

Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano: II Cambios en el suelo

Influence of small ruminant grazing systems in a semiarid range in the State of Zacatecas (Mexico): II Soil changes

Francisco Guadalupe Echavarría Cháirez^a, Alfonso Serna Pérez^a, Rómulo Bañuelos Valenzuela^b

RESUMEN

El objetivo fue valorar los cambios en el suelo por efecto de sistemas de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC), con pequeños rumiantes. El estudio se realizó en agostadero (53 ha) del ejido Pánuco, Zacatecas, de 2002 a 2005. El área presenta una precipitación promedio anual de 400 mm y suelos de textura arenosa. Los resultados indican que la disminución del pisoteo y presión de uso en PR han influido positivamente en características físicas del suelo, al no incrementar los valores de densidad aparente (1.41 vs 1.53 g cm⁻³), mantener bajos los valores de resistencia a la penetración (15.30 vs 17.06 J cm⁻¹), incrementar la porosidad (entre 4 y 5 %) y producir un menor tamaño medio de radio de poro (534-550 vs 578-592 μ) en comparación con PC ($P < 0.05$). En las variables hidrológicas no hubo diferencias ($P > 0.05$) en sorbilidad (0.54-0.6 vs 0.71-0.76 cm min^{-1/2}), en infiltración (7.1-7.6 vs 9.7-10.7 cm h⁻¹) ni en rugosidad (1.03-1.21 vs 1.23-1.37 adimensional) que en PC. Asimismo, no se presentaron diferencias ($P > 0.05$) entre sistemas de pastoreo en los valores de materia orgánica y ácidos húmicos. Respecto a las pérdidas de suelo y escorrentía, los valores fueron sistemáticamente menores en PR que en PC en las condiciones de vegetación estudiadas ($P < 0.01$). Los efectos sobre los parámetros evaluados se asocian con incrementos en la capacidad de captación de humedad, lo que se convierte en mayor producción de material vegetativo, lo que a su vez conlleva hacia una mayor sostenibilidad del suelo en los agostaderos.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de pastoreo, Compactación del suelo, Tamaño de poro, Densidad aparente, Velocidad de infiltración, Rugosidad.

ABSTRACT

The objective of this study was to assess soil changes due to rotational (PR) and continuous (PC) grazing systems with small ruminants on soil structural and hydrologic variables and soil organic matter content as well as soil losses and runoff. The study was carried out in a rangeland site (53 ha) located in the ejido Panuco, Zacatecas, from 2002 to 2005. Average annual rainfall in the site is 400 mm and soil is mainly sandy. Soil properties were measured in the study area and its surroundings. Reduction of trampling in the rotation grazing area affected soil characteristics positively and as a result there were changes in soil structural variables with respect to PC such as: bulk density remained unchanged (1.41 vs 1.53 g cm⁻³), soil resistance decreased (15.3 vs 17.06 J cm⁻¹), while porosity (4 to 5 %), and small radii pore size increased (534-550 vs 578-592 μ). No differences were found for hydrologic variables such as sorptivity (0.54-0.6 vs. 0.71-0.76 cm min^{-1/2}), infiltration (7.1-7.6 vs 9.7-10.7 cm h⁻¹) and surface roughness (1.03-1.21 vs 1.23-1.37 dimensionless), PC and PR, respectively. Also, no differences were observed between grazing systems for either organic matter content or humic acids. With respect to soil loss and runoff, their values were systematically lower for native vegetation under a PR system ($P < 0.01$). The effects seen on the evaluated parameters under a PR system are associated to an increase in soil water storage which in itself leads to an increase in vegetation cover which improves overall soil sustainability in the rangeland.

KEY WORDS: Grazing systems, soil compaction, Pore size radii, Bulk density, Infiltration rate, Surface roughness.

Recibido el 12 de junio de 2006 y aceptado para su publicación el 17 de noviembre de 2006.

^a Campo Experimental Zacatecas. CIR-Norte Centro. INIFAP. echavarría.francisco@inifap.gob.mx. Correspondencia primer autor.

^b Unidad Académica de Medicina Veterinaria. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Investigación realizada con apoyo de la fundación Produce Zacatecas con los proyectos 017/FPZ/99 y 072/FPZ/2004.

INTRODUCCION

El pastoreo modifica las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y afecta los procesos relacionados con la hidrología, el ciclo de nutrientes y la producción vegetal de las áreas de pastizal^(1,2,3). Por ejemplo, se ha consignado^(4,5,6) que el uso racional del pastizal, favorece la recuperación de la cobertura vegetal posterior a un período de corte o consumo (pastoreo), y promueve una mayor captación de la humedad vía el mejoramiento en las condiciones de infiltración del agua en el suelo. Otros estudios^(6,7) han mostrado los efectos positivos o negativos de diferentes intensidades de pastoreo o la supresión temporal del mismo, sobre la producción de sedimentos en las áreas de pastizal. Además, el efecto del pastoreo sobre las condiciones del suelo podría ser muy diverso entre diferentes tipos de vegetación⁽⁸⁾, por lo que los procesos que ocurren en el sitio podrían ser afectados por diferentes factores que dependen del tipo de comunidad vegetal⁽⁹⁾ y manejo.

Una de las formas de manejo que se han usado para mejorar la condición de los sitios de pastizal en zonas áridas, las cuales tradicionalmente se han pastoreado de manera continua, son los sistemas de pastoreo rotacional. El uso de estos sistemas promueve la recuperación de la cobertura vegetal y el mejoramiento de las condiciones del suelo, vía la exclusión temporal del pastoreo en un potrero, mientras que el resto de los potreros continúan pastoreándose. Los períodos de descanso y uso se van distribuyendo en espacio y tiempo hasta que, finalmente, se llega a un período de recuperación por potrero, en donde la vegetación y el suelo se beneficiaron de una menor presión por parte del ganado^(10,11). En estudios realizados en regiones semiáridas del sur de EUA y norte de México^(11,12,13,14), probando varios sistemas de apacentamiento, el pastoreo rotacional ha dado las respuestas más favorables en cuanto al mejoramiento de la hidrología del sitio de pastizal, ya que incrementó la infiltración de agua en el suelo y redujo la producción de sedimentos, cuando éste se comparó con otros sistemas como el de alta intensidad-baja frecuencia, el pastoreo continuo con alta carga animal y el pastoreo continuo con carga

INTRODUCTION

Grazing produces changes in soil physical, biological and chemical properties and have an effect on processes related to hydrologic variables, the nutrient cycle and vegetation yield in rangelands^(1,2,3). For example, other studies^(4,5,6) mention that rangeland rational management favors canopy recovery after grazing and improves soil water intake and storage. Other studies^(6,7) have shown both the positive or negative effects of different stocking rates, or even a total exclusion of cattle on sediment production in rangelands. Besides, effects of grazing on soil conditions could vary with different types of vegetation⁽⁸⁾, and therefore soil processes taking place in a specific site could be affected by diverse factors which depend on both rangeland management and plant community⁽⁹⁾.

A management system used to improve arid rangelands – traditionally grazed continuously – is rotation grazing. This system promotes both recovery of vegetable coverage and soil improvement, through temporary closure of a given paddock while the others go on being grazed. Rest periods are distributed in space and time until a rest period for each paddock is attained, and therefore vegetation and soil are benefited through a lower grazing intensity^(10,11). In studies carried out in semiarid areas in the South of the USA and the North of Mexico^(11,12,13,14), testing diverse grazing systems, rotation grazing has provided the best responses for hydrologic characteristics, improving infiltration rates and sediment production, when compared to other grazing methods, such as high intensity, low frequency, continuous high stocking rate and continuous low stocking rate. Besides, rotation grazing improved soil conditions because both organic matter content and aggregate stability increased⁽¹¹⁾.

Changes in soil conditions and ecological processes (hydrology, nutrient cycle, green mass production) follow significant changes in vegetation⁽¹⁵⁾. Therefore, grazing intensity can produce different levels of soil decay. However, not all damage will be equal in all sites at the same level of grazing

animal moderada. Además, el pastoreo rotacional mejoró las condiciones del suelo pues incrementó el contenido de materia orgánica y la estabilidad de sus agregados⁽¹¹⁾.

El cambio en las condiciones del suelo y los procesos ecológicos asociados (hidrología, ciclo de nutrimentos, producción vegetal) son posteriores a cambios significativos en la vegetación del sitio de pastizal⁽¹⁵⁾. De tal forma que la presión de uso de la vegetación por el ganado en el pastoreo, puede conducir a diferentes grados de deterioro del suelo. No obstante, el nivel de daño debido al pastoreo no siempre será igual al aplicar una misma presión de uso sobre el pastizal, debido a que algunos suelos continuarán funcionando después del disturbio, o bien recuperarán su función después de un lapso de tiempo⁽¹⁶⁾; mientras que otros, no se recuperarán, a menos de que se aplique un aporte significativo de recursos externos^(15,17). Esto último no es deseable, pues significa la pérdida de la capacidad productiva actual de los sitios de pastoreo. Es importante hacer notar que el manejo del pastizal al utilizar el control de cargas animales y el ordenamiento del uso y recuperación de la vegetación por medio de sistemas de pastoreo, ha probado ser una forma práctica para reducir el disturbio al mínimo, e incrementar la resistencia y elasticidad del suelo del pastizal mejorando su condición^(11,12,16).

Conservar y mejorar la condición de los pastizales es una necesidad apremiante en el norte de México, en donde la mayor parte de la superficie se dedica a la cría extensiva de ganado. En Zacatecas, dicha superficie es mayor a los 5 millones de hectáreas, las que además presentan graves problemas de sobrepastoreo y diversos niveles de degradación del suelo. En el pasado reciente, se han realizado estudios^(18,19,20) para encontrar variables y metodologías de diagnóstico y diseño de la investigación pecuaria en esta entidad federativa. En este nuevo esfuerzo, se continúa con dicha tarea enfocándola al estudio de sistemas de pastoreo e indicadores de la condición del suelo en un pastizal. El objetivo del estudio fue el de valorar los cambios en el suelo por efecto de sistemas de pastoreo rotacional y continuo, con pequeños rumiantes,

intensity, because some soils will continue performing as before after the disturbance, or will recover their functionality after some time⁽¹⁶⁾ due to their resilience; while others will never recuperate, unless external resources to the system are applied^(15,17). This last situation is not desirable, because it means that soils in these sites have lost their current production capacity. It should be noted that range management through controlling the stocking rate and vegetation use and recovery through grazing systems, has proved to be a practical way to reduce soil disturbance to a minimum, and at the same time to increase rangeland soil resistance and elasticity, therefore improving its overall condition^(11,12,16).

Conserving and improving rangeland is imperative in the North of Mexico, where most of the area is committed to extensive cattle production. In Zacatecas, more than 5 million hectares, most of them overgrazed and showing different levels of soil degradation, are engaged in this activity. In the recent past, several studies^(18,19,20) were carried out to pinpoint variables and detect and design methodologies for livestock research. The current effort continues this line of work, focusing more on grazing systems and soil condition indicators in rangelands. The objective of the current study was to assess soil changes due to rational and continuous grazing methods with small ruminants, on soil structural and hydrologic variables and in organic matter content.

MATERIALS AND METHODS

Study area description: The experiment was carried out in a 53 ha area in a rangeland located at 22° 54' N and 102° 33' W, and at 2,285 m asl. Annual average rainfall amounts to 400 mm. The dominant vegetation can be characterized as "native rangeland - thorny shrub - cactus"⁽²¹⁾. The study area is a micro watershed, being its main course a stream of varying depth, being 5 m deep at its most. Physiography varies from undulated to abrupt. Soil are predominantly sandy loams with a slightly alkaline pH (~ 7.8), presenting low nutrient, salts and organic matter (0.1 to 2.7 %) content. In accordance with the current FAO soil taxonomy⁽²²⁾,

sobre variables estructurales e hidrológicas del suelo y el contenido de materia orgánica del mismo.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del área de estudio. El trabajo experimental se realizó en un área de agostadero de 53 ha, la que se localiza en los 22° 54' N y 102° 33' W, a 2,285 msnm. La precipitación promedio anual en la región es de 400 mm. La vegetación dominante es "pastizal nativo-matorral espinoso-nopalera"⁽²¹⁾. El área de estudio es una microcuenca, la cual cuenta con un cauce principal que es una cárcava con profundidad variable de hasta 5 m. La fisiografía varía de ondulada a escarpada. Los suelos son predominantemente de textura franco-arenosa con pH moderadamente alcalino (pH ~ 7.8), bajo contenido de nutrientes, materia orgánica (0.1-2.7%) y sales. De acuerdo con la clasificación actualizada de la FAO, The World reference base for soil resources (WRB)⁽²²⁾, los suelos se clasifican, en su mayor parte, como Leptosoles y, en menor proporción, como Castanozem, con un horizonte petrocálcico de profundidad variable⁽¹⁸⁾.

Sistemas de pastoreo. El tratamiento PR se estableció en 2002, en un sitio que fue excluido al ganado durante cinco años (1995-2000) y reabierto al pastoreo continuo por dos años, para finalmente en 2002 dividirlo en cuatro potreros mediante cercos internos. La carga animal en PR se calculó con base a un consumo de 1.5 kg de materia seca/día/animal y se decidió dejar un remanente del 25 % de la producción aérea de las plantas. Se pastoreó un mes de cada una de las cuatro estaciones del año. Aunque el promedio estimado de carga animal para cuatro meses del año por potrero fue de 151 cabezas de pequeños rumiantes, se decidió mantener la carga de 250 cabezas de caprinos y ovinos, la cual es una carga alta y es equivalente al PC, sin que se presentaran problemas de suministro de forraje durante 2002 y 2003, ya que se tuvo un incremento substancial en la materia seca disponible del estrato herbáceo, esto sin incluir la materia seca proveniente de matorrales, la cual ha sido estimada en 320 kg/ha⁽²³⁾.

the World Reference Base for Soil Resources (WRB), soils in the site can be classified mostly as Leptosols and to a lesser degree as Castanozem, with a petrocalcic horizon at variable depths⁽¹⁸⁾.

Grazing systems: The rotation grazing treatment was established in 2002 in an area which had been closed for five years (1995 – 2000) and grazed continuously for two years (2000-2002). Finally, in 2002, this area was fenced into four paddocks. The stocking rate was estimated through a dry matter intake of 1.5 kg/d/animal, and a decision was made to leave a residue amounting to 25 % of the vegetation. Grazing was carried out for one month in each season. Although the estimated average stocking rate for each paddock for the four seasons was 151 head, a stock of 250 sheep and goats was used without presenting forage scarcity in 2002 and 2003, due to a substantial increase from herb and grass available dry matter, not including that offered by shrubs which can be estimated at 320 kg/ha⁽²³⁾. This stocking rate can be considered as high and is similar to that of continuous grazing.

In an adjoining area, continuous grazing was applied, and the stocking rate was not controlled, being communal (ejido) property and producers graze different herd sizes. However, after studying the informal distribution of these herds throughout the property, it was found that only four shepherds graze the study area, with a daily herd of 200 to 300 sheep and goats. This is how grazing areas in the ejido are used usually, so therefore this treatment was used as control for comparison.

In addition, fistulated goats and sheep were included, so it was possible to collect forage intake and to analyze its chemical composition. This information is published separately and is focused mainly on the effects of grazing on native vegetation⁽²⁴⁾. Different soil properties were determined at the field and in the laboratory to evaluate the effects of grazing. To assist a later description and analysis of these variables, they were grouped as structural, hydrologic and as organic matter and humic acid contents. Besides, sediment loss was estimated as an integrating variable, which is very useful for comparisons.

En el área aledaña se aplicó el tratamiento PC, en el cual no se controló la carga animal, ya que el área de pastoreo es comunal (ejido) y los productores manejan diferentes tamaños de hatos. Sin embargo, a partir de observaciones de la distribución informal que se hace del terreno por parte de sus usuarios, solamente cuatro pastores acostumbran utilizar esta porción del terreno, con un promedio de uso de un hato por ganadero por día, con un tamaño de hato que varió de 200 a 300 cabezas de caprinos y ovinos por día. Esta es la forma en que comúnmente son manejadas las áreas de pastoreo ejidal en el estado, por lo que éste es considerado el tratamiento de comparación o testigo.

Adicionalmente se incluyeron caprinos y ovinos fistulados esofágicamente, con lo que fue posible coleccionar el forraje consumido y analizarlo químicamente. Esta información se publicó separadamente y hace referencia a los efectos del pastoreo en la vegetación nativa⁽²⁴⁾. Diferentes propiedades del suelo se determinaron directamente en campo y laboratorio para evaluar el efecto del pastoreo. Para facilitar la descripción y análisis posterior de estas variables del suelo, se agruparon como variables estructurales, hidrológicas y el contenido de materia orgánica y ácidos húmicos. Además, se estimó la pérdida de sedimentos como una variable integradora que es de gran utilidad para fines de comparación.

Variables estructurales del suelo. Estas incluyen a la densidad aparente, porosidad, radio de poro, compactación y textura. La densidad aparente (Dap) de la superficie del suelo se midió con el método del cilindro de volumen conocido⁽²⁵⁾ usando aros metálicos de 12 a 13 cm de diámetro y 6 a 7 cm de altura. La vegetación viva y el material orgánico en cada sitio de muestreo fueron recortados hasta la superficie del suelo y removidos del sitio previo a la colección de muestras. En el área de PR, se determinó la Dap con cinco transectos, totalizando 51 muestras en el año 2002 y 10 muestras en el año 2005. En el sitio de PC se muestreó por medio de cinco transectos para obtener un total de 20 muestras en el 2002 y 10 muestras en el 2005. Cada transecto fue de longitud variable y los puntos de muestreo se ubicaron a 500 m de distancia entre

Soil structural variables. These include bulk density, porosity, pore radii, soil compaction and texture. Soil surface bulk density (Dap) was obtained through the known volume cylinder method⁽²⁵⁾ using 12 to 13 cm diameter metal rings 6-7 cm high. Live vegetation and organic material in each sampling site were completely razed and removed prior to sample collection. In the PR area, Dap was determined with five transects, for a total of 51 samples in 2002 and 10 in 2005. In the CP area, sampling was carried out through five transects obtaining 20 samples in 2002 and 10 in 2005. Each transect was of variable length and sampling points were set at 500 m distance. Soil samples obtained in each site were dried until constant weight at 105 °C, volume in each ring was estimated and finally Dap was determined in accordance to Brady and Weil⁽²⁶⁾.

Porosity and pore radii were determined at the closing stages of the study. To this end, two unaltered samples were collected, one for each physiographic position, backslope and piedmont. Five transects were sampled for each grazing system (PC and PR) for a total of 10 samples for each system. Unaltered samples were taken with the aid of a Buchner type funnel, 12 to 13 cm diameter, 6 to 7 cm high and with a 3.175 mm outlet. In order to obtain these unaltered samples, the metal rings were set directly over the soil with the aid of a circular steel sheet placed at the funnel's bottom, which was hit at the front with a wooden mallet for a gradual penetration in the soil. The sample was collected by digging around the funnel to avoid altering the soil sample and finally was cut at the funnel's upper border level. Samples were taken to the laboratory and porosity distribution was determined through Vomicil's method⁽²⁷⁾. To this end, the sample was placed in a metal ring held in a stand. The funnel was connected through plastic tubes to a burette and water was allowed to enter the sample by gravity until saturation. Once the sample reached this point, water was allowed to drain, measuring the amount drained and the sample's height. The procedure was ended when air entered the system.

To estimate total porosity, when the above described method was completed, the sample was dried until

ellos. El suelo obtenido en cada sitio de muestreo se secó hasta peso constante a 105 °C, se calculó el volumen del aro respectivo y finalmente se estimó la Dap de acuerdo con Brady y Weil⁽²⁶⁾.

La porosidad y el radio de poro se determinaron al final del período de estudio. Para ello se colectaron dos muestras inalteradas por transecto, una por cada posición fisiográfica; ladera y pie de monte. Se muestrearon cinco transectos por cada sistema de pastoreo (PR y PC), para un total de 10 muestras por sistema. Las muestras inalteradas se tomaron con embudos metálicos tipo Buchner de 12 a 13 cm de diámetro, 6 a 7 cm de altura y con una salida de 3.175 mm. Para obtener las muestras inalteradas de suelo, los embudos metálicos fueron insertados directamente sobre el suelo con la ayuda de una placa circular de acero colocada sobre el fondo del embudo, la cual fue golpeada en su parte anterior con un marro de madera y promoviendo la inserción paulatina en el suelo. La muestra se extrajo excavando alrededor del embudo para evitar alterar la muestra, y finalmente se cortó al ras del borde superior del embudo. Las muestras se llevaron al laboratorio y se utilizó la técnica de Vomicil⁽²⁷⁾ para la determinación de la distribución de porosidad. Para ello, la muestra se montó en un aro metálico sostenido por un soporte. El embudo se conectó por medio de mangueras plásticas a una bureta graduada y se permitió la entrada de agua por gravedad a la muestra de suelo hasta saturación. Una vez saturada se inició el drenado de la misma, midiendo la cantidad de agua drenada y la altura de la muestra. El procedimiento finalizó hasta que se presentó la entrada de aire al sistema.

Para estimar el valor de porosidad total, al finalizar el proceso anterior, la muestra se secó hasta peso constante y se estimó el volumen del embudo cuantificándose primero la Dap y después la porosidad⁽²⁶⁾. La porosidad es la cantidad máxima de agua que pueden ocupar los espacios vacíos o poros conocida como contenido de humedad a saturación. Como consecuencia del continuo drenado de la muestra de suelo, se obtuvieron dos columnas de valores, los que correspondieron a la humedad del suelo a partir de saturación y su decremento, y el valor de potencial matricial o

constant weight and the funnel's volume was estimated, quantifying first Dap and then porosity⁽²⁶⁾. Porosity is equivalent to the maximum water volume which can occupy empty spaces or pores and is usually referred as moisture saturation content. As a consequence of a continued drainage of the soil sample, two sets of values were obtained, one corresponding to soil moisture content and its decrease and the other to the surface tension at which water is released or matrix potential. With this potential it was possible to estimate pore radii through the equation $r = 0.149 \text{ cm}^2 / \psi m$ ⁽²⁶⁾, where r = pore radii, 0.149 cm^2 is a constant from the capillarity equation and ψm is the matrix potential (cm). The starting value was a hypothetical 1,000 μ pore radii, equal to a 2 mm or 2,000 μ diameter. Values obtained represented a bivariate distribution of pore radii and moisture content, from which moments (medium, variance, skewness and kurtosis) were estimated using only the first moment, which represents the pore radii distribution average.

Soil texture was estimated through the Boyoucos hydrometer method⁽²⁸⁾. Soil samples were collected at the same time as the unaltered described before, using the same methodology.

Soil compaction, or penetration resistance, was measured according to the dynamic penetration principle⁽²⁹⁾ by means of a dynamic cone penetrometer similar to the one described by Herrick and Jones⁽³⁰⁾. Penetration depth was measured in five transects at 500 m distance between each point. Fifty one points were positioned in the PR treatment and 20 in the PC. Each sampling point represented the average of five measurements. Measurements were performed between March 2002 and November 2005, for a total of eight samplings. Ten mallet strokes were used as a standard procedure in each determination. Depth penetration values were transformed to force units (resistance to penetration) by means of the following equation⁽³⁰⁾:

$$F = \frac{(n_i)(m)(g)(h)}{d_i} \quad (1)$$

Where: F= energy opposing penetration (Joules cm^{-1}); n_i = mallet strokes; m= mallet weight (kg);

tensión a la que dicha cantidad de agua es liberada. Con el valor de potencial matricial fue posible estimar el radio de poro, el cual se basó en la relación⁽²⁶⁾: $r = 0.149 \text{ cm}^2 / \psi m$, en donde r es el radio de poro; 0.149 cm^2 es una constante a partir de la ecuación de capilaridad y ψm es el potencial matricial (cm). El valor inicial del cual se partió fue un valor hipotético de $1000 \frac{1}{4}$ de radio de poro, lo que representa un diámetro de $2000 \frac{1}{4}$ o 2 mm. Los valores obtenidos representaron una distribución bivariada de radios de poros y contenido de humedad, de la cual se calcularon los momentos (media, varianza, skewness y curtosis), utilizando solamente el primer momento, el cual representa el valor medio del radio de poro de la distribución.

La estimación de textura del suelo en los sitios en estudio se realizó por el método del hidrómetro de Bouyoucos⁽²⁸⁾. Las muestras del suelo fueron colectadas a la par que las muestras de suelo inalteradas utilizando el mismo esquema de muestreo.

La compactación del suelo, reportada como resistencia a la penetración, se midió bajo el principio de penetración dinámica⁽²⁹⁾ con un penetrómetro de cono similar al descrito por Herrick y Jones⁽³⁰⁾. Se realizaron mediciones de profundidad de penetración de suelo en cinco transectos con puntos a 500 m de distancia. En los sitios de PR se ubicaron 51 puntos y 20 con el tratamiento de PC. Cada punto de muestreo fue el promedio de cinco mediciones. Las mediciones se realizaron desde marzo de 2002 hasta noviembre de 2005, siendo un total de ocho muestreos. El número de golpes de martillo se estandarizó a 10 por determinación. Los valores de profundidad de penetración se transformaron a unidades de fuerza que se opone a la penetración (resistencia), mediante la fórmula siguiente⁽³⁰⁾:

$$F = \frac{(n_i)(m)(g)(h)}{d_i} \quad (1)$$

en donde F es la energía que se opone a la penetración en Joules cm^{-1} ; n_i es el número de golpes de martillo; m es el peso del martillo en kilogramos; g es la velocidad de caída por efecto

g = fall speed due to gravity (9.81 m seg^{-2}); h = height of mallet stroke; d_i = penetration depth (m). Values obtained were averaged and graphed.

Soil hydrologic variables: These include sorptivity (S)⁽³¹⁾, accumulated infiltration at 60 min (I_{60}), end infiltration rate (V_t) and soil roughness. These variables were estimated at the end of the study, using the same sampling method as for pore radii and porosity described before. Variables S, I_{60} and V_t were estimated by means of water intake tests with concentric cylinders⁽³²⁾ using a 3 to 4 cm hydraulic force. The inner cylinder had a 25 cm diameter and the outer 40 cm. This last one was used to provide a hydraulic barrier and too to create a one-dimensional flow. Live vegetation and organic material in each site was completely removed. Cylinders were introduced to a 6 to 7 cm depth. Readings of water sheet infiltration were set at 1 cm and the time required was recorded. A water volume to restore the 1 cm sheet was replaced immediately in the upper cylinder to re-establish the 4 cm height force. Measurements were carried out once in each sampling site. Field data were transformed into infiltration rates (cm h^{-1}) and accumulated water intake sheets, both total and fractional (cm). Sorptivity was determined with data obtained during the first 15 min of the water intake test through the method suggested by Sharma *et al*⁽³³⁾. At the beginning of each test the soil moisture volumetric content was estimated ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

To determine soil roughness a 20 teeth rake was used⁽³⁴⁾. This variable was recorded as the standard deviation of heights measured from an arbitrary plane either below or on top and parallel to the soil surface⁽⁹⁾. Two readings per transect were recorded, both on the backslope and piedmont.

Soil organic matter content: values for this variable were obtained in the laboratory by means of methods suggested by Schnitzer⁽³⁵⁾. Humic acid and other humic substances were differentiated. Field sampling for these variables was carried out at the end of the study, using the same sampling method as for pore radii and porosity described before.

de gravedad (9.81 m seg^{-2}); h es la altura de caída de martillo en m; y d_i es la distancia de penetración en m. Los valores obtenidos fueron promediados y graficados a través del tiempo.

Variables hidrológicas del suelo. Estas incluyen la sorbilidad (S)⁽³¹⁾, infiltración acumulada a los 60 min (I_{60}), velocidad final de infiltración (V_f) y rugosidad del suelo. Estas variables se determinaron al final del periodo de estudio, utilizando el mismo esquema de muestreo empleado para la determinación del radio de poro y porosidad anteriores. Las variables S , I_{60} y V_f se estimaron a partir de pruebas de infiltración con cilindros concéntricos⁽³²⁾ utilizando una carga hidráulica que varió de 4 a 3 cm. El cilindro interior tuvo un diámetro de 25 cm y el cilindro exterior un diámetro de 40 cm, este último es usado para proporcionar una barrera hidráulica y crear un flujo unidimensional. La vegetación viva y el material orgánico en cada sitio de prueba fueron recortados hasta la superficie del suelo y removidos del lugar. Cada cilindro fue introducido en el suelo a una profundidad de 6 a 7 cm. Las lecturas de lámina infiltrada se fijaron a 1 cm y se registró la longitud de tiempo que tardó la lámina en infiltrarse. Un volumen de agua suficiente para recuperar la lámina de 1 cm fue aplicada inmediatamente en el cilindro interior para recobrar la carga hidráulica de 4 cm de profundidad. Las mediciones se realizaron una vez por sitio de muestreo. La información de campo obtenida se transformó a velocidades de infiltración (cm h^{-1}) y láminas infiltradas acumuladas parciales y totales (cm). Con los datos de los primeros quince minutos de la prueba de infiltración se estimó la sorbilidad mediante el método propuesto por Sharma *et al*⁽³³⁾. Al inicio de cada prueba se estimó el contenido volumétrico de humedad ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) del suelo.

Para la determinación de la rugosidad del suelo se utilizó un rastrillo de 20 agujas⁽³⁴⁾. Esta variable se consignó como la desviación estándar de alturas tomadas hacia arriba o abajo de un plano arbitrario paralelo a la superficie del suelo⁽⁹⁾. Se realizaron dos muestreos por transecto, tanto en la ladera como a pie de monte.

Contenido de materia orgánica del suelo. El contenido de materia orgánica del suelo (porcentaje

Sediment loss, runoff and coverage factor (C) of the Universal Soil Loss Equation (EUPS): sediment loss owing to water erosion was a variable recorded from the initial stages of this study in the rotation grazing area, but was measured in both areas in 2004 and 2005. To this end, standard runoff 3*22 m plots equipped with collectors and storage tanks for water and sediment collection⁽³⁶⁾ were used. These plots were set inside a high density nopal cactus vegetation area ($\sim 1,200 \text{ pl ha}^{-1}$ on average). Besides, a runoff plot was set in which the soil was kept deliberately bare, which provided data on potential erosion or maximum sediment loss which was very useful for estimating EUPS's C factor. Rainfall records were obtained from three pluviometers strategically distributed across the study area. Rainfall and runoff volume in each plot were recorded after every rain. Also, a comparative amount for each plot was set to determine in the laboratory suspended sediments (g l^{-1}). Data obtained from this source were annual soil loss due to water erosion (kg ha^{-1}), annual runoff ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) and EUPS's vegetation management C factor⁽³⁵⁾.

Statistical analysis: paired samples of transects in both grazing systems were compared through Student's t test and analyzed by means of the SAS software⁽³⁷⁾. To determine the moments of a bivariate distribution, moisture and pore radii values, the CALMOM⁽³⁸⁾ software was used. Water erosion and runoff were analyzed by means of analysis of variance. Water erosion values were transformed into natural logarithms, because these data are distributed as log - normal⁽³⁹⁾. This analysis was carried out with the SAS software⁽³⁷⁾.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil structural variables

Dap averages for both grazing systems are shown in Figure 1. When the evaluation period started in 2002, Dap was the same for both systems ($P > 0.05$), but in the closing stages (2005), after nearly four years, Dap averages showed differences for both systems, being greater in PC, while that of PR remained practically without changes. The increase in the PC system was $\sim 0.12 \text{ g cm}^{-3}$.

con base en peso total del suelo) y su diferenciación en ácidos húmicos y huminas, se obtuvo en el laboratorio utilizando métodos propuestos por Schnitzer⁽³⁵⁾. El muestreo de campo para estas variables se realizó al final del período de estudio, utilizando el mismo esquema de muestreo que para la determinación del radio de poro y porosidad descrito en párrafos anteriores.

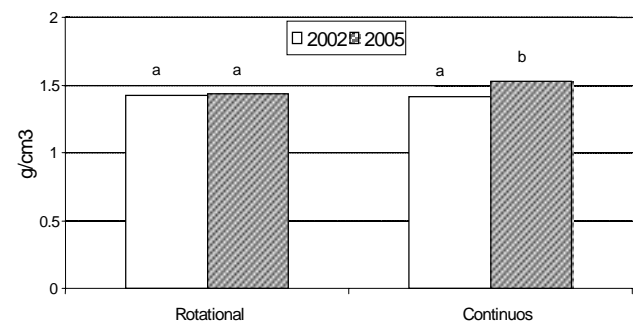
Pérdida de sedimentos, escorrentía y factor de cobertura (C) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). La pérdida de sedimentos por erosión hídrica es una variable registrada desde el inicio del estudio dentro del área de pastoreo rotacional, pero que sólo se midió en ambos sistemas de pastoreo durante los años de 2004 y 2005. Para ello se utilizaron lotes de escurrimiento estándar de 3 x 22 m equipados con colectores y tanques de almacenamiento para captar el agua escurrida y los sedimentos⁽³⁶⁾. Los lotes se instalaron en las condiciones de vegetación nopalera densa de alta densidad (~ 2000 plantas/ha en promedio) y matorral espinoso de cobertura media (~ 1200 plantas/ha en promedio). Además, se instaló un lote de escurrimiento que se mantuvo artificialmente en condiciones de suelo desnudo, el cual proporcionó datos de erosión potencial o pérdida máxima de sedimentos, y que sirvió para la estimación del factor C de la EUPS. El registro de la precipitación pluvial se obtuvo con tres pluviómetros distribuidos en las áreas de estudio. La cantidad de la precipitación y el volumen escurrido en cada una de las parcelas de escorrentía fueron registrados para cada evento. Asimismo, se tomó una alícuota por parcela, para determinar, en laboratorio, los sedimentos en suspensión ($g\ l^{-1}$). Los datos obtenidos a partir de esta información fueron pérdida anual de suelo por erosión hídrica ($kg\ ha^{-1}$), escorrentía anual ($m^3\ ha^{-1}$) y el factor de manejo de la vegetación C de la EUPS⁽³⁵⁾.

Análisis estadístico. En el caso de muestras apareadas de transectos en ambos sistemas de pastoreo, éstas se compararon por medio de pruebas de *t* de Student, y los análisis se realizaron por medio del programa SAS⁽³⁷⁾. Para la determinación de la media en la distribución de una función biviariada de humedad y radio de poro se utilizó el

At the beginning of the study, average resistance to penetration was similar in both study areas (Figure 2) ($P > 0.05$). From the sampling of December 2002 up to the last one carried out in November 2005, resistance to penetration values were different ($P < 0.05$) between grazing systems, 15.3 vs 17.06 $J\ cm^{-1}$, for PR and PC respectively.

Figura 1. Valores medios de densidad aparente a la profundidad de 0-15 cm en los sitios de pastoreo rotacional y continuo

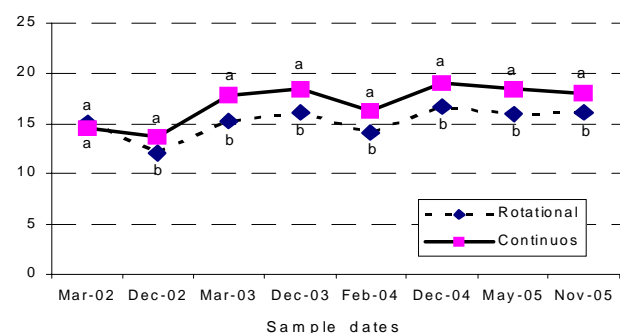
Figure 1. Average bulk density at 0-15 cm depth in rotation and continuous grazing sites



ab Yearly, averages followed by different letters are different ($P < 0.05$).

Figura 2. Medias de resistencia a la penetración del suelo en los sitios de pastoreo rotacional y continuo a través de diferentes fechas de muestreo

Figure 2. Resistance to penetration in soils in rotation and continuous grazing sites at different sampling dates



ab By sampling date, averages followed by different letters are different ($P < 0.05$).

programa CALMOM⁽³⁸⁾, con el que también se calcularon los momentos de una distribución acumulada de intervalos variables y de muestras puntuales. Por medio de un análisis conjunto de varianza se analizaron los valores medidos de erosión hídrica y escurrimiento. El factor año se ubicó como primer factor y la condición de vegetación se analizó como segundo factor por medio de análisis de varianza. Para realizar el análisis de varianza de la erosión hídrica los datos se transformaron en logaritmo natural, ya que estos datos se distribuyen como log – normal⁽³⁹⁾. El análisis fue realizado con el programa SAS⁽³⁷⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables estructurales del suelo

Los valores medios de Dap para los sistemas de pastoreo en estudio se presentan en la Figura 1. Al inicio del período de evaluación (año 2002), las medias de Dap fueron iguales en ambos sistemas ($P > 0.05$). En cambio, al final del período de evaluación (año 2005) y después de casi cuatro años de manejo de los hatos de cabras, los valores medios de Dap fueron diferentes, incrementándose el valor medio de la Dap en el tratamiento de PC, mientras que la media de Dap en el tratamiento PR se mantuvo en los mismos valores de 2002. Dicho incremento en la Dap en el área de PC fue de $\sim 0.12 \text{ g cm}^{-3}$.

Al inicio del período de estudio, las medias de resistencia a la penetración presentaron valores

Soil in the PC area showed a greater resistance to penetration from the second reading onwards than in the PR area ($P < 0.05$). Increases in Dap and compaction values are generally associated to a decrease in total porosity⁽⁴⁰⁾ and to less negative matrix potential values. An $r = -0.95$ correlation between Dap and total porosity proves this.

The hillside soils grazed continuously showed an average pore radii slightly higher ($P < 0.05$) than soil in the same physiography subject to PR (Table 1). Contrariwise, porosity showed higher values in those locations with lower pore radii ($P < 0.05$). In soils at the piedmont, no differences were found for average values of porosity and pore radii between both grazing areas. In general to a greater pore radii corresponds a lower porosity and these situations were found in the continuous grazing areas. Sand content in soil showed small changes throughout the study area, however at the piedmont the PC area showed a higher content ($P < 0.05$). This could help explain the greater pore radii in this topographic site. Dap values between 1.1 and 1.5 g cm^{-3} practically does not influence soil water suction, but values over 1.5 g cm^{-3} do so negatively. A characteristic directly attributable to soil trampling by animals is surface compaction. When the stocking rate increases and the grazing period also increases, trampling causes a greater soil surface compaction and a Dap increase in the top horizon^(41,42), reducing both water intake rate and retention and increasing soil erosion⁽⁴³⁾. It can be safely said that intensive trampling due to continued

Cuadro 1. Media y desviación estándar de radio de poro, porosidad y contenido de arena del suelo de los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) en dos posiciones fisiográficas

Table 1. Pore radii, porosity and soil content in soils in rotation (PR) and continuous grazing (PC) sites in two physiographic positions

Variable	Slope		Piedmont	
	PR	PC	PR	PC
Pore radii, 10^{-3}mm	534 ± 30^b	578 ± 22^a	550 ± 34^a	592 ± 52^a
Porosity, %	0.47 ± 0.03^a	0.42 ± 0.02^b	0.45 ± 0.03^a	0.41 ± 0.05^a
Sand content, %	55.9 ± 6.0^a	57.1 ± 8.6^a	54.4 ± 3.7^b	70.5 ± 6.2^a

^{ab} Between columns and by physiographic position, averages followed by different letters are different ($P < 0.05$).

iguales (Figura 2). A partir del muestreo realizado en diciembre del 2002 y hasta el final del período de estudio en noviembre del 2005, los valores promedio de resistencia a la penetración fueron diferentes ($P < 0.05$) entre ambos sistemas (15.3 vs 17.06 J cm⁻¹, PR y PC, respectivamente). El suelo del área con PC, desde el segundo muestreo en adelante, siempre mostró mayor resistencia a la penetración ($P < 0.05$) que el suelo del área en donde se maneja el hato de cabras bajo el sistema de PR. Además, hacia el final del estudio, los valores de resistencia se mostraron estables en el área dedicada a PR. Un incremento en los valores de Dap y compactación se asocian con un decremento en la porosidad total⁽⁴⁰⁾ y valores de potencial matricial menos negativos. Un valor de r de -0.95 al correlacionar Dap y porosidad total comprueba lo anterior.

Los suelos ubicados en la ladera en donde se practicó el PC presentaron un promedio de radio de poro mayor ($P < 0.05$) que los suelos en la misma posición fisiográfica en donde se realizó el PR (Cuadro 1). De manera inversa sucedió con la porosidad, que presentó valores mayores en los sitios de menor tamaño de poro ($P < 0.05$). Para el caso de los suelos a pie de monte, no se encontró diferencia entre los valores promedio de porosidad y radio de poro entre las áreas de pastoreo PR y PC. En general, los valores de tamaño de poro mayores se asociaron con valores de menor porcentaje de porosidad y estos se ubicaron en los sitios dedicados a PC. En lo que refiere al contenido medio de arena presente en el área de estudio, este presentó poca variación; sin embargo, a pie de monte el suelo del área en donde se practicó el PC mostró un valor medio de contenido de arena significativamente mayor ($P < 0.05$) que el suelo del área bajo PR. Esto explica los valores de mayor tamaño de poro en esta posición topográfica.

El cambio en los valores de Dap en PC, indicó que bajo este tratamiento, el peso de suelo por unidad de superficie se incrementó. Este cambio se reflejó en una menor porosidad, lo que a su vez significó una menor captación de humedad, y una mayor resistencia a la penetración (Figura 2). Valores de Dap entre 1.1 y 1.5 g cm⁻³ tienen poca influencia

grazing with a high stocking density increased Dap and resistance to penetration. However it cannot be denied that in addition to the rotation grazing system used in the PR area, the rest periods inherent to rotation grazing, added to the site's closure from 1995 to 2000 could have exerted their influence, and therefore lower values were observed.

With reference to average pore radii, these show a negative correlation to porosity (Table 1). This indicates a greater capacity to store water associated to micropores and mesopores⁽⁴⁴⁾. Differences in porosity attributable to grazing systems were between 4 and 5 % in moisture estimated by volume both at the piedmont and hillside. Although soil moisture was not evaluated, it can be expected that available moisture should increase in proportion to the increase in soil water saturation values, because total porosity represents the maximum storage capacity⁽⁴⁵⁾, thus showing a clear comparative advantage for rotation grazing.

Besides, differences between pore radii, porosity and sand content respect of physiographic position are substantial. This can be explained by differences in the development of the drainage system for each position. Although hillside soils are more exposed to erosion, their internal and external drainage systems are more developed, while in soils found at the piedmont drainage is poorer and accumulate material coming from soils higher up⁽⁴⁶⁾. A greater presence of micropores and mesopores, a greater water storage capacity and less sand content constitute characters of internal drainage which require time and stability to develop, such being the case of soils developed *in situ*. In soils such as those found at the piedmont, which are rich in accumulated material, improvement of soil structural characteristics and therefore of drainage, require less intense compaction and decay processes and need more time for expression.

Soil hydrologic variables

Soil roughness systematically presented higher values in the backslope than in the piedmont, as well as in PR (Table 2). On the other hand, I_{60} , V_f and S were greater in PR than in PC. In all instances average values did not differ either

Cuadro 2. Media y desviación estándar de variables de infiltración y rugosidad del suelo observadas después de cuatro años de manejo en los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) y dos posiciones fisiográficas

Table 2. Averages and Standard Deviation of infiltration and soil surface roughness after four years of rotation (PR) and continuous (PC) grazing management sites in two physiographic positions

	Slope		Piedmont	
	PR	PC	PR	PC
Accumulated infiltration after 60 min, cm	10.4 ± 2.8	8.0 ± 2.1	11.2 ± 3.7	7.9 ± 1.3
Sorptivity, cm min ^{-1/2}	0.71 ± 0.16	0.60 ^a ± 0.09	0.78 ± 0.29	0.54 ± 0.06
End infiltration rate, cm h ⁻¹	9.7 ± 2.8	7.1 ± 2.1	10.7 ± 3.4	7.6 ± 1.5
Soil surface roughness (adimensional)	1.37 ± 0.48	1.21 ± 0.88	1.23 ± 0.035	1.03 ± 0.81

($P > 0.05$).

en la succión de agua por el suelo, pero valores mayores a 1.5 g cm⁻³ en adelante resultan en una succión menor del suelo⁽⁴⁰⁾. Una característica atribuible al pisoteo de las especies animales es la compactación de la capa superficial. Se ha establecido que conforme se incrementa la carga animal y el período de estancia del ganado en el potrero, el pisoteo continuo de los animales produce la destrucción paulatina de los agregados del suelo, creando una mayor compactación de la superficie del mismo y un incremento en la Dap del horizonte superficial^(41,42), reduciendo además la velocidad de infiltración y la retención de humedad e incrementando la erosión⁽⁴³⁾. De acuerdo con lo mencionado y los resultados obtenidos, se infiere que el pisoteo continuo de la carga animal aplicada ininterrumpidamente durante todo el año en PC propició el incremento tanto en Dap, como en resistencia a la penetración. Sin embargo, en el sistema de PR, no se descarta que adicionalmente al sistema de pastoreo aplicado, los periodos de descanso propios de este sistema, y un periodo de exclusión del sitio de estudio de 1995 a 2000, influyeran para producir los menores valores observados en PR.

En lo que respecta a los valores medios de radio de poro, estos se asociaron con la porosidad del suelo de manera inversa. Es decir, los tamaños de poro menor se asociaron con valores altos de porosidad (Cuadro 1), lo que indicó que una mayor habilidad para almacenar agua depende de los

between treatments ($P > 0.05$) or between different physiographic positions. In accordance with Fuentes⁽³¹⁾, “sorptivity represents soil capacity to absorb water due only to capillary forces at a given moisture content”. This implies a strong dependency of the infiltration variables on pore size. High sorptivity and infiltration were found in PR, where lower mean pore values were and also to a physiographic position in the backslope. Contrariwise, lower infiltration and sorptivity values were found in PC, in coincidence with greater average pore radii and to a physiographic position at the piedmont. In accordance with Skopp⁽⁴⁴⁾, an ideal pore distribution in a soil would be one that shows an important presence of micro, meso and macropores. High porosity values indicate more water in the soil at saturation point, however, a high mesopore presence is not necessarily associated to a high porosity and on the contrary, may indicate that the pore radii distribution curve is quite asymmetrical with a greater incidence at its right end, and which could affect soil water holding capacity. In this case, sorptivity and infiltration values are controlled through porosity distribution with a greater presence of micropores. Besides, in this study, this character is found mainly in the PR treatment and in the backslope, where a pore network has developed naturally which allow a better drainage of infiltrated water. A completely opposite behaviour was found in the PC treatment at the piedmont, which does not present a pore network.

microporos y mesoporos⁽⁴⁴⁾. Las diferencias en la porosidad entre los sistemas de pastoreo fueron de un 4 a un 5 % de la humedad, con base en volumen para pie de monte y ladera, respectivamente. Esto representa un mayor porcentaje de humedad a saturación en los suelos, como resultado del manejo en PR. Aunque el contenido de humedad del suelo no fue evaluado, es de esperarse que los valores de humedad aprovechable pudieran verse incrementados en proporción al incremento de valores de humedad a saturación, ya que la porosidad total representa la capacidad de almacenamiento máxima de agua en el suelo⁽⁴⁵⁾, indicando esto una ventaja comparativa en la capacidad de almacenamiento del suelo bajo PR en relación a PC.

Asimismo, es notoria la diferencia entre valores de tamaño de poro, porosidad y contenido de arena y la posición fisiográfica. Esto se explica por las diferencias en el desarrollo del sistema de drenaje del suelo para cada posición. Aunque los suelos de ladera son sometidos a un proceso erosivo más intenso, en estos el desarrollo del sistema de drenaje interno y externo es más maduro, mientras que los suelos ubicados al pie de monte son suelos de acumulación donde el drenaje es pobre⁽⁴⁶⁾. El predominio de microporos y mesoporos, una mayor capacidad de almacenamiento de humedad y menor contenido de arena, son características del drenaje interno que requieren tiempo y estabilidad para su formación, que es el caso de los suelos desarrollados *in situ*. En los suelos de acumulación como los de pie de monte, el mejoramiento de las características estructurales del suelo y consecuentemente de drenaje, requiere que los procesos de degradación o compactación sean de menor intensidad y requieren de mayor tiempo para expresarse.

Variables hidrológicas del suelo

La rugosidad del suelo presentó sistemáticamente valores más altos en la ladera que en el pie de monte así como en PR (Cuadro 2). Por otro lado, los valores de I_{60} , V_f y S , fueron mayores en el tratamiento PR que en PC. En todos los casos los valores promedio no fueron diferentes entre tratamientos de pastoreo ($P > 0.05$), ni entre las posiciones fisiográficas estudiadas. De acuerdo con

Soil organic matter

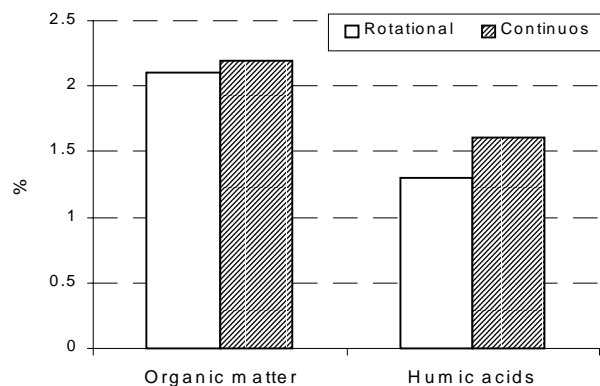
Organic matter contents for both grazing systems were similar ($P > 0.05$) (Figure 3). When humic acids were separated from soil organic matter, their content in PR was less than in PC, being this difference non significant. This trend shows that in the PC site more easily degradable vegetation was present, perhaps owing to a lesser growth and development in response to the grazing system. On the other hand, in PR, a fraction of vegetable matter is not eaten by animals and therefore a more lignified material, harder to degrade, develops. Although results are statistically similar for both systems, a slower degradation means a slower mineralization of its components⁽⁴⁷⁾, and remaining in the soil for a longer period could contribute to develop more favourable physical characteristics (Dap, water storage and resistance to penetration) and therefore increase rangeland sustainability.

Sediment loss, runoff and EUPS factor C

In 2004, water erosion values for PR in both conditions (high density of cactus and medium coverage thorny shrub) were very low (less than 5

Figura 3. Medias de materia orgánica del suelo y contenido de ácidos húmicos de los sitios de pastoreo rotacional y continuo en el año 2005

Figure 3. Soil organic matter and humic acids content in rotation (PR) and continuous grazing (PC) sites in 2005



^{ab} By variable, averages followed by different letters are different ($P < 0.05$).

Fuentes⁽³¹⁾ “la sorbilidad representa la capacidad del suelo para absorber agua debido únicamente a las fuerzas capilares bajo un contenido dado de humedad”. Esto implica una fuerte dependencia de las variables de infiltración con el tamaño de poro. Los valores altos de sorbilidad e infiltración se localizaron en PR, donde a su vez coincidieron valores medios menores de tamaño de poro y la posición fisiográfica de ladera. Por el contrario, valores menores de sorbilidad e infiltración se ubicaron en PC, coincidiendo con valores medios mayores de tamaño de poro y la posición fisiográfica pie de monte. De acuerdo con Skopp⁽⁴⁴⁾, una distribución ideal de porosidad en un suelo es aquella que incluye una cantidad importante de micro, meso y macroporos. Valores altos de porosidad indican una mayor cantidad de agua en el suelo a saturación; sin embargo, valores altos de tamaño medio de poro no necesariamente se asocian con valores altos de porosidad y por el contrario, son una indicación de que la curva de distribución del tamaño de poro no es simétrica en torno al valor medio y presenta una distribución con valores medios al extremo derecho de la curva, lo cual podría afectar la capacidad del suelo para almacenar humedad. En este caso, los valores altos de sorbilidad e infiltración son controlados por la

kg ha⁻¹) (Table 3). On the other hand, in PC values were slightly higher for both situations (30 and 357 kg ha⁻¹, respectively), although within acceptable values (~ 2 tons kg ha⁻¹yr⁻¹). In both cases, differences were significant ($P < 0.01$). In 2005, differences were greater, with low values in PR and high in PC (263 and 477 kg ha⁻¹, respectively for both situations described before). No significant differences were found between years ($P > 0.05$).

Surface runoff was affected by total rainfall, being greater in 2004 than in 2005, for all situations. Surface runoff was greater in the thorny bush medium coverage vegetation in PC than in PR in both years ($P > 0.05$). No statistically significant differences were found for this variable in the other vegetation type during the period of this study. Observed water erosion values, within those acceptable, can be associated to current degradation levels in those sites used as runoff plots. Previous degradation has been so great that currently only an incipient Horizon A of recent formation on top of the C Horizon is present. This was found in a morphological study carried out separately and not included in this paper. Because the soil layer susceptible to erosion is small, solute values are low, therefore

Cuadro 3. Pérdidas de suelo por erosión hídrica, escorrentía y factor de manejo de la vegetación *C* de la EUPS de los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) en dos condiciones de vegetación

Table 3. Soil loss due to water erosion, runoff and EUPS factor *C* vegetation management in rotation (PR) and continuous (PC) sites under two vegetation conditions

Vegetation condition	Erosion (kg/ha/yr)		Runoff (m ³ /ha/yr)		EUPS Factor C	
	PR	PC	PR	PC	PR	PC
Año 2004§ (Annual rainfall = 485 mm)						
Thorny shrub, medium cover.	4.72 ^a	356.9 ^b	76.7 ^a	346.1 ^b	0.0059	0.450
High density cactii	4.43 ^a	30.7 ^b	37.4 ^a	23.4 ^a	0.0059	0.038
Año 2005¥ (Annual rainfall= 269 mm)						
Thorny shrub, medium cover.	2.4 ^a	477.1 ^b	12.0 ^a	200.1 ^b	0.0011	0.208
High density cactii	6.2 ^a	263.2 ^b	20.0 ^a	21.5 ^a	0.0027	0.115

§In 2004 potential erosion came about to 790.8 kg/ha/yr and maximum runoff 816.7 m³/ha/yr.

¥ In 2005 potential erosion came about to 2,283.5 kg/ha/yr and maximum runoff 661.7 m³/ha/yr.

^{ab} For both erosion and runoff, between columns averages followed by different letters are different ($P < 0.05$).

distribución de la porosidad en donde el tamaño medio de poro es menor. Además, esta característica se ubica principalmente dentro del tratamiento PR y en la ladera, en donde de manera natural se ha desarrollado una red de poros conectados entre sí, los cuales permiten un mejor drenado del agua que se infiltra. El comportamiento opuesto se observó en el tratamiento PC ubicado a pie de monte, en donde el desarrollo de la red de poros interconectados no se ha presentado.

Contenido de materia orgánica del suelo

Los valores de contenido de materia orgánica en ambos sistemas de pastoreo fueron iguales (Figura 3). Al separar los ácidos húmicos de la materia orgánica del suelo, se encontró que el contenido de los primeros en PR fue menor que en el pastoreo continuo, sin ser estadísticamente significativa dicha diferencia. Esta tendencia indica que en los sitios de PC se ha presentado una acumulación de material vegetal de mayor facilidad de degradación, lo cual corresponde a un consumo continuo de material verde de menor desarrollo. Por su parte en PR, una fracción del material vegetal no llega a ser consumido por los animales y se permite la formación de material leñoso, el cual cuando se deposita en el suelo no se degrada rápidamente. Aunque los resultados son iguales en términos estadísticos, la presencia de materiales de difícil degradación asegura una lenta mineralización de sus componentes⁽⁴⁷⁾, y su estancia durante una longitud mayor de tiempo en el suelo podría contribuir a mantener características físicas favorables (Dap, resistencia a la penetración y mayor captación de humedad) y coadyuvar a la sostenibilidad del agostadero.

Pérdida de sedimentos, escorrentía y factor C de la EUPS

En el año 2004, los valores de erosión hídrica en PR en ambas condiciones (nopalera de alta densidad y matorral espinoso de cobertura media) fueron muy bajos (menores a 5 kg ha⁻¹) (Cuadro 3). En cambio los valores para PC fueron ligeramente mayores en ambas condiciones de vegetación (30 y 357 kg ha⁻¹, respectivamente), aunque se mantuvieron dentro del intervalo de valores

underestimating real degradation, which can vary considerably taking into account the previous erosion history. On the other hand, estimated EUPS C coverage values were lower in PR, which helps explain the lower erosion values found in this grazing system, and also to quantify the importance of grazing systems on rangeland sustainability in respect of other factors which influence the soil erosion process. Besides, it also shows the need to study soil morphology independent of its vegetation cover and to take into account in future studies the need to measure soil erosion in soils with small degradation levels, allowing therefore a better understanding of erosion risk in well conserved sites.

CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

Soil properties and variables related to structure responded quickly to the grazing system, in comparison to infiltration and organic matter content variables which were also assessed and which need a longer time period to become evident. Positive results due to rotation grazing were seen in soil quality, especially on bulk density, resistance to penetration, increase in porosity and pore formation which can increase water capture as well as in water infiltration, this last one not statistically significant. On the other hand, as a result of a better soil and vegetation management, less soil and water was lost in rotation grazing. Besides, this grazing system allowed slower degradation organic material accumulation.

End of english version

permisibles de erosión (~ 2 t ha⁻¹ año⁻¹). En ambos casos, las diferencias fueron significativas ($P < 0.01$). En el año 2005 la diferencia de valores fue mayor ($P < 0.01$), manteniéndose valores bajos en PR y altos (263 y 477 kg ha⁻¹, nopalera de alta densidad y matorral espinoso de cobertura media, respectivamente) en el tratamiento PC. No hubo diferencia entre años ($P > 0.05$).

La escorrentía superficial fue afectada de manera directa por la magnitud de la precipitación anual,

encontrándose un volumen escurrido mayor en el año de 2004 que en 2005, tanto para los sistemas de pastoreo como para las condiciones de vegetación en estudio. Para la condición matorral espinoso de cobertura media la escurrida superficial fue mayor ($P < 0.05$) en PC que en PR durante ambos años. No se encontraron diferencias estadísticas para esta variable en la otra condición de vegetación durante el periodo de estudio. Los valores de erosión hídrica observados, los cuales presentan en general valores menores a los valores permisibles, se asocian con los niveles actuales de degradación de los suelos de los sitios utilizados como parcelas de escurrimiento. El nivel de degradación previo en los sitios de estudio, ha sido de tal magnitud, que en ellos sólo existe un incipiente horizonte A de reciente formación encima de un horizonte C. Esto se detectó en un estudio morfológico realizado separadamente y que no se incluye en esta publicación. Dado que la capa de suelo susceptible de ser afectada por la erosión es de tamaño reducido, los valores medidos de solutos en suspensión son de baja magnitud, subestimando de esta manera, el nivel de degradación real que se presenta en la zona, el cual puede ser muy variable, dependiendo del nivel de degradación previo de los sitios estudiados. Por otra parte, los valores estimados del factor de cobertura (C) de la EUPS fueron menores para PR y altos para PC, con lo que se explica en parte los menores valores de erosión encontrados en PR que en PC y hace notar la importancia de la influencia de los sistemas de pastoreo, sin considerar el efecto que pudieran causar los demás factores que participan en el proceso erosivo (intensidad de lluvia, suelo, pendiente, etc). Los valores medidos de erosión permiten, a pesar de su baja magnitud, distinguir la oportunidad de reducir la degradación y proporcionarle sostenibilidad al agostadero a través del establecimiento de un sistema de pastoreo. Asimismo, muestran la necesidad de evaluar morfológicamente los suelos, independientemente de la cobertura vegetal, y considerar en estudios futuros, la necesidad de realizar mediciones de erosión de suelos con menor nivel de degradación, permitiendo con ello, un mejor entendimiento del riesgo de sitios mejor conservados.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

Las propiedades y variables del suelo relacionadas con la estructura respondieron con relativa rapidez al sistema de pastoreo, en comparación con las variables de infiltración y del contenido de materia orgánica evaluadas, las que necesitarán de un periodo de tiempo más largo para manifestarse. Como resultado de la acción del sistema de pastoreo rotacional, se obtuvieron respuestas positivas para el mejoramiento de la calidad del suelo, tales como mantener la densidad aparente sin cambio, valores menores de resistencia a la penetración del suelo comparado con el pastoreo continuo, un ligero incremento en la porosidad y la formación de tamaños de poro más eficientes en la captación de humedad. El pastoreo rotacional también tuvo un efecto positivo en el mejoramiento de las variables de infiltración del agua en el suelo, pero sin ser estadísticamente importante. Por otro lado, como resultado de un mejor uso del suelo y la vegetación se obtuvieron menores pérdidas de agua y suelo en el sistema rotacional que en el continuo. Además, el pastoreo rotacional, permitió la acumulación de materiales orgánicos de degradación más lenta.

LITERATURA CITADA

1. Whisenant SG. Repairing damaged wildlands: A process-oriented, landscape-scale approach. Cambridge, U.K: Cambridge University Press; 1999.
2. Beukes PC, Cowling RM. Non-selective grazing impacts on soil-properties of the Nama Karoo. *J Range Manage* 2003;56(5):547-552.
3. Tate KW, Dudley DM, McDougald, George MR. Effect of canopy and grazing on soil bulk density. *J Range Manage* 2004;57(4):411-417.
4. Gifford GF, Hawkins RH. Hydrologic impact of grazing on infiltration: A critical review. *Water Resour Res* 1978;14(2):305-313.
5. Wood MK, Blackburn WH, Smeins FE, McGinty WA. Hydrologic impacts of grazing systems. In: *Proceed First Intern Range Congr Soc Range Manage*. Denver, Colorado. 1978:298-291.
6. Blackburn WH. Livestock grazing impacts on watersheds. *Rangelands* 1983;5(3):123-125.
7. Blackburn WH. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. In: *Developing strategies for rangeland management*. Nat Res Council, Nat Acad Sci., Boulder, Colorado and London, England: Westview Press; 1984:927-1000.

INFLUENCIA DEL SISTEMA DE PASTOREO: II CAMBIOS EN EL SUELO

8. Blackburn WH, Knight RW, Wood MK. Impacts of grazing on watersheds: A state of knowledge. College Station, Texas, USA. Texas Agric Exp Stn. 1982.
9. Pierson FB, Spaeth KE, Weltz MA, Carlson DH. Hydrologic response of diverse western rangelands. *J Range Manage* 2002;55(6):558-570.
10. Holechek JL, Pieper RD, Herbel CH. Range management: Principles and practices. 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.; 1995.
11. Wood MK, Blackburn WH. Vegetation and soil responses to cattle grazing systems in the Texas Rolling Plains. *J Range Manage* 1984;37(4):303-308.
12. McGinty WA, Smeins FE, Merrill LB. Influence of soil, vegetation and grazing management on infiltration rate and sediment production of Edwards Plateau rangeland. *J Range Manage* 1979;32(1):33-37.
13. Wood MK, Blackburn WH. Sediment production as influenced by livestock grazing in the Texas Rolling Plains. *J Range Manage* 1981;34(3):228-231.
14. Wood MK, Blackburn WH. Grazing systems: Their influence on infiltration rates in the Rolling Plains of Texas. *J Range Manage* 1981;34(4):332-335.
15. Herrick JE, Brown JR, Tugel AJ, Shaver PL, Havstad KM. Application of soil quality to monitoring and management: Paradigms from rangeland ecology. *Agron J* 2002;94(1):3-11.
16. Seybold CA, Herrick JE, Brejda JJ. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci* 1999;164(4):224-234.
17. Bestelmeyer BT, Brown JR, Havstad KM, Alexander R, Chavez G, Herrick JE. Development and use of state-and-transition models for rangelands. *J Range Manage* 2003;56(2):114-126.
18. Serna PA, Echavarría CFG. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I. Pérdidas de suelo. *Téc Pecu Méx* 2002;40(1):37-53.
19. Echavarría CFG, Medina GG, Gutiérrez LR, Serna PA. Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el ejido Pánuco, Zacatecas. *Téc Pecu Méx* 2004;42(1):39-53.
20. Serna PA, Echavarría CFG. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. II. Escurrimiento superficial. *Téc Pecu Méx* 2002;40(1):55-69.
21. CETENAL. Carta de vegetación F-13-B-58, Zacatecas [mapas]. Comisión de estudios del territorio Nacional. Dirección de estudios económicos. Secretaría de la Presidencia. Estados Unidos Mexicanos. 1971.
22. WRB. IUSS Working group. World reference base for soil resources. 2nd ed. World soil resources reports No. 103. FAO, Rome, Italy. 2006.
23. COTECOCA. Determinación de coeficientes de agostadero, Zacatecas y Aguascalientes. 1980.
24. Echavarría CFG, Gutiérrez LR, Ledesma RRI, Bañuelos VR, Aguilera SJI, Serna PA. Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano. I Vegetación nativa. *Tec Pecu Méx* 2006;44(2):203-207.
25. Blake GR. Bulk density. In: Black CA editor. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. Amer Soc Agron. Madison, Wis., USA 1965:374-390.
26. Brady NC, Weil RR. *Elements of the nature and properties of soil.* 12th ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.; 2000.
27. Vomocil JA. Porosity. In: Black CA editor. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. Amer Soc Agron. Madison, Wis. USA 1965:299-314.
28. Pulido AR, Del Valle FH. Instructivo para el análisis de suelos y aguas para riego. Departamento de irrigación, Chapingo México. 2001.
29. Davidson DT. Penetrometer measurements. In: Black CA editor. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. Amer Soc Agron. Madison, Wis. USA 1965:472-484.
30. Herrick JE, Jones TL. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci Soc Am J* 2002;66:1320-1324.
31. Fuentes RC. Teoría de la infiltración unidimensional: 2. La infiltración vertical. *Agrociencia* 1989;78:119-153.
32. Bertrand AR. Rate of water intake in the field. In: Black CA editor. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. Amer Soc Agron. Madison, Wis. USA 1965:197-209.
33. Sharma ML, Gander GA, Hunt CG. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J Hidrol* 1980;45:101-122.
34. Kincaid DR, Williams G. Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement treatments. *J Range Manage* 1966;19:346-351.
35. Schnitzer M. Organic matter characterization. In: Page AL editor. *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. Agronomy Monograph Series. Amer Soc Agron. Madison, Wis. USA 1982:581-594.
36. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric., Handbook 537, U.S. Government Printing Office., Washington, DC. USA. 1978.
37. SAS. SAS/STAT Users' Guide. (Release 6.08). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc. 1992.
38. Skopp J, Clague F. Calculation of Statistical moments. Lincoln NE, USA: University of Nebraska. 1986.
39. Giordanengo JH, Frasier GW, Trlica MJ. Hydrologic and sediment responses to vegetation and soil disturbances. *J Range Manage* 2003;56(2):152-158.
40. Warkentin, BP. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. P 126-153. IN: Burnes KK. Editor. *Compaction of agricultural soils.* ASAE. St. Joseph. MI. 1971.
41. Warren SD, Nevill MB, Blackburn WH, Garza NE. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Sci Soc Am J* 1986;50(5):1336-1341.
42. Tate KW, Dudley DM, McDougald NK, George MR. Effect of canopy and grazing on soil bulk density. *J Range Manage* 2004;57(4):411-417.
43. Warren, SD, Blackburn WH, Taylor Jr CA. Soil hydrologic response to number of pastures and stocking density under intensive rotation grazing. *J Range Manage* 1986;39:500-504.
44. Skopp J. Physical properties of primary particles. In: *Handbook of soil science.* Chapter 1., Boca Raton, FL: CRC Press; 2000.

45. Skopp J. Physical concepts of soils. Class notes. Chapter 6. University of Nebraska - Lincoln. Lincoln, NE. 1998.
46. Lewis TL. Great plains field pedology. Class notes. Chapter 7. University of Nebraska - Lincoln. Lincoln, NE. 1997.
47. Sparks DL. Environmental soil chemistry. San Diego, California, USA: Academic Press Inc; 1995.