

INFLUENCIA DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA Y EL PASTOREO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO DE SABANA

INFLUENCE OF COVER CROPS AND GRAZING ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES IN SAVANNA SOIL

Zenaida Lozano^{1*}, Humberto Romero¹, Carlos Bravo²

¹Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. (lozanoz@agr.ucv.ve). ²Centro de Estudios para el Desarrollo de la Agroecología Tropical, Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. Caracas, Venezuela.

RESUMEN

Los sistemas de producción basados en el monocultivo y pastoreo de los restos de cosecha han producido graves problemas de degradación de suelos en las sabanas venezolanas. Como alternativas para prevenir la degradación y mejorar la calidad de estos suelos se han propuesto algunos sistemas de manejo conservacionista. Con el objetivo de evaluar el cambio en las propiedades físicas del suelo típico de una sabana natural por el uso de cultivos de cobertura (*Brachiaria dictyoneura* y *Centrosema macrocarpum*) como residuos para la siembra directa de maíz (*Zea mays* L.) y posterior pastoreo con bovinos, se instaló un ensayo en un suelo clasificado como Typic Plinthustults, ubicado en las sabanas de Guárico (Venezuela). Se caracterizaron las propiedades físicas iniciales de los suelos de sabana natural antes del establecimiento del ensayo (2002) y se evaluaron (en dos épocas del ciclo 2006-2007; antes y después del pastoreo) la densidad aparente, la conductividad hidráulica saturada, la porosidad y su distribución, la resistencia a la penetración mecánica y el contenido volumétrico de humedad, en muestras recolectadas a 0 a 5 y de 5 a 15 cm de profundidad en cada parcela. El análisis de los resultados indica que hubo diferencias estadísticas en las propiedades físicas evaluadas, atribuibles al cultivo de cobertura y a la época; especialmente en la densidad aparente, la conductividad hidráulica saturada, la porosidad total y la resistencia mecánica. Las mejores condiciones físicas se presentaron en la capa superficial del suelo (0 a 5 cm) y en la cobertura *B. dictyoneura*.

Palabras clave: *Brachiaria dictyoneura*, *Centrosema macrocarpum*, calidad del suelo, manejo conservacionista, siembra directa.

ABSTRACT

Production systems based on single crops and grazing of crop leftovers have produced grave soil degradation problems in soils of Venezuelan savannas. As alternatives to prevent degradation and improve the quality of these soils, some conservation management systems have been proposed. With the objective of evaluating changes in physical properties of a typical soil of a natural savanna, from use of cover crops (*Brachiaria dictyoneura* and *Centrosema macrocarpum*) as residues for direct corn (*Zea mays* L.) sowing and later grazing with cattle, a trial was set up in a soil classified as Typic Plinthustults, located in the savannas of Guárico (Venezuela). The initial physical characteristics of natural savanna soils were characterized, before establishing the trial (2002) and the following were evaluated in samples collected in each plot (in two seasons of the 2006-2007 cycle; before and after grazing): bulk density, saturated hydraulic conductivity, porosity and its distribution, resistance to mechanical penetration, and humidity volume content, in samples taken at 0 to 5 and 5 to 15 cm of depth, in each parcel. Analysis of the results indicates that there were statistical differences in the physical properties evaluated, which could be due to the cover crop and the season; especially bulk density, saturated hydraulic conductivity, total porosity and mechanical resistance. The best physical conditions were present in the superficial layer of the soil (0 to 5 cm) and in the *B. dictyoneura* cover.

Key words: *Brachiaria dictyoneura*, *Centrosema macrocarpum*, soil quality, conservation management, direct drilling.

INTRODUCTION

Savanna ecosystems that have good drainage constitute a broad agricultural expansion zone, characterized by the fragility of their soil and

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2008. Aprobado: Enero, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 135-146. 2010.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de sabanas bien drenadas constituyen una amplia zona de expansión agrícola, caracterizada por la fragilidad de sus componentes suelo y vegetación. En Venezuela ocupan 7.13 % del territorio y sustentan 11 % del rebaño bovino nacional, y su productividad agrícola está limitada por una marcada estacionalidad climática y suelos de baja fertilidad natural (Chacón *et al.*, 1991; López-Hernández *et al.*, 2005). En el manejo de las unidades de producción cereal-ganado características de la región, se ha generalizado el uso de tecnologías de altos insumos y prácticas como la deforestación, la quema y la labranza convencional. Este tipo de manejo constituye, cada vez más, el foco de serios problemas de degradación ambiental y deterioro del suelo, en muchos casos irreversibles (López-Hernández *et al.*, 2005). En las zonas de pastoreo; el pisoteo, la defoliación y el retorno de nutrientes de las heces de los animales al suelo y a las fuentes de agua, pueden considerarse como los principales efectos, pero su intensidad depende de la zona y la especie cultivada (Alegre y Lara, 1996; Bilotta *et al.*, 2007). El pisoteo tiene un efecto en las propiedades físicas del suelo, lo que incide indirectamente en el potencial de desarrollo de las raíces y reduce su profundidad de penetración, disminuye la capacidad exploratoria, al reducir el rendimiento y la productividad del pastizal. La compactación y su efecto en la planta dependerán de la carga animal, tipo de suelo, contenido de humedad, cobertura vegetal y composición botánica, así como la estación del año (Alegre y Lara, 1996; Da Silva *et al.*, 2003; Franzluebbbers y Stuedemann, 2008). Según Alegre y Lara (1996), Bilotta *et al.* (2007) y Franzluebbbers y Stuedemann (2007) a este tipo de agricultura se le atribuye efectos negativos en las propiedades del suelo, y se ha sugerido el uso de prácticas de manejo conservacionista (cultivos de cobertura y siembra directa, entre otros), para mejorar la calidad del suelo y la productividad de los agroecosistemas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar cambios en las propiedades físicas de un suelo de las sabanas del estado Guárico, Venezuela, generados por la introducción de cultivos de cobertura, efectuando la siembra directa de maíz y permitiendo un pastoreo posterior con bovinos, en comparación con el manejo tradicional de la sabana.

vegetation components. In Venezuela, they occupy 7.13 % of the territory and sustain 11 % of the national cattle population, and their agricultural productivity is limited by marked climate seasonality and soils of low natural fertility (Chacón *et al.*, 1991; López-Hernández *et al.*, 2005). In the management of cereal-livestock production units which are characteristic of the region, the use of high input technologies and practices such as deforestation, burning and conventional tilling has become generalized. This type of management constitutes, more and more, the focus of serious problems in environmental degradation and soil deterioration, in many cases irreversible (López-Hernández *et al.*, 2005). In grazing areas, trampling, defoliation and the return of nutrients from animal feces to the soil and water sources can be considered the main effects, but their intensity depends on the zone and the species cultivated (Alegre and Lara, 1996; Bilotta *et al.*, 2007). Trampling has an effect on the physical properties of soil, which has a direct influence on root development potential and reduces their penetration depth and decreases the exploratory capacity by reducing the yield and productivity of the pasture. Compacting and its effect on the plant will depend on animal load, type of soil, humidity content, vegetation cover and botanical composition, as well as the season of the year (Alegre and Lara, 1996; Da Silva *et al.*, 2003; Franzluebbbers and Stuedemann, 2008). Alegre and Lara (1996), Bilotta *et al.* (2007), and Franzluebbbers and Stuedemann (2007), indicate that this type of agriculture, which is attributed with having negative effects on soil properties, has been studied by many researchers who have suggested the use of conservation management practices (cover crops and direct sowing, among others), in order to improve the quality of soil and the productivity of agroecosystems. The objective of this study was to evaluate changes, generated by the introduction of cover crops, in physical properties of a soil in the savannas of the state of Guárico, Venezuela, by carrying out direct sowing of corn and allowing later grazing by cattle, and comparing to traditional management of the savanna.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in a trial established in 2002, at the Iguana Experimental Station in Santa María de Ipire,

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se efectuó en un ensayo iniciado en 2002 en la Estación Experimental La Iguana, Municipio Santa María de Ipire, estado Guárico, Venezuela (8° 25' N y 65° 25' O); en un suelo clasificado como Typic Plinthustults, de textura franco gruesa, caolínico, isohipertérmico, con una altitud de 80 a 120 m, un clima estacional, con una época de sequía y otra de lluvia (3 a 6 meses húmedos), precipitación anual promedio de 1369 mm, y una temperatura media mensual de 27.3 °C, un relieve suavemente ondulado y con pendientes de 2 % (Hernández *et al.*, 2005). El suelo presenta baja fertilidad natural y pH entre 4.5 y 5.8. En la vegetación natural de la zona predomina el *Trachypogon* sp. (Chacón *et al.*, 1991).

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3×2 (3 niveles por cobertura y 2 niveles por época). La necesidad de usar unidades experimentales suficientemente grandes para evaluar el efecto del manejo sobre los componentes vegetal, animal y las propiedades del suelo es un problema discutido en la literatura (Carpenter, 1998). Por ello, las dimensiones de las parcelas por cobertura fueron de 2 ha (100 m × 200 m) para la sabana natural (SN) y de 2.6 ha (350 m × 75 m) para los cultivos de cobertura introducida (*Brachiaria dictyoneura*: BD; *Centrosema macrocarpum*: CM). Dentro de cada tipo de cobertura se establecieron 12 parcelas de muestreo (15 m × 60 m). Para seleccionar las dimensiones, orientación de las parcelas, número de muestras y profundidad de muestreo, se realizó un estudio previo de variabilidad espacial de suelos (Hernández *et al.*, 2005). Las coberturas introducidas se seleccionaron por su abundante producción de biomasa y adaptabilidad a la zona (Bravo *et al.*, 2004), y la sabana natural se consideró como testigo. Para establecer las coberturas se realizó una preparación convencional del terreno (dos pases cruzados de rastra), se incorporó roca fosfórica (300 kg ha⁻¹) con un pase de rastra. Se usó 4 kg ha⁻¹ de semillas de BD y 3 kg ha⁻¹ de semillas de CM. En la SN se usó el manejo tradicional de la zona (quema controlada). Desde el 2005 se sembró maíz anualmente en las parcelas con las coberturas introducidas (BD y CM), con la fertilización básica recomendada para la zona: N 150 kg ha⁻¹, P 65 kg ha⁻¹, K 83 kg ha⁻¹; con dos períodos de pastoreo anuales, uno en la época prehúmeda (mayo-junio) antes de la siembra del maíz y el otro en la época posthúmeda (noviembre-diciembre) luego de la cosecha.

Para las evaluaciones de este trabajo se establecieron las siguientes épocas de muestreo: en mayo del 2002 (inicial); antes del pastoreo (AP) y después del pastoreo (DP) del ciclo 2006-2007. El pastoreo fue intensivo, con la introducción en cada parcela de un rebaño de bovinos equivalente a 8 UA ha⁻¹,

Guárico state, Venezuela (8° 25' N and 65° 25' W), in a soil classified as Typic Plinthustults, of coarse loamy texture, kaolinitic, isohyperthermic, with an altitude of 80 to 120 m, seasonal climate with dry season and a rainy season (3 to 6 wet months), annual average precipitation of 1369 mm, and an average monthly temperature of 27.3 °C, a softly undulated relief and with 2 % slopes (Hernández *et al.*, 2005). The soil presents low natural fertility and a pH between 4.5 and 5.8. In the area's natural vegetation, *Trachypogon* sp. predominates (Chacón *et al.*, 1991).

The experimental design was completely randomized with a factorial arrangement of 3×2 (3 levels per coverage and 2 levels per season). The need to use experimental units that were sufficiently large in order to evaluate the effect of management over plant, animal and soil components' characteristics is a problem discussed in the literature (Carpenter, 1998). Therefore, the dimensions of the plots per coverage were 2 ha (100 m × 200 m) for natural savanna (NS) and 2.6 ha (350 m × 75 m) for introduced plant cover (*Brachiaria dictyoneura*: BD; *Centrosema macrocarpum*: CM). Within each type of plant cover, 12 sampling plots were established (15 m × 60 m). For the selection of dimensions, plot orientation, number of samples and depth of the sampling, a previous study on spatial variation of the soils was carried out (Hernández *et al.*, 2005). Introduced plant covers were selected because of their large biomass production and adaptability to the zone (Bravo *et al.*, 2004), and the natural savanna was considered as witness. For the establishment of plant covers, a conventional preparation of the field was done (two crossed disk harrowing passes), and phosphoric rock was incorporated (300 kg ha⁻¹) with one pass of disk harrowing. Four kg ha⁻¹ of BD seeds were used and 3 kg ha⁻¹ of CM seeds. Traditional management of the zone was used in NS (controlled burning). Since 2005, corn was sown annually in the plots with introduced plant coverage (BD and CM), with the basic fertilization scheme recommended for the area: N 150 kg ha⁻¹, P 65 kg ha⁻¹, K 83 kg ha⁻¹; with two annual grazing periods, one during the pre-humid season (May to June) before corn sowing and another in the post-humid season (November to December) after the harvest.

For the evaluations in this study, the following sampling dates were established: May 2002 (initial); before grazing (BG); and, after grazing (AG) in the 2006-2007 cycle. Grazing was intensive, with the introduction in each plot of a cattle herd equivalent to 8 UA ha⁻¹, which consumed *ad libitum* the available biomass from corn and plant cover harvest residues. In every season, measurements were made and soil samples were taken which were not altered (in 5×5 cm cylinders) and disaggregated (composite) for lab analysis. In each of the 12 sampling plots, depending on the plant cover, three samples were taken at a depth of 0 to 5 and 5 to 15 cm. Some physical

consumiendo *ad libitum* la biomasa disponible proveniente de los residuos de cosecha del maíz y las coberturas. En todas las épocas se realizaron mediciones y se tomaron muestras de suelo no alteradas (en cilindros de 5×5 cm) y disgregadas (comuestas), para los análisis de laboratorio. En cada una de las 12 parcelas de muestreo por tipo de cobertura se tomaron tres muestras a 0 a 5 y 5 a 15 cm de profundidad. Se caracterizaron algunos indicadores físicos y en el caso correspondiente se evaluó: 1) resistencia a la penetración en campo con un penetrómetro de impacto de punta cónica de 0.78 cm² de área de base (Nacci y Pla, 1991); 2) la distribución de tamaño de partícula fue evaluada por el método del hidrométrico de Bouyoucos (Plá, 1983); capacidad de campo y punto de marchitez permanente determinados como el contenido de humedad retenido en muestras no alteradas de suelo saturadas por capilaridad y luego equilibradas en olla de presión a potenciales mátricos de -33 y -1500 kPa (96 h a cada presión); 3) densidad aparente; distribución de tamaño de poros determinados en mesa de tensión a saturación (Pt: porosidad total) y a un potencial mátrico de -10 kPa (Pa: poros de radio >15 μm), y la porosidad de retención se calculó por la diferencia Pt-Pa; 4) conductividad hidráulica saturada realizada en un permeámetro de carga constante y el contenido volumétrico de humedad se obtuvo multiplicando la humedad obtenida por el método gravimétrico por la densidad. Todas las determinaciones se hicieron por los métodos descritos por Pla (1983). Los resultados se analizaron con el programa SPSS® 11.0 para Windows, usando la prueba de Tukey para comparar medias (p≤0.05) entre tipos de cobertura y épocas de evaluación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial

El suelo evaluado presenta una textura gruesa (aF) con más de 80 % de arena total, con predominio de los contenidos de arena fina (cerca de 50 %) sobre el resto de las fracciones de arena en ambas capas (Cuadro 1).

Los valores de la densidad aparente son menores que el límite crítico señalado por Pla (1983) para esta clase textural de 1.60 Mg m⁻³, lo que indica que el suelo no presenta problemas de compactación natural superficial, pero el valor de densidad aparente subsuperficial está muy cercano al valor crítico. Los poros de radio equivalente mayor a 15 μm (poros de aireación), mayores de 10 %, indican que no hay problemas de aireación. La conductividad hidráulica saturada es alta y superior al límite

indicadores fueron caracterizados y en el correspondiente caso se evaluó: 1) resistencia a la penetración en campo con un impact penetrometer with a cone tip of 0.78 cm² of basal area (Nacci and Pla, 1991); 2) distribution of the particle size was evaluated by the Bouyoucos hydrometer method (Pla, 1933); field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) were determined as the humidity content retained in non-altered samples of soil saturated by capillarity and then equilibrated in a pressure cooker at matrix potentials of -33 and -1500 kPa (96 h in each pressure); 3) bulk density; pore size distribution determined in a tension to saturation table (Pt: total porosity) and a matrix potential of -10 kPa (Pa: pores of >15 μm radius), and the retention porosity was calculated by the Pt-Pa difference; 4) saturated hydraulic conductivity was done with a permeameter of constant load, and the humidity volume content was obtained by multiplying the humidity obtained through the gravimetric method by the density. All determinations were carried out through the methods described by Pla (1983). The results were analyzed with SPSS® 11.0 for Windows, using the Tukey test to compare averages (p≤0.05) between types of plant cover and evaluation seasons.

RESULTS AND DISCUSSION

Initial characterization

The soil evaluated has a coarse texture (aF) with more than 80 % total sand, and predominance of fine sand contents (nearly 50 %) over the rest of the sandy fractions in both layers (Table 1).

The values of bulk density are less than the critical limit established by Pla (1983) for this texture class, of 1.60 Mg m⁻³, indicating that the soil does not present natural superficial compacting problems, but the sub-superficial bulk density value is very close to the critical value. The pores with equivalent radius greater than 15 μm (aeration pores), larger than 10 %, indicate that there are no aeration problems. The saturated hydraulic conductivity is high and superior to the critical limit of 0.5 cm h⁻¹ established by Pla (1983), which is associated with the soil texture and the high porous values of aeration, favoring high water penetration and movement in the soil profile.

Physical properties of the soil

Statistical analyses of the structural indexes were carried out to evaluate the effects of the type

Cuadro 1. Características físicas iniciales (mayo 2002) del suelo ubicado en la Estación Experimental La Iguana (Guárico, Venezuela); n=96 muestras.
Table 1. Initial physical characteristics (May 2002) of the soil located in the Estación Experimental La Iguana (Guárico, Venezuela); n=96 samples.

Concepto	Valores [†] según la profundidad (cm)				
	0 a 5		5 a 15		
Arcilla (%)	6.83	(3.46)	9.40	(8.42)	
Limo (%)	10.64	(2.50)	8.64	(3.01)	
Arena total (%)	82.47	(4.59)	82.52	(10.57)	
Distribución de arenas (%)	arena muy fina	3.48	(0.77)	5.43	(3.71)
	arena fina	51.49	(6.92)	49.21	(10.94)
	arena media	23.40	(5.37)	22.55	(10.25)
	arena gruesa	3.63	(2.60)	3.88	(2.24)
	arena muy gruesa	0.57	(0.43)	0.91	(0.71)
Clase textural	aF		aF		
Capacidad de campo (CC; % p p ⁻¹)	14.29	(1.58)	13.33	(0.89)	
Punto de marchitez permanente (PMP; % p p ⁻¹)	8.93	(1.37)	8.56	(1.66)	
Agua aprovechable (AA, % p p ⁻¹)	5.36	(1.42)	4.77	(1.17)	
Densidad aparente (Da; Mg m ⁻³)	1.51	(0.07)	1.59	(0.18)	
Conductividad hidráulica saturada (Ksat; cm h ⁻¹)	10.38	(6.34)	6.71	(1.42)	
Porosidad total (Pt, % v v ⁻¹)	44.77	(7.37)	39.33	(6.52)	
Poros de radio >15 μm (Pa; % v v ⁻¹)	15.70	(3.41)	11.53	(1.15)	
Poros de radio <15 μm (Pr; % v v ⁻¹)	29.64	(4.01)	29.06	(2.63)	

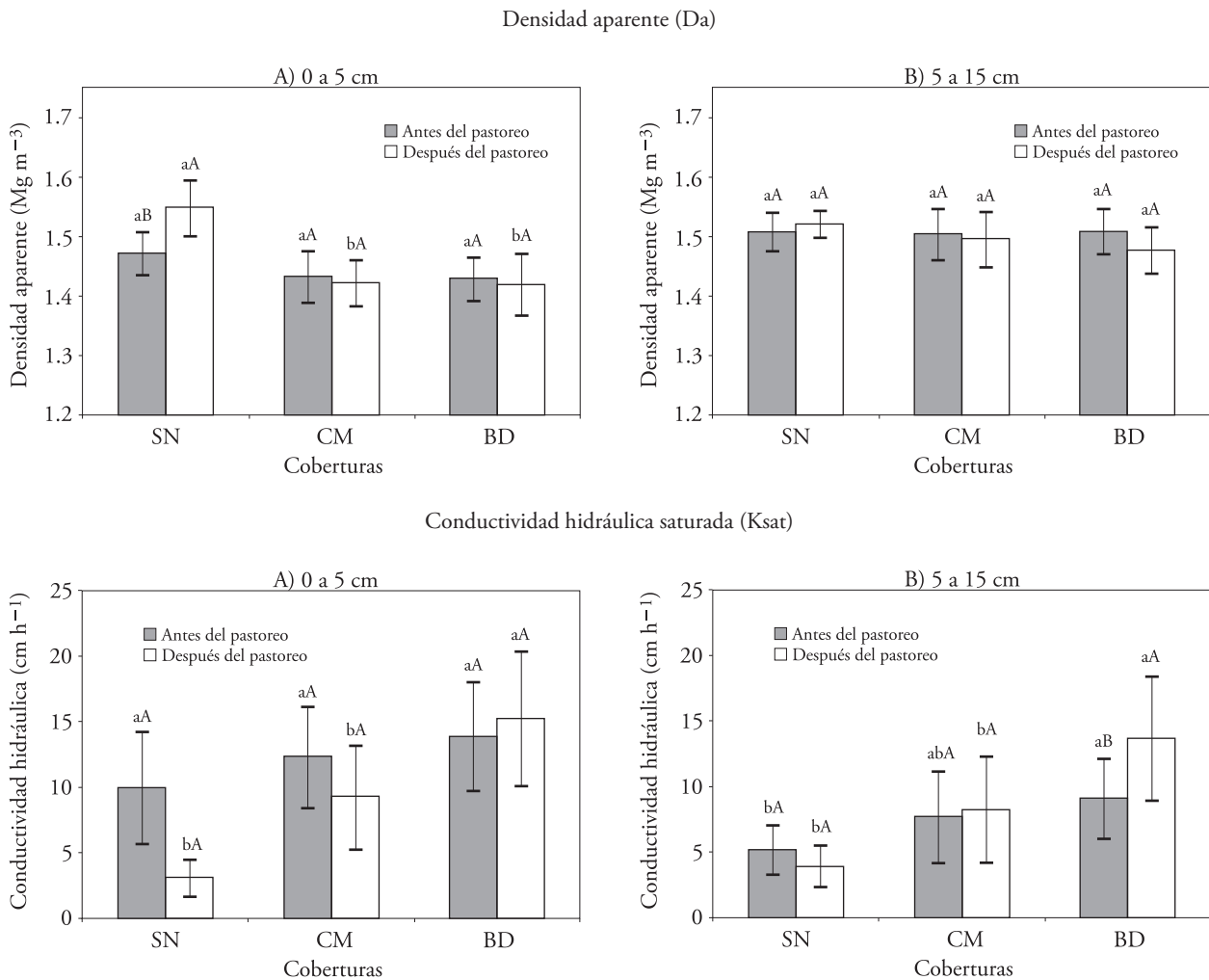
[†] Desviación estándar entre paréntesis; aF: arena francosa ❖ Standard deviation between parenthesis; aF: loamy sand.

crítico de 0.5 cm h⁻¹ establecido por (Pla, 1983), lo cual está asociado con la textura del suelo y los altos valores de porosidad de aireación, lo que favorece una alta penetración y movimiento de agua en el perfil del suelo.

Propiedades físicas del suelo

Los análisis estadísticos de los índices estructurales se realizaron para evaluar los efectos del tipo de cobertura y de la época de evaluación (sin y con pastoreo) y de la interacción entre ambos factores, en cada profundidad de muestreo. En densidad aparente (Da) hubo diferencias estadísticas significativas entre tipos de cobertura en la capa de 0 a 5 cm, con los mayores valores en sabana natural y similares en *C. macrocarpum* y *B. dictyoneura* (Figura 1). Entre épocas hubo un aumento de Da en la sabana natural a causa del pastoreo en los primeros 5 cm, debido posiblemente a la combinación de una menor calidad (relación C:N SN=41, CM=11, BD=27) y baja biomasa disponible (SN=645 g m⁻², CM=584 g m⁻², BD=2011 g m⁻²) para el ganado en este tipo de cobertura, por lo que los bovinos tuvieron que transitar varias veces la parcela,

of plant cover and the season being evaluated (with and without grazing) and of the interaction between both factors, in each one of the sampling depths. In bulk density (Da), there were significant statistical differences between the types of plant covers in the 0 to 5 cm layer, with the greatest values in natural savanna and similar for *C. macrocarpum* and *B. dictyoneura* (Figure 1). Between seasons, there was an increase in natural savanna due to the grazing on the top 5 cm, possibly because of the combination of a lesser quality (C:N relation NS=41, CM=11, BD=27) and low available biomass (NS=645 g m⁻², CM=584 g m⁻², BD=2011 g m⁻²) for livestock in this type of plant cover, which is why cattle had to go through the parcel several times, compacting the soil; these differences were not present in the second layer (5 to 15 cm). The increase in this variable with depth can be attributed to the greater content of clay, and was similar to the one mentioned by Bravo *et al.* (2004) and Franzluebbbers and Stuedemann (2008). The Da values after two years with direct corn sowing management over cover crops were less than the initial ones and those with natural savanna cover; primarily in the superficial horizon,



Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre tipos de cobertura para una misma época; las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre épocas para un mismo tipo de cobertura ($p \leq 0.05$). ♦ Small letters indicate significant differences between types of plant cover for the same season; capital letters indicate significant differences between seasons for the same type of plant cover ($p \leq 0.05$).

Figura 1. Variación de la densidad aparente y conductividad hidráulica saturada, en las coberturas sabana natural, *Centrosema macrocarpum* y *Brachiaria dictyoneura*, en las épocas y profundidades consideradas (ciclo 2006-2007).

Figure 1. Variation in bulk density and saturated hydraulic conductivity in natural savanna, *Centrosema macrocarpum* and *Brachiaria dictyoneura* plant covers, in the seasons and depths considered (2006-2007 cycle).

compactando el suelo; estas diferencias no se presentaron en la segunda capa (5 a 15 cm). El aumento en esta variable con la profundidad se puede atribuir al mayor contenido de arcilla, y fue similar al señalado por Bravo *et al.* (2004) y Franzluebbers y Stuedemann (2008). Los valores en la Da luego de dos años con manejo de siembra directa de maíz sobre cultivos de cobertura fueron inferiores a los iniciales y a los de cobertura con sabana natural; principalmente en el horizonte superficial la disminución fue mayor en los tratamientos con las

the decrease was greater in treatments with introduced vegetation, which can be attributed to a greater soil coverage or a greater root biomass as compared to natural savanna (Alegre and Lara, 1996; Bravo *et al.*, 2004). Although a densification of the superficial horizon was produced, the Da values for all the types of vegetation were inferior to the critical limit of 1.60 Mg m^{-3} for the sandy loam texture class (Pla, 1983), which means that there were no degradation problems caused by compacting from grazing.

coberturas introducidas, lo cual puede atribuirse a una mayor cobertura del suelo o a una mayor biomasa de raíces en comparación con sabana natural (Alegre y Lara, 1996; Bravo *et al.*, 2004). Aunque se produjo una densificación en el horizonte superficial luego del pastoreo, los valores en la D_a para todos los tipos de cobertura son inferiores al límite crítico de 1.60 Mg m^{-3} para la clase textural franco arenosa (Pla, 1983), lo cual significa que no hubo problemas de degradación por compactación debido al pastoreo.

Independientemente del tipo de cobertura se observó una disminución en la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) con la profundidad (Figura 1), lo cual está asociado con el incremento de la D_a . A pesar de tal disminución, los valores de K_{sat} son altos y superiores a 0.5 cm h^{-1} , valor considerado como limitante para agricultura de secano (Pla, 1983).

En la capa de 0 a 5 cm no hubo diferencias entre coberturas en la época AP, pero sí para el muestreo DP. Entre tipos coberturas hubo diferencias estadísticas, con mayores valores en *B. dictyoneura* y similares en sabana natural y *C. macrocarpum*. En la capa de 0 a 5 cm sólo se observó el efecto de la época de evaluación por impacto del pastoreo para el tipo de cobertura sabana natural, con una disminución significativa de K_{sat} , lo que se puede relacionar con el aumento en la D_a en este tipo de cobertura. En la capa de 5 a 15 cm los mayores valores de K_{sat} se presentan en *B. dictyoneura*, y los menores en sabana natural para ambas épocas. Entre épocas la cobertura *B. dictyoneura* fue mayor ($p \leq 0.05$) en la época DP, lo cual pudiera estar asociado con el aumento de la porosidad de aireación en este tipo de cobertura (Cuadro 2). Desde el punto de vista hidráulico, los resultados obtenidos en K_{sat} luego de cuatro años de instalación del ensayo reflejan la facilidad para el flujo de agua y solutos en este suelo (Ahuja *et al.*, 1989; Medina-Méndez *et al.*, 2006).

Los valores de porosidad total (P_t) confirman las variaciones en la D_a lo que indica su relación directa (Shaver *et al.*, 2002) con una disminución en sabana natural en relación a las condiciones iniciales (cerca de 4 %), principalmente en la capa superficial (Cuadro 2). Hubo diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre tipos de cobertura en la época AP, con los menores valores en sabana natural, mientras que en la época DP los valores de P_t fueron similares ($p > 0.05$) entre coberturas en ambas capas. Al

Independent of the type of plant cover, a decrease in the saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) was observed with depth (Figure 1), which is associated with the increase in D_a . In spite of this decrease, K_{sat} values are high and superior to 0.5 cm h^{-1} , a value considered as the limit for seasonal agriculture (Pla, 1983).

In the 0 to 5 cm layer, no differences were found between plant covers during *B. dictyoneura* season, but there were for AG samples. Between the types of plant covers, there were statistical differences, with larger values in *B. dictyoneura* and similar ones in natural savanna and *C. macrocarpum*. In the 0 to 5 cm layer, only the effect of evaluation season was observed from the impact of grazing for the natural savanna type of cover, with a significant decrease in K_{sat} , which can be related to the increase in D_a in this type of plant cover. In the 5 to 15 cm layer, the largest K_{sat} values were present in *B. dictyoneura* and the smallest in natural savanna for both seasons. Between seasons, *B. dictyoneura* cover was greater ($p < 0.05$) in AG season, which could be associated with the increase in aeration porosity in this type of plant cover (Table 2). From the hydraulic point of view, the results obtained for K_{sat} after four years of establishing the trial reflect the capacity for water and solute flow in this soil (Ahuja *et al.*, 1989; Medina-Méndez *et al.*, 2006).

Total porosity values (P_t) confirm the variations in D_a , indicating their direct relation (Shaver *et al.*, 2002) with a decrease in natural savanna as compared to the initial conditions (around 4 %), mainly in the superficial layer (Table 2). Statistical analyses revealed differences ($p \leq 0.05$) among types of plant covers in the BG season, with the smallest values in natural savanna, while in the AG season, P_t values were similar ($p > 0.05$) between plant covers in both layers. When comparing between seasons, significant statistical differences were only present in the top layer (0 to 5 cm), with a decrease in the P_t from the impact caused by grazing in *C. macrocarpum* and *B. dictyoneura*, and without variations in natural savanna. Bravo *et al.* (2004) also report differences among cover crops and from the effect of grazing only on the top layer of the profile.

Some authors suggest that in order to diagnose the possibilities of water penetration and movement in the soil profile, and aeration conditions, the distribution of pore size needs to be evaluated in terms of macro

Cuadro 2. Variación de la distribución de tamaño de poros por efecto de los tipos de cobertura y la época de evaluación (pastoreo) a las profundidades consideradas.**Table 2. Variation in pore size distribution from the effect of plant cover types and the season of evaluation (grazing) at the depths considered.**

Variable	Profundidad [§] (cm)	Tipo de cobertura					
		Sabana natural		<i>Centrosema macrocarpum</i>		<i>Brachiaria dictyoneura</i>	
		AP [†]	DP [‡]	AP	DP	AP	DP
Porosidad total (Pt; % p p ⁻¹)	0 a 5	40.99 bA	41.18 aA	45.19 aA	41.50 aB	45.77 aA	42.62 aB
	5 a 15	37.87 bA	39.24 aA	40.35 aA	39.24 aA	41.33 aA	39.64 aA
Poros r > 15 μm (Pa; % p p ⁻¹)	0 a 5	12.95 bA	14.38 aA	18.58 aA	15.91 aA	13.06 bA	14.64 aA
	5 a 15	15.28 aA	17.89 aA	15.14 aA	15.65 aA	12.59 bB	16.38 aA
Poros r < 15 μm (Pr; % p p ⁻¹)	0 a 5	27.97 aA	25.20 abA	25.40 bA	22.78 bB	28.55 aA	25.94 aB
	5 a 15	24.79 aA	18.82 aA	23.83 aA	21.50 aB	25.01 aA	21.63 aB

[†]AP: antes del pastoreo; [‡]DP: después del pastoreo. [§]Para una misma profundidad, distintas letras minúsculas indican diferencias significativas entre tipos de cobertura para una misma época; distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas entre épocas para una misma cobertura (p ≤ 0.05) * [†]AP: before grazing; [‡]DP: after grazing; [§]For a same depth, different small letters indicate significant differences between types of plant cover for the same season; different capital letters indicate significant differences between seasons for the same type of plant cover (p ≤ 0.05).

comparar entre épocas sólo hubo diferencias estadísticas significativas en la primera capa (0 a 5 cm), con disminución de la Pt por el impacto derivado del pastoreo en *C. macrocarpum* y *B. dictyoneura*, y sin variaciones en sabana natural. Bravo *et al.* (2004) también reportan diferencias entre cultivos de cobertura y por efecto del pastoreo sólo en la primera capa del perfil.

Algunos autores sugieren que para diagnosticar las posibilidades de penetración y movimiento de agua en el perfil del suelo y las condiciones de aireación, se debe evaluar la distribución de tamaño de poros en macro y microporos; los primeros son los poros de aireación y movimiento del agua y los segundos los de retención (Pla, 1983; Bravo *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2008). Los poros de radio equivalente mayor a 15 μm (poros de aireación: Pa) presentaron una tendencia diferencial dependiendo de la capa considerada (Cuadro 2). En la capa superficial (0 a 5 cm) los mayores valores se presentaron en *C. macrocarpum*, estadísticamente diferentes de sabana natural y *B. dictyoneura* en la época AP; pero sin diferencias en el muestreo DP. En la capa más profunda (5 a 15 cm) hubo diferencias entre tipos de cobertura en la época AP, con los mayores valores en sabana natural y *C. macrocarpum* con respecto a *B. dictyoneura*, y sin diferencias en el muestreo DP.

and micro pores; the first are aeration and water movement pores, and the second are retention pores (Pla, 1983; Bravo *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2008). The pores of equivalent radius of more than 15 μm (aeration pores: Pa) presented a differential tendency depending on the layer being considered (Table 2). In the superficial layer (0 to 5 cm), the greatest values were present in *C. macrocarpum*, statistically different from natural savanna and *B. dictyoneura* in the BG season, but without differences in the AG sample. In the deeper layer (5 to 15 cm), there were differences among the types of plant covers in the BG season, with the greatest values in natural savanna and *C. macrocarpum* as compared to *B. dictyoneura*, and without differences in the AG sample. In the type of plant cover with *B. dictyoneura*, differences were observed among seasons, with an increase in the macro-porosity associated to grazing, which could be related to the type of fibrous root system and the death of small roots, thus increasing the biopores (aeration pores formed through biological action). Changes obtained in this variable were probably associated to the changes in soil Da, reflecting the close relation there is between the two variables (Bravo *et al.*, 2004) and in addition, a certain degree of compacting of the sub-superficial horizon. After four years, it was determined that for all the dates

En el tipo de cobertura con *B. dictyoneura* hubo diferencias entre épocas, con aumento en la macroporosidad asociada al pastoreo, lo que se pudiera relacionar con el tipo de sistema radicular fibroso y a la muerte de raíces pequeñas, aumentando así los bioporos (poros de aireación formados por acción biológica). Los cambios obtenidos en esta variable probablemente están asociados a los cambios en la Da del suelo, reflejando la relación estrecha que existe entre ambas variables (Bravo *et al.*, 2004) y además, cierto grado de compactación del horizonte subsuperficial. Después de cuatro años se determinó que para todas las fechas y profundidades de muestreo, los valores de Pa son mayores a 10 %, señalado como crítico por Pla (1983) y como un valor por debajo del cual se reduce la respiración de las raíces (Martínez *et al.*, 2008), lo que indica que el sistema de manejo conservacionista usado mantuvo las buenas condiciones de aireación del suelo, como lo señalan Bravo *et al.* (2004).

En los poros de radio equivalente menor a 15 μm (poros de retención: Pr) se observaron diferencias entre tipos de cobertura y entre épocas para ambas profundidades (Cuadro 2). En ambas capas los mayores valores de Pr se presentan en la época AP, con diferencias estadísticas significativas en *C. macrocarpum* y *B. dictyoneura* y con valores similares entre épocas en sabana natural. En este caso se refleja una disminución de la porosidad de retención por efecto del pastoreo y se relaciona con los aumentos en la Da. Las mayores diferencias entre tipos de cobertura ocurren en el nivel superficial (0 a 5 cm), con los valores más bajos en *C. macrocarpum* en ambas épocas. En la capa subsuperficial (5 a 15 cm) no hubo diferencias entre tipos de cobertura para ninguna de las épocas evaluadas. Del análisis de la distribución de tamaño de poros se encontró que la mayor proporción de poros estuvo representada por la fracción de poros de retención, pero en la mayoría de los casos por debajo del valor ideal de 25 % (Pla, 1983) y que indica baja retención de humedad (Martínez *et al.*, 2008).

La resistencia mecánica (resistencia a la penetración: RP) es dependiente del contenido de humedad del suelo (θ), por lo cual se presentan los valores de RP junto con los de θ , para las coberturas, profundidades y épocas consideradas (Cuadro 3). Se detectaron diferencias estadísticas en RP por tipo de cobertura y por efecto del pastoreo para ambas profundidades. El

and depths of sampling, Pa values were greater than 10 %, signaled as critical by Pla (1983) and as a value under which root respiration is decreased (Martínez *et al.*, 2008), which indicates that the conservation management system used maintained good soil aeration conditions, as mentioned by Bravo *et al.* (2004).

In the pores of equivalent radius smaller than 15 μm (retention pores: Pr), differences were observed among types of vegetation and among seasons for both depths (Table 2). In both layers, the greatest values of Pr were present in the BG season, with significant statistical differences in *C. macrocarpum* and *B. dictyoneura*, and with similar values between seasons in natural savanna. In this case, a decrease in retention porosity is reflected because of the effect of grazing and is related to the increase in Da. The greatest differences among types of plant covers happen in the superficial level (0 to 5 cm), with the lowest values in *C. macrocarpum* for both seasons. In the sub-superficial layer (5 to 15 cm), there were no differences among the types of plant covers for either of the seasons evaluated. From the analysis of pore size distribution, it was found that the greatest proportion of pores was represented by the fraction of retention pores, but in most of the cases it was below the ideal value of 25 % (Pla, 1983), indicating low humidity retention (Martínez *et al.*, 2008).

The mechanical resistance (resistance to penetration: RP) is dependent on the soil's humidity content (θ), which is why RP values are presented together with the θ values, for plant covers, depths and seasons evaluated (Table 3). Statistical differences were detected in RP by cover type and because of the effect of grazing for both depths. The greatest RP value was obtained with *C. macrocarpum* for both layers and the smallest value with *B. dictyoneura*. The RP value during AG season was greater in *C. macrocarpum*. In the AP season, the RP increased with depth only in the types of covers *B. dictyoneura* and *C. macrocarpum*. The RP values were less than the threshold value that affects plant growth (Hamza and Anderson, 2005). The RP values could be associated with changes in humidity content and increases in soil's bulk density which is due to cattle treading during grazing (Da Silva *et al.*, 2003; Franzluebbers and Stuedemann, 2008).

The humidity volume content of soil has been a variable emphasized in studies of the conservation

Cuadro 3. Variación de la resistencia a la penetración y el contenido volumétrico de humedad por efecto de cobertura y pastoreo a las profundidades consideradas (0 a 5 cm y 5 a 15 cm).**Table 3. Variation in resistance to penetration and volumetric humidity content from the effect of plant cover and grazing at the depths considered (0 to 5 cm and 5 to 15 cm).**

Variable	Profundidad ^S (cm)	Tipo de cobertura					
		Sabana natural		<i>Centrosema macrocarpum</i>		<i>Brachiaria dictyoneura</i>	
		AP [†]	DP [‡]	AP	DP	AP	DP
Resistencia a la penetración (RP; kPa)	0 a 5	869 aA	489bB	751aB	1738 aA	324 bB	918bA
	5 a 15	531bA	533bA	1689aA	2268aA	531 bB	652bA
Contenido volumétrico de humedad (θ ; % v v ⁻¹)	0 a 5	0.18 aA	0.20 aA	0.16 abA	0.07 bB	0.12 aA	0.15 aA
	5 a 15	0.16 aA	0.16 aA	0.16 aA	0.10 bB	0.11 bB	0.12 bA

[†]AP: antes del pastoreo; [‡]DP: después del pastoreo. ^SPara una misma profundidad distintas letras minúsculas indican diferencias significativas entre tipos de cobertura para una misma época; distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas entre épocas para una misma cobertura ($p \leq 0.05$). [†]AP: before grazing; [‡]DP: after grazing; ^SFor a same depth, different small letters indicate significant differences between types of plant cover for the same season; different capital letters indicate significant differences between seasons for the same type of plant cover ($p \leq 0.05$).

mayor valor de RP fue obtenido con *C. macrocarpum* para ambas capas y menor valor con *B. dictyoneura*. La RP en la época DP fue mayor en *C. macrocarpum*. En la época AP, la RP aumentó con la profundidad sólo en los tipos de coberturas *B. dictyoneura* y *C. macrocarpum*. Los valores de RP fueron menores al valor umbral que afecta el crecimiento de las plantas (Hamza y Anderson, 2005). Los valores de RP pudieran estar asociados con los cambios en el contenido de humedad y los aumentos en la densidad aparente del suelo debido al pisoteo del ganado en pastoreo (Da Silva *et al.*, 2003; Franzluebbbers y Stuedemann, 2008).

El contenido volumétrico de humedad del suelo ha sido una variable enfatizada en los estudios de sistema de labranza conservacionista, al cual se atribuye ventajas comparativas respecto a los sistemas convencionales cuando se presentan condiciones de estrés hídrico (Jalota *et al.*, 2001). En el Cuadro 3 se presentan los valores de θ para las coberturas, profundidades y épocas consideradas. Se aprecia que las coberturas no produjeron diferencias significativas en la época AP para ninguna profundidad; sin embargo, en la época DP disminuyó el contenido de humedad para *C. macrocarpum* en las dos capas consideradas, lo cual posiblemente se debió a la menor cobertura del suelo pues, en comparación con las gramíneas, las leguminosas son menos tolerantes al efecto del pastoreo.

cultivation system, which is attributed with comparative advantages in regards to conventional systems when there are water stress conditions present (Jalota *et al.*, 2001). In Table 3, the θ values are shown for plant covers, depths and seasons evaluated. It can be seen that plant covers did not produce significant differences in the BG season for any depth; however, in AG season, the humidity content for *C. macrocarpum* cover decreased in the two layers evaluated, which could possibly be due to lesser soil coverage because, when compared to grasses, leguminous plants are less tolerant to the grazing effect. These results can also be associated with changes in micro-porosity (Pr) from the effect of the types of plant covers in the AG season, as Villamil *et al.* (2006) point out. The humidity content for the two seasons evaluated went from 16 to 20 % in natural savanna, 11 to 15 % in *B. dictyoneura* and 7 to 16 % in *C. macrocarpum*.

Bravo *et al.* (2004) suggest that the water capacity available in thick texture soils can be increased when the bulk density increases, while the aeration capacity remains above the minimum acceptable values of 10 to 15 %. It is worth highlighting that the presence of a good proportion of small pores can improve humidity retention due to the lack of perturbation of these soils and the decrease in evaporation as a result of residues on the surface (Jalota *et al.*, 2001; Bravo *et al.*, 2004).

Estos resultados también se pueden asociar con los cambios en la microporosidad (Pr) por efecto de los tipos de cobertura en la época DP, como lo señalan Villamil *et al.* (2006). El contenido de humedad para las dos épocas evaluadas varió de 16 a 20 % en savana natural, 11 a 15 % en *B. dictyoneura* y 7 a 16 % en *C. macrocarpum*.

Bravo *et al.* (2004) sugieren que la capacidad de agua disponible en suelos de textura gruesa puede incrementarse al aumentar la densidad aparente, mientras la capacidad de aireación permanece sobre valores mínimos aceptables del 10 al 15 %. Cabe destacar que la presencia de una buena proporción de poros pequeños puede mejorar la retención de humedad debido a la no perturbación de estos suelos y la disminución de la evaporación como resultado de los residuos en la superficie (Jalota *et al.*, 2001; Bravo *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

La principal limitación del suelo fue la baja capacidad de almacenamiento de agua, dado su alto contenido de arena. Después de cuatro años de estudio, la introducción de cultivos de cobertura (*C. macrocarpum* y *B. dictyoneura*) produjo cambios significativos en el horizonte superficial en la mayoría de las propiedades físicas del suelo evaluadas (densidad aparente; conductividad hidráulica saturada; porosidad y resistencia a la penetración) en comparación con la cobertura de la sabana natural. Se destaca una disminución de la densidad aparente bajo los cultivos de cobertura introducidos, lo que se refleja en aumentos en la conductividad hidráulica saturada y la porosidad total. Para el horizonte subsuperficial (5-15 cm) la conductividad hidráulica saturada fue significativamente mayor con *B. dictyoneura*, comparada con *C. macrocarpum* y sabana natural, mientras que la resistencia a la penetración fue significativamente mayor en *C. macrocarpum*. Finalmente, después de cuatro años, el tipo de cobertura con *B. dictyoneura* se asocia con mejores condiciones físicas del suelo, en comparación con la cobertura de sabana natural y de *C. macrocarpum*. Además, el pastoreo no produjo efecto negativo en las propiedades físicas evaluadas, ya que a pesar de presentarse variación debido al pastoreo en algunas propiedades, los valores están alejados de los niveles críticos que afectan el crecimiento de las plantas.

CONCLUSIONS

The main limitation of the soil was the low water storage capacity, given its high sand content. After four years of study, the introduction of cover crops (*C. macrocarpum* and *B. dictyoneura*) produced significant changes in the superficial horizon, in most of the physical properties of the soil evaluated (bulk density; saturated hydraulic conductivity; porosity; and resistance to penetration), as compared to the plant cover in natural savanna. A decrease in the bulk density under cultivation of introduced plant covers stands out, which is reflected in increases in saturated hydraulic conductivity and total porosity. For the sub-superficial horizon (5 to 15 cm), saturated hydraulic conductivity was significantly greater in the *B. dictyoneura* coverage, compared with *C. macrocarpum* and natural savanna, while resistance to penetration was significantly greater in *C. macrocarpum*. Finally, after four years, the type of plant coverage with *B. dictyoneura* is associated with better physical conditions of the soil, as compared to the natural savanna and *C. macrocarpum* covers. Besides, grazing activity did not have a negative effect on the physical properties evaluated, since in spite of there being variation due to grazing in some properties, values are far from the critical levels that affect plant growth.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Alegre, J. C., y P. D. Lara. 1996. Efecto de la carga animal en pastoreo sobre las propiedades físicas de suelos de la región tropical húmeda de Perú. *Pasturas Trop.* 18: 18-23.
- Ahuja, L. R., D. K. Cassel, R. R. Bruce, and B. B. Barnes. 1989. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Sci.* 148: 404-441.
- Bilotta, G. S., R. E. Brazier, and P. M. Haygarth. 2007. The impacts of grazing animals on the quality of soil, vegetation, and surface waters in intensively managed grassland. *Adv. Agron.* 94: 237-280.
- Bravo, C., Z. Lozano, R. M. Hernández, L. Piñango, y B. Moreno. 2004. Efecto de diferentes especies de cobertura sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16: 163-172.
- Carpenter, S. R. 1998. The need for large scale experiments to assess and predict the response of ecosystems to perturbation.

- In:* Pace, M., and P. Groffman (eds). Success, Limitations and Frontiers in Ecosystem Science. Springer-Verlag, New York. pp: 287-312.
- Chacón, P., I. López-Hernández, et M. Lamotte. 1991. Le cycle de l'azote dans une savane à *Trachypogon* au centre du Venezuela. *Revue D'Ecologie et de Biologie du Sol* 28: 67-75.
- Da Silva, A. P., S. Imhoff, and M. Corsi. 2003. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. *Soil Till. Res.* 70: 83-90.
- Franzluebbers, A. J., and J. A. Stuedemann. 2007. Crop and cattle responses to tillage systems for integrated crop-livestock production in the Southern Piedmont, USA. *Renewable Agric. Food Syst.* 22: 168-180.
- Franzluebbers, A. J., and J. A. Stuedemann. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Till. Res.* 100: 141-153.
- Hamza, M. A., and W. K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hernandez, R. M., Z. Lozano, C. Bravo, B. Moreno, y L. Piñango. 2005. Alternativas para el mejoramiento de la productividad del sistema maíz-ganado en suelos del Estado Guárico. Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. Caracas, Venezuela. 255 p.
- Jalota, S., K. R. Khera, and S. S. Chabal. 2001. Straw management and tillage effects on soil water storage under field conditions. *Soil water storage under field conditions. Soil Use Manage.* 17: 282-287.
- López-Hernández, D., R. M. Hernández-Hernández, y M. Brossard. 2005. Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de América del sur. *Estudios de casos en sabanas del Orinoco. Interciencia* 30: 623-630.
- Medina-Mendez, J., V. H. Volke-Haller, J. González-Eíos, A. Galvis-Spinola, M. L. Santiago-Cruz, y J. L. Cortés. 2006. Cambio en las propiedades del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado Campeche. *Agrociencia* 22: 175-189.
- Nacci, S., e I. Pla. 1991. Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. Maracay. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Serie B, N° 17. 40 p.
- Martinez, E., J. P. Fuentes, P. Silva, S. Valle, and E. Acevedo. 2008. Soil physical and water root growth as affected by no-tillage and convencional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil Till. Res.* 99: 232-244.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía (UCV), Alcance* 33: 15-91.
- Shaver, T. M., G. A. Peterson, L. R. Ahuja, D. G. Westfall, L. A. Sherrod, and G. Dum. 2002. Surface soil physical properties alter twelve years of dryland no-tillage management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1296-1303.
- Villamil, M. B., G. A. Bollero, R. G. Darmody, F. W. Simmons, and D. G. Bullock. 2006. No-tillage corn/soybean system including winter cover crops: Effects on soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.