	25 – 36	44,21	Ninguna	37,91	6,30	Alta
	36 – 45	43,08	Ninguna	34,15	8,93	Alta
SDMA	0 – 9	44,69	Ninguna	38,32	6,37b	Alta
	9 – 22	44,30	Ninguna	39,13	5,17	Alta
	22 – 33	47,23	Ninguna	39,32	7,91	Alta
	33 – 45	44,19	Ninguna	37,21	6,99	Alta
SDMF	0 – 9	45,48	Leve	39,64	5,85b	Alta
	9 – 22	43,33	Moderada	37,97	5,36	Alta
	22 – 33	43,51	Ninguna	36,64	6,87	Alta
	33 – 45	42,08	Ninguna	31,68	10,41	Moderada

^{ab} Medias con superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

¹LCMF = Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA = Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF = Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA = Siembra directa rotación Maíz – Algodón.

tratamientos bajo siembra directa. Esta capa compactada es el resultado del manejo inadecuado al que estuvo sometido este suelo en épocas anteriores y su persistencia en el tiempo es un indicador de que la siembra directa por sí sola no es una alternativa eficaz para afrontar este tipo de degradación en el corto plazo, aun cuando se reduzca el tráfico de maquinaria sobre el suelo y se utilicen cultivos de raíces profundas, como el algodón, en la rotación (Hamza y Anderson, 2005).

Respecto a la RMP (Cuadro 5), solamente se encontraron diferencias significativas en la capa superficial del suelo, entre el tratamiento SDMA respecto a los demás tratamientos. Esto se asocia a los mayores contenidos de carbono orgánico y a la mayor proporción de agregados estables con un diámetro equivalente mayor a $250 \mu\text{m}$. En este sentido, al comparar la resistencia mecánica a la penetración con el contenido de carbono orgánico total (Figura 2), se puede observar una tendencia a disminuir la resistencia mecánica a la penetración en la medida en que se incrementa el contenido de carbono orgánico.

Estabilidad estructural del suelo

Todos los tratamientos presentaron una baja estabilidad estructural en todas las profundidades evaluadas (Cuadro 6), lo cual es una expresión del predominio de partículas de alta separabilidad en la granulometría de estos suelos como fue señalado previamente (Cuadro 1).

La mayor estabilidad se aprecia en el horizonte superficial, hasta alcanzar valores muy bajos en la última capa como resultado de un bajo contenido de materia orgánica y un alto contenido de arena en detrimento del contenido de arcilla que es relativamente muy bajo. Al comparar los tratamientos, se detectaron diferencias estadísticamente significativas solamente en la capa superficial del suelo. Estos resultados indican que al cambiar hacia la siembra directa se produce un incremento en la estabilidad de los macroagregados al humedecimiento, en respuesta a un mayor contenido de carbono orgánico, a una menor destrucción de la estructura por los implementos de labranza y a un menor impacto de las gotas de lluvia debido al efecto protector de la capa de residuos vegetales presente en la superficie del suelo (Singh y Malhi, 2006; Bronick y Lal, 2005; Maysoon y Rice, 2004; Pagliai *et al.*, 2004; Franzluebbers, 2002; Hernández *et al.*, 2000).

La estabilidad de los agregados frente al impacto de las gotas de lluvia, expresada a través de la conductividad hidráulica del sello superficial (K_0 y K_{100}) también presentó una respuesta similar, aun cuando las diferencias no fueron estadísticamente significativas. En términos generales, los valores encontrados en todos los tratamientos, cuando el suelo no está protegido con algún tipo de cobertura (suelo desnudo), reflejan la baja estabilidad estructural de los agregados frente a la acción de la lluvia. No obstante, los suelos provenientes de los tratamientos bajo siembra directa presentaron valores que, aunque son bajos, superaron a los

Cuadro 5. Densidad aparente (DA), resistencia mecánica a la penetración (RMP) y profundidad de enraizamiento (PE) para cada tratamiento.

Trat ¹ .	Profundidad (cm)	DA (Mg/m ³)	Clase	RMP (MPa)	Nivel de compactación	%H (cm ³ /cm ³)	PE (cm)	Limitación
LCMA	0 – 10	1,49	Moderada	0,63b	Medio	40	16,5	Muy alta
	10 – 21	1,58	Alta	0,92	Medio	38		Muy alta
	21 – 32	1,56	Moderada	0,82	Medio	33		Muy alta
	32 – 45	1,51	Moderada	0,96	Medio	28		Muy alta
LCMF	0 – 12	1,42	Moderada	0,65b	Medio	36	19,0	Muy alta
	12 – 25	1,56	Alta	0,79	Medio	34		Muy alta
	25 – 36	1,57	Moderada	0,83	Medio	33		Muy alta
	36 – 45	1,50	Moderada	0,91	Medio	29		Muy alta
SDMA	0 – 9	1,48	Moderada	0,37a	Medio	38	22,0	Muy alta
	9 – 22	1,60	Alta	0,77	Medio	36		Muy alta
	22 – 33	1,54	Moderada	0,81	Medio	34		Muy alta
	33 – 45	1,48	Moderada	0,89	Medio	29		Muy alta
SDMF	0 – 9	1,47	Moderada	0,69b	Medio	36	21,2	Muy alta
	9 – 22	1,62	Alta	0,85	Medio	34		Muy alta
	22 – 33	1,56	Moderada	0,89	Medio	31		Muy alta
	33 – 45	1,54	Moderada	1,06	Medio	24		Muy alta

^{ab} Medias con superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

¹LCMF= Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA= Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF= Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Algodón.

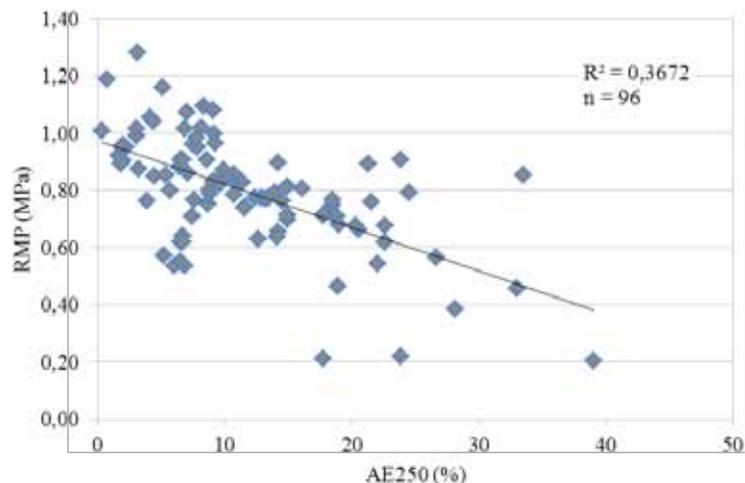


Figura 2. Variación de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) en función del contenido de carbono orgánico total (CO).

tratamientos bajo labranza convencional entre un 20 y 30%. Al realizar la prueba, protegiendo al suelo con una cobertura de residuos vegetales, se apreció una mejora notable en la conductividad hidráulica del sello superficial, ya que pasó de ser baja en todos los tratamientos, a ser media en los suelos provenientes de los tratamientos bajo labranza convencional y alta en los que estaban bajo siembra directa.

Estos resultados resaltan la importancia del mantenimiento de una cobertura de residuos sobre estos

suelos tan inestables, ya que, tal y como se discutió anteriormente, la protección del suelo en los tratamientos bajo siembra directa permite que los macroporos del suelo conserven su funcionalidad frente a la acción de la lluvia. Esto contrasta con los tratamientos bajo labranza convencional donde la formación del sello y la costra, debido a la destrucción de los agregados frente al impacto directo de la gota de lluvia, restringe la entrada de agua y aire al suelo.

Cuadro 6. Proporción de agregados estables al humedecimiento y conductividad hidráulica final del sello superficial (K0: sin cobertura superficial; K100: 100 % de cobertura con residuos vegetales) para cada tratamiento.

Trat. ¹	Profundidad (cm)	AE250 (%)	Nivel	K ₀ (mm/h)	Nivel	K ₁₀₀ (mm/h)	Nivel
LCMA	0 – 10	14,61 b	Muy bajo	2,53	Baja	14,35	Media
	10 – 21	9,44	Muy bajo				
	21 – 32	6,89	Muy bajo				
	32 – 45	4,11	Muy bajo				
LCMF	0 – 12	18,38 b	Muy bajo	2,61	Baja	12,73	Media
	12 – 25	14,64	Muy bajo				
	25 – 36	11,74	Muy bajo				
	36 – 45	10,17	Muy bajo				
SDMA	0 – 9	26,59 a	Bajo	3,33	Baja	25,14	Alta
	9 – 22	13,84	Muy bajo				
	22 – 33	8,18	Muy bajo				
	33 – 45	5,17	Muy bajo				
SDMF	0 – 9	20,60 ab	Bajo	3,16	Baja	21,43	Alta
	9 – 22	10,88	Muy bajo				
	22 – 33	7,22	Muy bajo				
	33 – 45	3,41	Muy bajo				

^{ab} Medias con superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

¹LCMF= Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA= Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF= Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Algodón..

Contenido y retención de agua

Al analizar los valores de agua aprovechable (AA) no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 7). No obstante, al evaluar el agua potencialmente disponible en función de la máxima profundidad de enraizamiento para el cultivo de maíz (AD), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos SDMA y LCMF. Esto se debe posiblemente a una mayor exploración radicular y roturación por parte del cultivo de algodón y también al mayor aporte y contenido de materia orgánica. No obstante, en todos los casos los riesgos asociados a déficit hídricos son altos, particularmente si se toma en cuenta que en esta localidad las lluvias son muy erráticas tanto temporal como espacialmente, y que los resultados obtenidos no solo implican una baja proporción de agua aprovechable, sino que además reflejan la limitación que existe en cuanto al volumen que pueden explorar las raíces en búsqueda de agua y nutrientes.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos demostraron que el uso de la siembra directa y la rotación de cultivos, particularmente la de maíz-algodón, contribuyen a mejorar las propiedades físicas de la capa superficial del suelo.

- Las mejoras encontradas están asociadas principalmente al mayor aporte de residuos orgánicos y a la protección de la superficie del suelo, favoreciendo la formación y estabilización de la estructura y la existencia de condiciones más favorables para el desarrollo de las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido para la realización de esta investigación al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH/UCV) a través del Proyecto individual PI 01-00-6263-2006, al FONACIT, Proyecto G-2002000557 y al INIA-Campo Experimental Turén por el apoyo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allison, L. 1965. Organic carbon. *In*: Black, C.A. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, EUA. pp. 545 – 566.
- Benjamin, J. G.; M. M. Mikha; M. F. Vigil. 2008. Organic carbon effects on soil physical and hydraulic properties in a semiarid climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1357-1362.

Cuadro 7. Agua aprovechable (AA) y potencialmente disponible para las plantas (AD) en los diferentes tratamientos

Tratamiento ¹	Profundidad (cm)	AA (θ , cm ³ /cm ³)	AA (mm)	AD (%)	Nivel
LCMA	0 – 10	0,23	40,78	37,99ab	Bajo
	10 – 21	0,22	43,66		
	21 – 32	0,19	31,83		
	32 – 45	0,22	30,76		
LCMF	0 – 12	0,23	33,38	34,33b	Bajo
	12 – 25	0,20	32,42		
	25 – 36	0,23	38,01		
	36 – 45	0,23	47,80		
SDMA	0 – 9	0,22	29,86	49,51a	Medio
	9 – 22	0,19	41,21		
	22 – 33	0,18	28,52		
	33 – 45	0,20	39,66		
SDMF	0 – 9	0,20	26,87	44,70ab	Medio
	9 – 22	0,17	36,08		
	22 – 33	0,18	31,34		
	33 – 45	0,19	29,51		

^{ab} Medias con superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

¹LCMF= Labranza convencional rotación Maíz – Frijol, LCMA= Labranza convencional rotación Maíz – Algodón, SDMF= Siembra directa rotación Maíz – Frijol, SDMA= Siembra directa rotación Maíz – Algodón.

- Blake, G. R.; Hartge, K. H. 1986. Bulk density. *In* A. Klute (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, EUA. pp. 363 – 382.
- Blanco-Canqui, H.; R. Lal. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no till. *Soil Till. Res.* 95: 240-254.
- Bradford, J. M. 1986. Penetrability. *In*: Black, C.A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, EUA. pp 463-478.
- Bronick, C.; R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3 –22.
- Caravaca, F.; A. Lax; J. Albaladejo. 2004. Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil Till. Res.* 78: 83–90.
- Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In*: Black, C.A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, EUA. pp. 545 – 566.
- Ekvwue, E. 1992. Effect of organic and fertilizer treatments on soil physical properties and erodability. *Soil Till. Res.*, 22: 199 – 209.
- Espinoza, Y.; Z. Lozano; L. Velásquez. 2007. Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia.* 32 : 554 – 559.
- Fabrizzi, K.P; F.O. García; J.L. Costa; L.I. Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57–69.
- Florentino, A. 1989. Efecto de la compactación sobre las relaciones hídricas de tres suelos representativos de Turén (estado Portuguesa). Tesis Doctoral. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 207 p.
- Florentino, A. 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y la sostenibilidad del uso de la tierra. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 15 p.
- Florentino, A. 2007. Método para evaluar la estabilidad de los agregados de suelo por tamizado en húmedo (Equipo Eijkelkamp) - Modificado. Laboratorio de Física de suelo, Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 4 p.
- Franzleubbers, A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Till. Res.* 66: 197–205.
- Gámez, J.; A. Florentino; E. Andreu. 2005. Efecto de sistemas de labranza alternativos sobre la calidad física del suelo y el rendimiento de maíz en El Sombrero, estado Guárico. XVII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Soc. Ven. Ciencia del Suelo. Maracay, estado Aragua, Venezuela. 5 p.
- Gee, G. W. ; Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. *In* Klute A. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, EUA. pp 383-411.
- Hamza, M.A. ; W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hernández, R. M.; D. López-Hernández. 2002. El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: Un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia,* 57: 529 – 536.
- Hernández, R.M.; A. Florentino; D. López-Hernández. 2000. Efectos de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de un ultisol en el estado Guárico-Venezuela. *Agronomía Trop.* 50: 9-29.
- Infostat. 2002. InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas. Argentina.
- Kay, B.D.; A. J. VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107 – 118.
- Kemper, W. D.; Rossenau, R. C. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In* Klute A. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, EUA. pp 425-461.
- Klute, A. 1986. Water relations: Laboratory methods. *In* Klute A. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, EUA. pp 635-662.
- León, M.; A. Florentino. 2007. Variables físicas en inceptisoles cultivados con maíz bajo diferentes intensidades de labranza. Memorias XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo. Guanajuato, México.
- Lipiec, J.; J. Kús; A. Slowinska-Jurkiewicz; A. Nosalewics. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Till. Res.* 89: 210 – 220.
- Lobo, D.; D. Gabriels. 2004. Estimación de la erosividad y concentración de la precipitación en dos zonas agrícolas de Venezuela. Memorias XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Cartagena de Indias, Colombia 4 p.

- Lozano, Z., D. Lobo; I. Pla. 2000. Diagnóstico de limitaciones físicas en inceptisoles de los llanos occidentales venezolanos. *Bioagro* 12 (1):15 – 24.
- Lozano, Z.; S. Cabrera; J. Peña; M. Adams. 1997. Efecto de los sistemas de labranza sobre dos inceptisoles de los llanos occidentales de Venezuela. II. Propiedades físicas de los suelos. *Venesuelos* 5 (1 y 2): 25-33.
- Maysoon, M. M.; Ch. Rice. 2004. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 809-816.
- Morgan, R. 1997. *Erosión y Conservación del Suelo*. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. 343 p.
- Ospina, A. 2009. Evaluación de la calidad física e hidrológica del suelo mediante el uso de indicadores bajo diferentes sistemas de manejo en Turén, edo. Portuguesa. Trabajo de Ascenso. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. 112 p.
- Pagliai, M.; N. Vignozzi; S. Pellegrini. 2004. Soil Structure and the effects of management practices. *Soil Till. Res.* 79 : 131 – 143.
- Palma, Z.; A. Florentino; A. Ospina; M. Pérez. 2009. Evaluación de las propiedades físicas del suelo después de diez años bajo siembra directa de maíz en Turén, edo Portuguesa. Memorias XVIII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Universidad Sur del Lago, Santa Bárbara del Zulia. 1 p.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en ambientes tropicales. *Rev. Fac. Agron. Univ. Central de Venezuela.* 32. 91 p.
- Ramos M.C.; S. Nacci; I. Pla. 2003. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces. *Catena* 53: 365 – 376.
- Rivero, C.; J. Paolini. 1994. Efecto de la incorporación de residuos vegetales sobre algunas propiedades físicas de tres suelos venezolanos. *Venesuelos* 2: 26-31.
- Singh, B.; S.S. Malhi. 2006. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil Till. Res.*, 85: 145 – 153.
- Soon, Y. K.; M. A. Arshad; A. Haq; N. Lupwayi. 2006. The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil. *Soil Till. Res.* 94: 320-335.
- Strudley, M.; T. Green; J.C. Ascough I. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.* 99: 4 – 48.
- Torres, D.; A. Florentino; M. López. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. *Bioagro* 18: 83 – 91.
- Vomocil, J. 1965. Porosity. *In*: Black, C.A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, EUA. pp. 299 – 314.