

Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I. Pérdidas de suelo

Hydrological characterization of a communal rangeland excluded from cattle grazing at Zacatecas, Mexico. I. Soil losses

Alfonso Serna Pérez^a, Francisco Guadalupe Echavarría Cháirez^a

RESUMEN

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de manejo y condiciones de vegetación nativa, así como la estimación de los parámetros de erosión hídrica factores de erodabilidad K y de vegetación C , de la ecuación universal de la pérdida del suelo, o USLE, que contribuyan a la identificación de áreas semejantes para extrapolación, fueron evaluados en una área de exclusión de un agostadero comunal. Se establecieron tres sistemas de manejo en cuatro condiciones de vegetación nativa predominantes. Los sistemas de manejo y las condiciones de vegetación fueron caracterizados con base en su capacidad para reducir pérdidas de suelo. El factor de energía cinética R osciló entre 382 y 2,110 MJ-mm/ha-h. Los tratamientos y condiciones de vegetación nativa evaluados mostraron diferencias en pérdidas de suelo, pero sin exceder el límite permisible en la región, que es de 2.2 ton/ha/año. El sistema de manejo que presentó las menores pérdidas de suelo fue una combinación de nopal rastrero y variedades productoras de tuna, nopal forrajero y verdura. La nopalera densa (2,000 plantas/ha) mostró las menores pérdidas de suelo. Se derivaron parámetros para la extrapolación de resultados, con criterios de conservación de suelo y agua. La exclusión gradual de pequeñas áreas como la aquí estudiada (53 ha) aunado a la introducción de un sistema de pastoreo menos intenso, deberá considerarse en las áreas de explotación comunal como una opción para iniciar la rehabilitación de los agostaderos.

PALABRAS CLAVE: Agostadero, Area comunal, Exclusión, Erosión hídrica, Lotes de escurrimiento, USLE.

ABSTRACT

Soil losses due to water erosion under different management systems and native vegetation conditions, as well as the estimate of erosion parameters of the universal soil loss equation (USLE) were evaluated in an exclusion area of a communal rangeland. The USLE parameters were the soil erodibility factor (K) and the cover and management factor (C), which can be used to identify similar areas for results extrapolation. Three management systems and four predominant native vegetation conditions were studied. The management systems and the vegetation conditions were characterized based on their capacity to reduce soil loss. The kinetic energy factor R fluctuated between 382 and 2,100 MJ-mm/ha-h. The management systems and native vegetation conditions evaluated showed differences in soil losses, but without exceeding the allowed erosion limit for the region, which is 2.2 ton/ha/year. The management system, which showed the minimum soil losses, was a combination of trailing prickly pear and varieties that produce fruit and vegetative parts for human and animal consumption. Dense prickly pear clumps (2,000 plants/ha) showed the lower soil losses. The gradual exclusion of small areas, like the one in this study (53 ha), plus the introduction of a less intensive grazing system, must be considered in communally used lands as an option for rehabilitation of rangelands.

KEY WORDS: Rangelands, Communal area, Exclusion, Water erosion, Runoff plots, USLE.

INTRODUCCIÓN

En el altiplano zacatecano, más de 5 millones de hectáreas se dedican a la explotación pecuaria

INTRODUCTION

In the Zacatecas plateau more than 5 million hectares are dedicated to extensive livestock production,

Recibido el 8 de marzo de 2001 y aceptado para su publicación el 27 de septiembre de 2001.

^a Campo Experimental Calera. CIR-Norte Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. AP # 18. Km. 24.5 Carr. Zacatecas-Fresnillo. Calera V.R., Zacatecas. 98500. México. aserna_2@yahoo.com Correspondencia y solicitud de separatas al primer autor.

extensiva, en donde se practica el pastoreo continuo de los agostaderos por bovinos, ovinos, caprinos y equinos. La presión de uso sobre el agostadero ha resultado en una reducción de la cobertura vegetal y en un incremento de la superficie de suelo desnudo, que expone a este último a los agentes erosivos, con la consecuente pérdida de agua, suelo y nutrimentos.

Los pastizales aportan cantidades significativas de sedimentos en las cuencas en que se encuentran establecidos⁽¹⁾; sin embargo, tales cantidades pueden ser consideradas como una fuente de contaminación poco importante, siempre y cuando no excedan los umbrales de erosión⁽²⁾. El problema de la producción de sedimentos, con frecuencia resulta de la utilización de prácticas inadecuadas de manejo de pastizal⁽³⁾.

El pastoreo modifica la cantidad y tipo de vegetación, los cuales cambian las características hidrológicas de la superficie del suelo⁽⁴⁾. La reducción de la cubierta vegetal incrementa el impacto de la gota de lluvia, reduce la materia orgánica del suelo y agregados, incrementa el encostramiento de la superficie del suelo y reduce la tasa de infiltración⁽³⁾.

La modificación de las propiedades físicas del suelo por el pastoreo intenso junto con la reducción en la cobertura vegetal, frecuentemente resultan en decremento de la tasa de infiltración e incremento en la erosión⁽⁵⁾. La alteración del tipo de vegetación puede también incrementar las pérdidas de sedimentos⁽⁶⁾.

En un estudio realizado en una gran variedad de suelos y comunidades vegetales, algunos autores⁽⁷⁾ concluyeron que la tasa de infiltración y la producción de sedimentos variaron considerablemente dentro y entre cuencas, con una alta variación entre comunidades vegetales. En un potrero no pastoreado durante 20 meses, se concluyó⁽⁶⁾ que la producción de sedimentos en zacatales medianos después de la exclusión del ganado, permaneció regularmente estable a través del estudio, pero en los zacatales cortos se redujo la pérdida de sedimentos. Otros autores⁽⁸⁾ encontraron que la exclusión al pastoreo de una área comunal no incrementó significativamente la cobertura del suelo; las tasas de infiltración y la erosión se mantuvieron sin cambios.

where continuous grazing of rangelands by cattle, sheep, goats and horses is practiced. The pressure on the use of rangelands has resulted in a reduction of plant cover and an increase of uncovered soil, which exposes it to erosive agents, consequently loosing water, soil and nutrients.

Ranges contribute significant quantities of sediments in the watersheds in which they are established⁽¹⁾, nevertheless such amounts can be considered as a reduced source of contamination, as long as erosion thresholds are not exceeded⁽²⁾. The problem of sediment production frequently results from the use of inadequate range management practices⁽³⁾.

Grazing modifies the amount and type of plants, which in turn change the hydrological characteristics of the soil surface⁽⁴⁾. The reduction of plant cover increases the impact of raindrops, reduces the amount of organic matter and aggregate stability in the soil; increases crust formation on the soil surface and reduces the water infiltration rate⁽⁵⁾. Alterations in the type of plants can also increase the loss of sediment⁽⁶⁾.

In a study done in a great variety of soils and plant communities, some authors⁽⁷⁾ concluded that the infiltration rate and sediment production varied considerably within and between watersheds, with a high variation between plant communities. In a pasture not grazed for 20 months⁽⁶⁾ it was concluded that the production of sediments in medium sized grasses after the exclusion of livestock remained regularly stable all along the study, but in short sized grasses loss of sediments was reduced. Other authors⁽⁸⁾ found that the exclusion of grazing from a communal area did not increase significantly the amount of plant cover on the soil; the infiltration rates and erosion were maintained without change.

Field work provides useful information of the effects of grazing, the exclusion or erosion. Results extrapolation requires the estimation of parameters that evaluate the hydrological conditions of the rangeland⁽⁹⁾. The universal soil loss equation (USLE) is a useful tool for estimating erosion, which when used properly, can be used for management decisions⁽¹⁰⁾. The parameters or factors of USLE

Los trabajos de campo proporcionan información útil sobre el efecto del pastoreo, la exclusión o la erosión. La extrapolación de resultados requiere de la estimación de parámetros que evalúen la condición hidrológica de los agostaderos⁽⁹⁾. La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés) es una herramienta útil para estimar la erosión, la que usada de manera propia, sirve para tomar decisiones de manejo⁽¹⁰⁾. Los parámetros o factores de la USLE están asociados con la pendiente del terreno, cantidad e intensidad de la precipitación, prácticas mecánicas de control de erosión, características hidrodinámicas de la superficie del suelo y densidad de la vegetación⁽¹¹⁾. Estos parámetros pueden ser estimados a partir de información obtenida en campo y en laboratorio, o bien a partir de información publicada a nivel mundial⁽¹²⁾. Los objetivos de este trabajo fueron: determinar las pérdidas de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de manejo y condiciones de vegetación nativa; y estimar parámetros de erosión hídrica (factores K y C de la USLE) para la extrapolación de resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó en una cuenca de 53 ha excluida al pastoreo desde 1994, la que se localiza en los 22° 54' Norte y 102° 33' Oeste, a una altitud media de 2,285 m. La precipitación promedio anual en la región es de 400 mm. La vegetación dominante es un "pastizal nativo-matorral espinoso-nopalera", con predominio en algunas áreas por pastizal y nopalera⁽¹³⁾. La fisiografía varía de ondulada a escarpada y presenta cárcavas muy desarrolladas. Los suelos son predominantemente arenosos (63 a 87 %), con pH moderadamente alcalino (7.8), bajo contenido de nutrimentos, materia orgánica (0.1 a 2.7 %) y sales. De acuerdo con la clasificación FAO-CETENAL⁽¹⁴⁾, los suelos de la cuenca se clasifican, en su mayor parte, como Litosoles y, en menor proporción, como Castañozem, con un horizonte petrocálcico a menos de 50 cm de profundidad.

Se identificaron cuatro tipos de vegetación en la cuenca: nopalera densa (ND), en una porción de la microcuenca, conocida como el cerro gordo, en

are associated with the slope of the land, quantity and intensity of rainfall, mechanical practices for erosion control, hydrodynamic characteristics of the soil surface and plant cover⁽¹¹⁾. These parameters can be estimated based on the information obtained in the field and in the laboratory, or from information published internationally⁽¹²⁾. The objectives of this work were: determine the soil losses due to water erosion in different management systems and native plant conditions; and estimate the water erosion parameters (factors K and C of USLE) for results extrapolation.

MATERIALS AND METHODS

Experimental work was performed in a micro watershed of 53 ha excluded from grazing since 1994, which is located at 22° 54' North latitude and 102° 33' West longitude, and a mean height of 2,285 m. The average annual rainfall of the region is 400 mm. The dominant vegetation is an association of native grasses, spiny shrubs and prickly pear clumps, with predominance of either native grasses or prickly pear clumps in some areas⁽¹³⁾. The physiography varies from wavy to steep, and has very well developed gullies. The soils are predominantly sandy (63 – 87%) with a moderately alkaline pH (7.8), low nutrient content, low organic matter content (0.1 – 2.7%) and low salts content. According to the FAO-CETENAL classification⁽¹⁴⁾ the soils of the river basin are classified, in their majority, as Lithosol and in lesser proportion as Castanozem with a petrocalcic horizon at less than 50 cm deep.

Four vegetation types were identified in the basin: dense prickly pear clumps (ND) in a portion of the micro watershed known as Cerro Gordo where the cover of wild prickly pear (*Opuntia Leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia Rastrera* Weber, *Opuntia hyptiacantha* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick, *Opuntia pachona* Griffiths) is nearly 2,000 plants/ha, with a considerable height (1 – 3 m) and an aerial cover of 80%. A second condition is range (P), which represents about a fourth of the watershed and is constituted by grasses (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida spp*, *Lycurus phleoides*

donde la cobertura de nopal silvestre (*Opuntia Leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia Rastrera* Weber, *Opuntia hyptiacantha* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick, *Opuntia pachona* Griffiths) es cercana a 2,000 plantas/ha, las cuales son de altura considerable (1 a 3 m), y una cobertura aérea del 80 %. Una segunda condición es el pastizal (P), el cual representa aproximadamente la cuarta parte de la cuenca y está constituida por gramíneas (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida* spp, *Lycurus phleoides* HBK) de escasa cobertura aérea (20.8 %). Se encuentran también dispersas algunas arbustivas y plantas anuales. La tercera condición la constituye la nopalera con arbustos (*Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd) M.C. Johnston, *Mimosa biuncifera* Benth), pastos y anuales de cobertura media (53.5 %) (NCM) y la cuarta es la nopalera con arbustos, pastos y anuales de cobertura baja (39.2 %) (NCB). Las dos últimas condiciones de vegetación (NCB y NCM) representan la mayor porción de la superficie del área de estudio.

Durante los meses de julio a septiembre de 1994 se establecieron tres sistemas de manejo de la vegetación (para consumo animal y humano) dentro del área experimental. La superficie de cada sistema fue de aproximadamente una hectárea, y se describen a continuación.

Plantación de chamizos (*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt) en cepas siguiendo la curva de nivel con bordos vivos (VCV) de nopal rastrero (*Opuntia Rastrera* Weber) en la parte baja de las cepas. El bordo vivo fue establecido pendiente abajo para ayudar a retener humedad y la pendiente predominante fue del 4 %. La combinación de ambas especies y el método de establecimiento tuvo la intención de promover la conservación de suelo y agua. La distancia entre líneas de plantas se estimó con la metodología del Colegio de Postgraduados⁽¹⁵⁾ para bordos antierosivos.

Pastizal con plantación de chamizos en bordo de tierra (PCB); en una área cubierta por gramíneas nativas se trazaron y construyeron bordos antierosivos de aproximadamente 40 cm de altura. La distancia entre bordos se estimó con la

HBK) with low aerial cover (20.8 %). Some shrubs and annual plants are also spread over the basin. The third condition is an association of prickly pear clumps, shrubs (*Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd) M.C. Johnston, *Mimosa biuncifera* Benth), grasses and annual plants of medium cover (53.5 %) (NCM) and the fourth is an association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annual plants of low cover (39.2 %) (NCB). The last two plant conditions (NCB and NCM) represent the larger proportion of the total studied area.

During the months of July to September of 1994 three plant management systems were established (for human and animal consumption) within the experimental area. The area of each system was approximately of one hectare, as described below.

Fourwing Saltbush (*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt) was planted in the bottom of water holding cavities following the level curve. Besides, trailing prickly pear (*Opuntia Rastrera* Weber) was established outside the cavities, acting as barriers, in order to help maintain humidity (VCV). The predominant slope was of 4 %. The combination of both species and the establishment method had the intention of promoting conservation of water and soil. The distance between plant lines was estimated with the Postgraduate College methodology⁽¹⁵⁾ for anti-erosive furrows.

Range with fourwing saltbush planted in soil furrow dikes (PCB); in a native grass covered area. The anti-erosive furrow dikes were approximately 40 cm in height. The distance between furrows was estimated with the Postgraduate College methodology⁽¹⁵⁾. On the ridge fourwing saltbush shrubs were planted. In the strip between furrows, a mixture of grasses was seeded (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) lag, *Cenchrus ciliaris* (L) and *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees).

In an area covered with native grasses, level curves were traced and fruit giving and vegetative prickly pear plants were established. This re-vegetation treatment has the purpose of generate an income

metodología del Colegio de Postgraduados⁽¹⁵⁾. En el lomo se plantaron arbustos de chamizo, y en el valle aguas arriba se sembró una mezcla de pastos. (*Bouteloua curtipendula* tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) lag, *Cenchrus ciliaris* (L.) y *Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees).

En una área cubierta por gramíneas nativas se trazaron curvas a nivel y se establecieron plantas de nopal tunero y verdura, la cual es una repoblación productiva (RP). Cada curva se estableció alternadamente con curvas con nopal rastrero, para promover la producción de fruta y verdura, así como la conservación de agua y suelo. La distancia entre líneas de nopal se estimó con la metodología del Colegio de Postgraduados⁽¹⁵⁾.

Para evaluar el efecto que las diferentes condiciones de vegetación y opciones de manejo descritas anteriormente tuvieron sobre las pérdidas suelo, se instalaron lotes de escurrimiento estándar de 3 x 22 m equipados con colectores y tanques de almacenamiento para captar el agua escurrida y los sedimentos⁽¹⁶⁾. Se instaló un lote de escurrimiento adicional, cuya superficie siempre se mantuvo desnuda o sin vegetación (SD) mediante el uso de herbicidas. La finalidad de este lote fue proporcionar información acerca de la erosión potencial en cada tormenta. A partir del año de 1998 se establecieron parcelas de escurrimiento estándar para todos los sistemas de manejo, además de tres parcelas extras, instaladas en igual número de condiciones de vegetación predominantes en la área de exclusión.

En cada uno de los lotes de escurrimiento se estimaron la pendiente, la cobertura basal y el microrrelieve. La pendiente se determinó usando una manguera de plástico transparente de 1.0 cm de diámetro llena de agua y dos reglas graduadas. Se efectuaron tres repeticiones por lote de escurrimiento. Para la determinación de la cobertura basal y microrrelieve se utilizó un marco de puntos de 20 agujas^(17,18). Las variables de cobertura consideradas fueron cobertura basal del estrato herbáceo, mantillo orgánico, suelo desnudo, grava y roca; se consideró como mantillo orgánico el material vegetal muerto que ya no forma parte del pasto o de la planta anual. El microrrelieve del suelo se consigna como

for the owners (RP). Each curve was established alternately with curves of trailing prickly pear in order to promote fruit and vegetable production, as well as conservation of water and soil. The distance between prickly pear lines was estimated with the Postgraduate College methodology⁽¹⁵⁾.

In order to evaluate the effect that the different plant conditions and management options aforementioned had on soil losses, standard runoff plots of 3 x 22 m, equipped with collectors and storage tanks for catching runoff water and sediments were installed⁽¹⁶⁾. An additional runoff plot was installed, its area was always kept uncovered or without vegetation (SD) using herbicides. The object of this plot was to give additional information on the potential erosion of each storm. From 1998 standard runoff plots were established for all of the management systems, and three extra plots, installed in an equal number of conditions of predominant vegetation in the exclusion area.

In each of the runoff plots the slope, basal cover and micro relief were estimated. The slope was determined using a transparent plastic hose of 1 cm in diameter full of water and two graded rulers. Three repetitions were made for each runoff plot. For determining basal cover and micro relief a point frame with 20 needles was used^(17,18). The plant cover variables considered were basal plant cover, litter, bare soil, gravel and rock; litter was considered to be the dead organic material that no longer is part of the grass or annual plant. The soil micro relief was considered to be the standard deviation of heights taken from a parallel plane of the soil surface. The number of repetitions for obtaining each of basal cover and micro relief was three per runoff plot. These variables were determined once at the end of the study (December 1999).

The records of rainfall were obtained with two rain gages and one recording rain gage. The magnitude and intensity of rainfall (mm and mm/h respectively) and the runoff volume (V_{esc} in liters) of each of the runoff plots were registered for each event. Also and aliquot (one liter of water) was taken for each plot in order to determine in the laboratory the suspended sediments (g/l).

la desviación estándar de alturas tomadas desde un plano paralelo a la superficie del suelo. El número de repeticiones para la obtención de cobertura basal y microrrelieve fue de tres por lote de escurrimiento. Estas variables se determinaron una sola vez al final del estudio (diciembre de 1999).

El registro de la precipitación pluvial se obtuvo con dos pluviómetros y un pluviógrafo. La magnitud e intensidad de la precipitación pluvial (mm y mm/h respectivamente), y el volumen escurrido (V_{esc} en litros) en cada una de las parcelas de escorrentía fueron registrados para cada evento. Asimismo, se tomó una alícuota (un litro de agua escurrida) por parcela para determinar en laboratorio los sedimentos en suspensión (g/l).

La separación de los sedimentos en suspensión de cada alícuota se realizó a través de un filtrado, utilizando papel filtro Whatman del No. 2. La erosión (Er) se determinó multiplicando los sedimentos por la cantidad total escurrida, de allí se extrapoló a kilogramos por hectárea. Con las gráficas del pluviógrafo (hietogramas) de cada evento lluvioso se estimó el índice EI_{30} (megajoules-mm/ha-h)⁽¹⁹⁾, el cual representa la energía de la máxima intensidad de lluvia por 30 minutos. Para estimar dicho índice se siguió la metodología descrita por Figueroa *et al*⁽¹²⁾. Además, una vez calculado el índice EI_{30} , éste se usó para estimar el factor de erosividad R (MJ-mm/ha-h-año). El factor R se calculó acumulando el valor del índice EI_{30} de cada tormenta en el año. Otra información obtenida es la erosión por evento (Er en kg/ha) en función del índice EI_{30} , el cual se calculó por medio de relaciones no lineales⁽²⁰⁾ para cada sitio de estudio (suelo desnudo, opción de manejo y condición de vegetación), las cuales predicen por evento la erosión de acuerdo con el siguiente modelo:

$$Er = \alpha (EI_{30})^\beta \dots \dots \dots (1)$$

en donde Er es la erosión en kg/ha, α y β son la pendiente e intercepto de la ecuación de regresión y EI_{30} es el índice de erosividad

Con la finalidad de contar con parámetros útiles para la extrapolación de los resultados obtenidos,

The separation of the suspended sediments of each aliquot was done by filtering using No. 2 Whatman filter paper. Erosion (Er) was determined by multiplying the sediments times the total runoff, extrapolating to kilograms per hectare. With the graphs from the recording rain gage (hyetographs) of each of the rain events the index EI_{30} was estimated (megajoules-mm/ha-h)⁽¹⁹⁾, thus representing the energy of the maximum intensity of the rainfall during 30 min. In order to estimate that index we followed the methodology described by Figueroa *et al*⁽¹²⁾. Also, once the EI_{30} index was calculated, we used it for estimating the erosion capacity factor R (MJ-mm/ha-h-year). Factor R was calculated accumulating the value of EI_{30} index of each storm in the year. Another piece of information obtained was erosion per event (Er in kg/ha) derived from EI_{30} index, and calculated with non-linear relationships⁽²⁰⁾ for each study site (bare soil, management option and plant condition). These relationships predict for each event the erosion according to the following model:

$$Er = \alpha (EI_{30})^\beta \dots \dots (1)$$

In which Er is erosion in kg/ha, α and β are the slope and intercept of the regression equation and EI_{30} is the erosion capacity index.

In order to have lineal parameters useful for extrapolation of the results that were obtained, as well as of the effect of plant cover recovery in relation to soil losses due to water erosion, we estimated the soil erodibility factor (K) and the cover and management factors (C) of USLE⁽¹⁶⁾ for the different management systems and predominant plant conditions in the study area. These parameters are also useful for planning and subsequent application of erosion control systems.

In order for us to estimate these factors we used the information obtained in the study area in relation to erosion, kinetic energy of rainfall and slope of the runoff plots. The USLE formula is the following:

$$E = RKLSCP \dots \dots \dots (2)$$

Where E is erosion (ton/ha/year), R is the rainfall erosivity factor (MJ-mm/ha-h), K is the soil

así como del efecto de la recuperación de la cobertura en cuanto a la pérdida de suelo por erosión hídrica, se estimaron el factor de erodabilidad del suelo (K) y los factores de vegetación (C), de USLE⁽¹⁶⁾ para los diferentes sistemas de manejo y condiciones de vegetación predominantes en el área de estudio. Estos parámetros, además, son útiles para la planeación y posterior aplicación de sistemas de control de la erosión.

Para la estimación de estos factores se utilizó la información obtenida en el área de estudio en cuanto a erosión, energía cinética de la precipitación pluvial y pendiente de los lotes de escorrentía. La fórmula de la USLE es la siguiente:

$$E = RKLSCP \dots \dots \dots (2)$$

en donde E es la erosión (ton/ha/año), R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ-mm/ha-h), K es el factor de erodabilidad del suelo (ton-ha-h/MJ-mm-ha), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor de grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de la vegetación (adimensional) y P es el factor de práctica mecánica de control de la erosión. La erosión E fue la obtenida de manera directa en cada uno de los lotes de escorrentía instalados en los sistemas de manejo, condiciones de vegetación predominantes y suelo desnudo (SD). El factor R se obtuvo para cada año a partir de los datos de intensidad de la lluvia como ya se explicó anteriormente, Los factores L y S se calcularon a partir de la pendiente y longitud de la misma para cada parcela de escorrentía utilizando las ecuaciones de Figueroa *et al.*⁽¹²⁾. Para el factor P se uso un valor de 0.6, el cual fue usado por los mismos autores⁽¹⁶⁾ para una opción de vegetación equivalente a PCB. Finalmente los factores K y C fueron los factores a estimar.

Para el cálculo del factor de erodabilidad K se utilizó la información obtenida en la parcela SD. En la condición SD se mantuvo siempre el terreno libre de vegetación mediante la aplicación de herbicidas y no existió práctica mecánica alguna para el control de la erosión, por lo que los factores C y P toman el valor de la unidad. De acuerdo con Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ el factor K se determina, en

erodibility factor (ton-ha-h/MJ-mm-ha), L is the slope length factor (non dimensional), S is the slope steepness factor (non dimensional), C is the cover and management factor (non dimensional) and P is the mechanical practice for erosion control. Erosion E was obtained directly for each one of the runoff plots installed in the management systems, predominant plant conditions and bare soil (SD). Factor R was obtained each year from the rainfall intensity data as explained above. Factors L and S were calculated from the slope gradient and its longitude for each runoff plot using the equations from Figueroa *et al.*⁽¹²⁾. For Factor P a value of 0.6 was used, which was used by the same authors⁽¹⁶⁾ for a vegetation option equivalent to PCB. Finally, factors K and C were the ones to be estimated.

To calculate the erodibility factor K we used the information obtained in plot SD. In the condition SD the land was always kept without vegetation by using herbicides, and no mechanical control of erosion was established, so factors C and P have a value of one. According to Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ factor K is determined, in runoff plots in non-standard conditions, with the following formula:

$$K = \frac{E}{RLSCP} \dots \dots \dots (3)$$

In equation (3) we substituted the values calculated for factors L and S for plot SD, as well as the values obtained from factor R and the annual erosion registered in that same runoff plot. The calculations were done for each year in which we had information, and finally an average value of factor K was obtained, which was considered representative for all of the study area due to the fact that the micro watershed is distributed in the same soil unit.

Once the erodibility factor was known, the cover factors (C) were estimated for the different multiple management systems and predominant plant conditions of the micro watershed. According to Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ factor C of USLE the quotient is obtained dividing the erosion obtained in a plot with a certain type of management or plant condition by the erosion obtained for the same plot under continuous cultivation, which in

parcelas de escorrentía para condiciones no estándar, a partir de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{E}{RLSCP} \dots \dots \dots (3)$$

Se sustituyeron en la ecuación (3) los valores calculados de los factores *L* y *S* para el lote SD, así como los valores obtenidos del factor *R* y la erosión anual registrada en esa misma parcela de escorrentía. Los cálculos se efectuaron para cada año en que se contó con información, y finalmente se obtuvo un valor promedio del factor *K*, mismo que se consideró representativo para toda la área de estudio, puesto que la cuenca se encuentra distribuida en una misma unidad de suelo.

Una vez conocido el valor del factor de erodabilidad, se estimaron los factores de vegetación (*C*) para los diferentes sistemas de manejo múltiple y condiciones predominantes de vegetación en la cuenca. De acuerdo con Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ el factor *C* de la USLE es el cociente que se obtiene al dividir la erosión obtenida en un terreno con cierto tipo de manejo o condición de vegetación entre la erosión obtenida para el mismo terreno bajo cultivo continuo, que en el caso de agostaderos o pastizales es la erosión obtenida bajo SD.

Las parcelas de escorrentía, a pesar de encontrarse en las mismas condiciones en cuanto a unidad de suelo y de precipitación pluvial, además de ser de dimensiones similares, se instalaron en pendientes diversas, por lo que la erosión potencial anual ocurrida en la parcela SD se ajustó a las diferentes condiciones de grado de pendiente de cada una de las parcelas del estudio. Para ello, se sustituyó en la ecuación (2), el valor del factor *LS* estimado en cada parcela, manteniendo constantes los valores de los demás factores propios de dicha parcela de escorrentía. El resultado obtenido fue un conjunto de valores de erosión potencial anual, comparables con cada una de los valores de erosión anual obtenidos para los sistemas de manejo y condiciones de vegetación predominantes. Finalmente, se obtuvieron los cocientes entre erosión anual (por sistema y condición) y potencial, los que corresponden al factor de vegetación (*C*) de la USLE

the case of rangeland or pastures is the erosion obtained under SD.

The runoff plots, even though they are in the same soil unit, rainfall and similar dimensions, they were installed in different slopes, so that the annual potential erosion occurring in plot SD was adjusted to the different conditions of slope gradient of each of the studied plots. For this we substituted in equation (2) the value of factor *LS* estimated in each plot, keeping as constant the rest of the factors of said runoff plot. The result obtained was a set of annual potential erosion values, comparable with each of the annual erosion values obtained for the different management systems and predominant plant conditions. Finally, we obtained the quotients between the annual (per system and condition) and potential erosion, which correspond to vegetation factor (*C*) of USLE, and we estimated the average and the confidence intervals of said variable for the different management systems and predominant plant conditions.

The information was analyzed estimating the statistical significance of the model's parameters, and estimating the correlation coefficients^(21,22).

RESULTS AND DISCUSSION

The study was performed under low rainfall conditions, with values below the regional mean of 400 mm. In 1999 the annual rainfall was of about 40% of the mean rainfall (Table 1). The annual accumulated kinetic energy (Factor *R* of USLE) showed a similar behavior, with values below 3,500 MJ-mm/ha-h, which was the average value, stated by Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ as representative of this variable in the region; nevertheless in this study the values were lower in two of the years of the study period.

According to the information presented in Table 2, soil losses due to water erosion in the management systems, as well as in the predominant plant conditions, were always lower than SD. The erosion magnitude in all of the cases varied between years, in terms of accumulated kinetic energy, the total annual rainfall and to a lesser extent the number of storms per year. The maximum accumulated annual values of soil losses occurred in 1998. The maximum

y se estimaron los promedios e intervalos de confianza de dicha variable para los diferentes sistemas de manejo y condiciones de vegetación predominantes.

Para el análisis de la información se estimaron las significancias estadísticas de los parámetros de los modelos y se calcularon los coeficientes de correlación^(21,22)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El trabajo se condujo en condiciones de baja precipitación, con valores inferiores a la media regional de 400 mm. En 1999 la precipitación pluvial anual fue de alrededor del 40 % de la precipitación media (Cuadro 1). La energía cinética acumulada anual (factor *R* de la USLE), mostró un comportamiento similar, con valores inferiores a los 3,500 MJ-mm/ha-h, el cual fue el valor promedio consignado por Figueroa *et al*⁽¹²⁾, como representativo de esta variable en la región; sin embargo, en este estudio los valores fueron menores en dos de los años del periodo de estudio.

De acuerdo con la información presentada en el Cuadro 2, las pérdidas de suelo por erosión hídrica en los sistemas de manejo, así como en las condiciones de vegetación predominantes siempre fueron menores a la SD. La magnitud de la erosión en todos los casos varió entre años, en términos de la magnitud de la energía cinética acumulada, el total de la precipitación anual y, en menor grado el número de tormentas por año. Los valores acumulados anuales máximos de pérdida de suelo

observed value in SD conditions was 7,081 kg/ha/year, amount that does not correspond to the one referred to in Table 2 because the amount presented is the accumulated from only 17 storms, which was 5,539 kg/ha/year. The other five events were excluded because we only have partial information because the measuring equipment was installed during 1997.

For the management systems, in Table 2 one can observe that during 1998 RP had the least annual soil loss due to water erosion, while the other two systems showed approximately the same values. In 1999, which was the driest of the study period, the values of RP and VCV were similar and the lower loss due to erosion was observed in PCB. It is worth pointing out that indeed the PCB system was the one that presented the most loss the year before. These inconsistencies can be attributed, in the case of the PCB system, to the fact that for construction of the soil dikes it was necessary to break the soil surface with agricultural machinery (tractor and dike maker) so that when rain occurred, the broken soil offered less resistance to breakage of soil aggregates and subsequent drag during the first year. In the second year, stabilization and crust formation in the dikes and adjacent areas represented an important obstacle for the aforementioned erosion processes. The option that presented the least soil losses due to water erosion for the two years of the study period was RP, followed by VCV and PCB, of which these last two had similar measurements.

In relation to predominant plant conditions, in Table 2 one can observe that the minimal annual soil

Cuadro 1. Número de tormentas, precipitación total y energía cinética acumulada (Factor de erosividad *R*) por año, en el área de estudio

Table 1. Number of storms, total rainfall and accumulated kinetic energy (rainfall factor *R*) per year in the study area

Year	Total number of storms	Total annual rainfall (mm)	Annual accumulated kinetic energy (Factor <i>R</i> , MJ-mm/ha-h)
1996	28	305.4	1198.84
1997	26	345.1	539.92
1998	29	372.6	2110.31
1999	18	155.9	382.91

se presentaron en el año de 1998. El valor máximo observado en condiciones de SD fue de 7,081 kg/ha/año, cantidad que no corresponde con la referida en el Cuadro 2, ya que en ese caso el dato presentado es el acumulado de 17 tormentas únicamente, el cual fue de 5,539 kg/ha/año; los otros cinco eventos fueron excluidos ya que sólo se tiene información parcial porque el equipo de medición fue instalado en el curso de 1997.

Para los sistemas de manejo, en el Cuadro 2 se observa que durante el año de 1998, RP presentó la menor pérdida anual de suelo por erosión hídrica, mientras que los otros dos sistemas mostraron valores aproximadamente iguales. En el año de 1999, que fue el más seco del periodo de estudio, los valores observados fueron parecidos en RP y VCV, la menor pérdida por erosión se observó en el sistema PCB. Cabe resaltar que fue precisamente el sistema PCB el que presentó la mayor pérdida el año anterior. Estas inconsistencias pueden ser atribuidas para el caso del sistema PCB a que, para la construcción de los bordos de tierra fue necesario realizar la roturación de la superficie del suelo con maquinaria agrícola (tractor y bordeadora), de tal forma que al ocurrir la precipitación pluvial, el suelo roturado presentó menor resistencia al desprendimiento de agregados del suelo y su posterior arrastre durante el primer año. En el segundo año, la estabilización y encostramiento de los bordos y áreas adyacentes representó un

losses due to water erosion were presented, in order of magnitude, in conditions ND and NCM respectively. It is noteworthy that the values correspond to magnitudes of 0.4 to 40 kg/ha/year, which can be considered as null or imperceptible erosion when compared with the allowed soil loss threshold for a soil depth of less than 20 cm or more drastic conditions of 2.2 ton/ha/year⁽²³⁾. The P and NCB plant conditions showed annual erosion values greater than the aforementioned plant conditions, especially in 1998, reverting the erosion magnitude for both conditions in 1999. The differences in erosion observed between both vegetation condition groups can be explained due to a greater basal cover of litter and vegetation in ND and NCM (21.7% and 40% respectively) than the ones found in P and NCB (1.7% and 10.0% respectively). Also in the first group of vegetation conditions the frequency of prickly pear plants of large size was considerable (2,000 plants/ha), while in condition NCM the frequency of prickly pear plants and shrubs of lesser size is also high (4,200 plants/ha) although of lesser cover. In P this is null or almost non-existent. The average soil loss for the two years of the study period in the vegetation conditions studied behaved as follows: ND < NCM < P < NCB.

The maximum observed soil losses for an individual storm, per year of the study period, are shown in

Cuadro 2. Pérdidas de suelo por erosión hídrica (kg/ha/año) en condiciones de vegetación predominantes, sistemas de manejo y suelo desnudo

Table 2. Soil losses due to water erosion (kg/ha/year) in predominant plant conditions, management systems and bare soil

	SD	Predominant vegetation conditions				Management Systems		
		ND	NCB	P	NCM	VCV	RP	PCB
1997	1228.4	5.8	-	-	-	-	-	-
1998 ^a	5539.3	9.5	912.4	769.7	49.3	985.2	615.0	1080.5
1999	366.7	0.5	88.0	116.0	0.9	50.1	56.7	29.9

^a From 22-runoff events recorded in the year only 17 were considered.

SD= bare soil; ND= dense clumps of prickly pear; NCB= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of low cover; P= range; NCM= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of medium cover; VCV= fourwing saltbush with trailing prickly pear; RP= prickly pear re-vegetation; PCB= range with fourwing saltbush planted on soil dikes.

obstáculo importante para los procesos erosivos ya mencionados. La opción que presentó las menores pérdidas de suelo por erosión hídrica para los dos años de estudio fue la RP seguida por VCV y PCB; estas dos últimas mostraron medias similares.

Con respecto a las condiciones de vegetación predominantes, en el Cuadro 2 se observa que las pérdidas anuales por erosión hídrica más pequeñas se presentaron, por orden de menor magnitud, en las condiciones ND y NCM respectivamente. Es de notar que los valores corresponden a magnitudes de 0.4 a 40 kg/ha/año, los cuales pueden considerarse como erosión imperceptible o nula, al ser comparados con el umbral de pérdida de suelo permisible para una profundidad del suelo menor de 20 cm o condiciones más drásticas, que es de 2.2 ton/ha/año⁽²³⁾. Las condiciones de vegetación P y NCB, mostraron valores de erosión anual mayores que las condiciones de vegetación anteriormente mencionadas, especialmente en el año de 1998, revirtiéndose la magnitud de la erosión para ambas condiciones en el año de 1999. Las diferencias en la erosión observadas entre ambos grupos de condiciones de vegetación se explica por una mayor cobertura basal de mantillo orgánico y vegetal en ND y NCM (21.7 y 40.0 %, respectivamente) que en P y NCB (1.7 y 10.0 %, respectivamente), además de que en el primer grupo de condiciones de vegetación, la frecuencia de plantas de nopal de gran tamaño fue de consideración (2,000 plantas/ha), mientras que en la condición NCM la frecuencia de nopal y arbustos de menor tamaño es también alta (4,200 plantas/ha) aunque de baja cobertura, y en P nula o casi nula. La pérdida promedio de suelo para los dos años de estudio en las condiciones de vegetación estudiadas se comportó así: ND < NCM < P < NCB.

Las pérdidas de suelo máximas observadas para una tormenta individual, por año del período de estudio, se muestran en el Cuadro 3. La elección de esta variable se realizó considerando el total de eventos escurridos en cada año, por lo que se presentan algunas inconsistencias con los datos presentados en el Cuadro 2 para el año de 1998, principalmente en ND y P, donde el total anual es menor, ya que fue calculado, en este año

Table 3. For this variable the total runoff events in each year was considered, showing some inconsistencies with the data presented in Table 2 for 1998, especially for ND and P, where the annual total is less because it was calculated, for this year only, for a portion of the sampling space (17 of 22 events). In this case two of the events not included in the total showed maximum values that were larger than the sum of the other 17 events together, which serves to indicate the magnitude of the intensity that one event can have. Nevertheless, in all of the years of the study period, the maximum observed losses in the management systems and vegetation conditions were always less than the ones occurring in SD. On the other hand, in spite of the management system type or vegetation condition, the maximum observed soil losses occurred in 1998, year in which also the maximum annual accumulated value for factor R and total rainfall were found.

In the management systems, the maximum erosion due to an individual storm showed a similar performance to the one described for the annual total erosion (Tables 2 and 3), so that the possible causes are the ones already mentioned to explain the annual soil losses. It is interesting to note that the individual events of maximum erosion corresponded to the same storm in 1998, which had a magnitude of 35 mm and a maximum intensity in 30 minutes of 49.2 mm/h. In 1999, only the individual event of maximum erosion for system PCB did not correspond to the same storm. Nevertheless I_{30} of said storm was approximately the same as the one that caused the maximum erosion in VCV and RP (13.3 and 13.4 mm/h respectively). When two events with the same I_{30} occur the probability of observing similar or maximum erosions is very high. With this we demonstrate the degree of association between I_{30} and the magnitude of erosion.

In relation to the predominant plant conditions the maximum soil loss per individual storm occurred in P, reaching a magnitude comparable to the maximum observed in SD during 1998 (Table 3). For this same year in the NCB vegetation condition a maximum erosion per individual storm was obtained at around 25% of that occurring in P, which although being smaller, indicates that even

Cuadro 3. Pérdidas de suelo máximas observadas (kg/ha) por tormenta individual y año en condiciones de vegetación predominantes, sistemas de manejo y suelo desnudo (SD)

Table 3. Maximum observed soil losses (kg/ha) per individual storm and year in predominant plant conditions, management systems and bare soil (SD).

	Predominant vegetation conditions					Management systems		
	SD	ND	NCB	P	NCM	VCV	RP	PCB
1997	971.5	3.1	-	-	-	-	-	-
1998	1731.0	21.4	410.7	1605.2	25.9	332.9	303.4	853.0
1999	89.6	0.3	34.1	41.5	0.9	26.0	29.7	9.0

SD= bare soil; ND= dense clumps of prickly pear; NCB= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of low cover; P= range; NCM= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of medium cover; VCV= fourwing saltbush with trailing prickly pear; RP= prickly pear re-vegetation; PCB= range with fourwing saltbush planted on soil dikes.

únicamente, para una porción del espacio muestral (17 de 22 eventos). En este caso, dos de los eventos no incluidos en la suma total, mostraron valores máximos que fueron mayores a la suma total de 17 eventos, lo que sirve para indicar la magnitud de la intensidad que puede tener un solo evento. Sin embargo, en todos los años del periodo de estudio, las pérdidas máximas observadas en los sistemas de manejo y condiciones de vegetación siempre fueron menores a las ocurridas en SD. Por otra parte, al margen del tipo de sistema o condición de vegetación, las pérdidas máximas de suelo observadas ocurrieron en 1998, año en el que se presentaron, además, los valores máximos del acumulado anual del factor R y de precipitación total.

En los sistemas de manejo, la erosión máxima por tormenta individual presentó un comportamiento similar al descrito para la erosión total anual (Cuadros 2 y 3), por lo que las posibles causas son las ya mencionadas para explicar la pérdidas anuales de suelo. Es interesante hacer notar que los eventos individuales de erosión máxima correspondieron a la misma tormenta en el año de 1998, la cual tuvo una magnitud de 35 mm y una intensidad máxima en 30 minutos de 49.2 mm/h. En el año de 1999 sólo el evento individual de erosión máxima para el sistema PCB no correspondió con la misma tormenta, sin embargo, la I_{30} de dicha tormenta fue aproximadamente igual a la que provocó la erosión máxima en VCV y RP (13.3 y 13.4 mm/

though the risk of erosion is reduced, it is still high if one considers that it corresponds to a single event. In contrast, conditions ND and NCM showed low values of maximum erosion for a rainfall event in 1998. This contrast shows the importance of plant cover for protection of the soil against erosion. During 1999 the maximum soil losses per rainfall event in general presented lower values, although the behavior of these was similar to the one mentioned for 1998, with magnitudes considered as of low importance in ND and NCM vegetation conditions (Table 3). In this case the different vegetation conditions did not respond in the same way (for soil loss) to one particular storm.

A joint analysis of the information allows inference that the RP management system reduced, to a great extent, soil losses due to water erosion, and that the other management systems of livestock importance (VCV and PCB) showed a similar behavior. Of the predominant plant conditions, it is possible to infer that the ND and NCM conditions showed a good condition in regards to basal plant cover, litter and aerial plant cover, which contributed to the reduction of the soil losses due to water erosion. Conditions P and NCB, perhaps due to the fact that the first one was located in an area of lower potential or due to the fact that it was subjected to a more intensive use (greater area of uncovered soil), had greater soil losses due to water erosion, although during the study period they never exceeded the maximum soil loss allowed.

h respectivamente). Al presentarse dos eventos con la misma I_{30} , la probabilidad de observar erosiones semejantes o máximas es alta. Con esto se muestra el grado de asociación entre I_{30} y la magnitud de erosión.

Con respecto a las condiciones de vegetación predominantes, la máxima pérdida de suelo por tormenta individual ocurrió en P, que alcanzó una magnitud comparable con la máxima observada en SD durante 1998 (Cuadro 3). Para ese mismo año, en la condición de vegetación NCB se tuvo una erosión máxima por tormenta individual de alrededor del 25 % de aquella ocurrida en P, la que a pesar de ser menor, indica que aunque se reduce el riesgo de erosión, aún es alto, si se considera que corresponde a un solo evento. Por el contrario, las condiciones ND y NCM mostraron valores bajos de erosión máxima para un evento lluvioso en 1998. Este contraste muestra la importancia de la cubierta vegetal para proteger al suelo contra la erosión. Durante 1999 las pérdidas máximas de suelo por evento lluvioso presentaron en general valores menores, aunque el comportamiento de estos fue similar al mencionado para 1998, con magnitudes consideradas como poco importantes en las condiciones de vegetación ND y NCM (Cuadro 3). En este caso las diferentes condiciones de vegetación no respondieron de la

The non linear model showed that the high erosion values are associated with high values of b coefficient, in other words there is a relationship between the management system or predominant plant condition and then this coefficient in turn can be considered as an indirect estimator of the cover factor (Table 4).

The correlation analysis showed that the basal plant cover (-0.79 ; $P < 0.01$) and cover by rocks (0.71 ; $P < 0.05$) had a significant effect on this process; the first one reduced such losses and the second one promoted it. The negative correlation encountered with plant cover allows the establishing of the positive effect of maintaining a minimum plant cover in order to avoid soil loss. The presence of a greater cover is related to the exclusion of grazing. On the other hand, although the presence of rocks (flourishing) reduces the intensity of the impact of rain on the soil, its effect is positively associated with soil losses.

The average values and the confidence value ($P = 0.10$) of factor K estimated for the study area were 0.0023 ± 0.0013 ton-ha-hr/MJ-mm-ha. Figueroa *et al*⁽¹²⁾ mention a value of 0.0195 for soil units and textures found in the basin, which is greater than the one obtained experimentally, this is due to the fact that the values commonly assigned

Cuadro 4. Parámetros del modelo no lineal de erosión $Er = \alpha(EI_{30})^\beta$, para tormentas individuales y coeficientes de determinación, en diferentes condiciones de vegetación y sistemas de manejo

Table 4. Parameters of the non-linear model of erosion $Er = \alpha(EI_{30})^\beta$ for individual storms and determination coefficient in different plant conditions and management systems

Parameter	Predominant plant conditions					Management systems		
	SD	ND	NCB	P	NCM	VCV	RP	PCB
n	28	18	24	30	15	25	20	21
α	0.2868*	0.0124**	0.0697**	0.0489**	0.0117**	0.0730**	0.0515**	0.0118**
β	1.2715**	0.7714**	1.2212**	1.3473**	0.8792**	1.1869**	0.9376**	1.4599**
r ²	0.7095**	0.4286**	0.5543**	0.7641**	0.4022**	0.6971**	0.5549**	0.6362**

**($P < 0.01$), *($P < 0.05$), NS = Not significant

SD= bare soil; ND= dense clumps of prickly pear; NCB= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of low cover; P= range; NCM= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of medium cover; VCV= fourwing saltbush with trailing prickly pear; RP= prickly pear re-vegetation; PCB= range with fourwing saltbush planted on soil dikes.

misma forma (como pérdida de suelo) a alguna tormenta en particular.

Un análisis conjunto de la información permite inferir que el sistema de manejo RP redujo, en mayor grado, las pérdidas de suelo por erosión hídrica, y los otros sistemas de manejo de importancia para el uso pecuario (VCV y PCB) mostraron un comportamiento similar. De las condiciones de vegetación predominantes, es posible inferir que las condiciones ND y NCM alcanzaron una buena condición en cuanto a cobertura basal vegetal, mantillo orgánico y cobertura vegetal aérea, lo que contribuyó a que las pérdidas de suelo por erosión hídrica se redujeran notoriamente. Las condiciones P y NCB, tal vez por encontrarse en una área de menor potencial, la primera, o por haber sido sometida a una mayor sobreutilización, la segunda (mayor superficie desnuda), tuvieron mayores pérdidas de suelo por erosión hídrica, aunque durante el período de estudio nunca excedieron el límite máximo permisible de pérdida de suelo.

El modelo no lineal mostró que valores altos de erosión se asocian con valores altos del coeficiente *b*, o sea que existe una relación del tipo de sistema de manejo o condición de vegetación predominante y entonces este coeficiente puede ser considerado como un estimador indirecto del factor de vegetación (Cuadro 4).

El análisis de correlación mostró que la cobertura basal vegetal (-0.79; $P < 0.01$) y por rocas (0.71;

in the literature are for agricultural soils, which due to their plowing are more susceptible of being dragged than rangeland soils. In a study done in the range areas of the State of Chihuahua, Jasso *et al.*⁽¹¹⁾ mention magnitudes for factor *K* of 0.004 ton-ha-h/MJ-mm-ha, a value close to the one obtained in this study. These same authors⁽⁹⁾ conclude that the rockiness and lime flourishing in range areas can act as stabilizing agents for the soil and increase the resistance to breakage and transport, reducing the values of factor *K*. When analyzing the information presented in Table 7 we saw that the percentages of cover by gravel and rock were important in the majority of the management systems and predominant plant conditions, which strengthens the conclusions of the referenced authors⁽¹¹⁾.

In respect to factor *C* of USLE (Table 5), with the exception of the value for system ND, which is low, all of the values are congruous in their magnitude with other vegetation factors mentioned in the literature for grazed areas^(11,12). Nevertheless in the ND system the maximum value was obtained for micro relief along all of the different systems and vegetation conditions studied (Table 6). This variable could be producing an underestimation of the effect of the vegetation present and overestimating the effect of the slope steepness and slope length factor (LS). This problem is difficult to solve because in order to be able to make a precise estimation of factor LS one would have to make a very detailed topographical analysis in the runoff

Cuadro 5. Promedio e intervalo de confianza (IC) del factor de vegetación *C* de la EUPS, en diferentes condiciones de vegetación predominantes y sistemas de manejo

Table 5. Average and confidence interval (IC) of the vegetation factor *C* of USLE in different predominant plant conditions and management systems

	Predominant plant conditions				Management systems		
	ND	NCB	P	NCM	VCV	RP	PCB
Average	0.0016	0.1586	0.2940	0.0136	0.1701	0.0633	0.2607
IC	±0.0009	±0.1160	±0.2794	±0.0184	±0.1573	±0.0340	±0.3154

ND= dense clumps of prickly pear; NCB= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of low cover; P= range; NCM= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of medium cover; VCV= fourwing saltbush with trailing prickly pear; RP= prickly pear re-vegetation; PCB= range with fourwing saltbush planted on soil dikes.

Cuadro 6. Cobertura basal (%) y microrrelieve en diferentes condiciones de vegetación predominantes y sistemas de manejo

Table 6. Basal cover (%) and micro relief in different predominant plant conditions and management systems

	Predominant plant conditions					Management systems		
	SD	ND	NCB	P	NCM	VCV	RP	PCB
Basal cover:								
Plant	0.0	16.7	13.3	28.3	26.7	21.7	26.7	18.3
Litter	0.0	21.7	10.0	1.7	40.0	0.0	6.7	31.7
Bare soil	66.7	40.0	61.7	30.0	18.3	71.6	31.6	46.7
Gravel	10.0	6.6	15.0	36.7	15.0	6.7	31.7	3.3
Rock	23.3	15.0	0.0	3.3	0.0	0.0	3.3	0.0
Micro relief	0.748	1.895	0.780	1.000	0.993	0.920	1.236	0.733

SD= bare soil; ND= dense clumps of prickly pear; NCB= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of low cover; P= range; NCM= association of prickly pear clumps, shrubs, grasses and annuals of medium cover; VCV= fourwing saltbush with trailing prickly pear; RP= prickly pear re-vegetation; PCB= range with fourwing saltbush planted on soil dikes.

$P < 0.05$) tuvieron un efecto significativo sobre este proceso, el primero redujo tales pérdidas y el segundo las promovió. La correlación negativa encontrada con la cubierta vegetal, permite establecer el efecto positivo de mantener una mínima cobertura para evitar las pérdidas de suelo, la presencia de una mayor cobertura está ligada a la exclusión al pastoreo. Por otro lado, aunque la presencia de rocas (afloramientos) reduce la intensidad del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo, su efecto está positivamente asociado con pérdidas de suelo.

Los valores promedio e intervalo de confianza ($P = 0.10$) del factor K calculados para el área de estudio, fueron 0.0023 ± 0.0013 ton-ha-hr/MJ-mm-ha. Figueroa *et al.*⁽¹²⁾ mencionan un valor de K de 0.0195 para las unidades de suelo y condiciones de textura encontradas en la cuenca, el cual es mayor que el obtenido experimentalmente, esto es debido a que comúnmente los valores consignados en la literatura son para suelos agrícolas, los cuales por efecto de la labranza son más susceptibles a ser acarreados que los terrenos de agostadero. En un estudio realizado en áreas de pastizal del estado de Chihuahua, Jasso *et al.*⁽¹¹⁾ mencionan magnitudes del factor K del orden de 0.004 ton-ha-h/MJ-mm-ha, valor cercano al obtenido en el presente estudio. Estos mismos autores⁽⁹⁾ concluyen que la

plot, which possibly could not be made with standard instruments. A fact that nevertheless must be considered in the management of rangeland areas with this type of plant communities with a high frequency of prickly pear clumps is that they promote a considerable increase in the rugosity of the soil, which promotes a dramatic decrease in water erosion.

CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

The annual accumulated kinetic energy (Factor R of USLE) oscillated between 380 and 2,100 MH-mm/ha-h when the mean for the area is of 3,500 MJ-mm/ha-h. The soil losses between the different management systems and predominant plant conditions were different, although these did not exceed the allowed limit of soil loss for the conditions of the excluded area. On average the management system that had the least soil losses due to water erosion was the productive reforestation, followed by options VCV and PCB.

The native vegetation conditions showed the following performance in relation to soil losses: $ND < NCM < P < NCB$. The maximum soil losses per rain event occurred in the vegetation condition

pedregosidad y los afloramientos de caliche en las áreas de pastizal pueden actuar como agentes de estabilidad del suelo e incrementar la resistencia al desprendimiento y transporte, reduciendo los valores del factor *K*. Al analizar la información presentada en el Cuadro 7, se constató que los porcentajes de cobertura por grava y roca fueron importantes en la mayoría de los sistemas de manejo y condiciones de vegetación predominantes, lo cual refuerza las conclusiones de los autores citados⁽¹¹⁾.

Con respecto al factor *C* de la USLE (Cuadro 5), con excepción del valor del sistema ND, el cual es bajo, todos los demás datos presentados son congruentes, en cuanto a su magnitud, con otros factores de vegetación mencionados en la literatura para áreas pastoreadas^(11, 12); sin embargo, en el sistema ND se obtuvo el máximo valor para microrrelieve a través de los diferentes sistemas y condiciones de vegetación estudiados (Cuadro 6); posiblemente esta variable esté provocando una subestimación del efecto de la vegetación presente, sobrestimándose el efecto del factor por longitud e inclinación de la pendiente (LS). Este problema es difícil de resolver, dado que para hacer una estimación precisa del factor LS se tendría que hacer un levantamiento topográfico muy detallado en el lote de escurrimiento, mismo que tal vez no sería posible realizarlo con instrumental estándar. Lo que sí es un hecho importante a considerar en el manejo de áreas de agostadero con este tipo de comunidades vegetales con una frecuencia alta de nopaleras, es que promueven un incremento importante en la rugosidad del suelo, lo que provoca un decremento dramático en la erosión hídrica.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

La energía cinética acumulada anual (factor *R* de la USLE) osciló entre 380 y 2,100 MJ-mm/ha-h cuando la media para la zona es de 3,500 MJ-mm/ha-h. Las pérdidas de suelo entre los diferentes sistemas de manejo y condiciones de vegetación predominantes fueron diferentes, aunque éstas no excedieron el límite permisible de pérdida de suelo de las condiciones del área excluida. En promedio,

where grasses are predominant and in grasses with saltbush in soil dikes. The calculated non-linear statistical relationships allowed the estimation of soil losses from individual energy data for rainfall. The USLE parameters shall allow the identification of areas with similar conditions, extrapolation of results, planning and decision-making. The response of the communal excluded rangeland, expressed in a reduction of soil losses below those allowed, suggests letting the areas rest in an agreed way with the producers. These can be areas similar to the one studied (50 ha) trying to encompass all of the communal area, where later on a rational use of the resource is applied.

ACKNOWLEDGMENTS

We especially thank the producers and authorities of the Panuco Community Land in Panuco, Zacatecas for having allowed the use of their rangeland for experiments. We also recognize the participation of FIRCO in the State of Zacatecas for their collaboration in the stage of establishing the exclusion area. We also recognize the field technician Mr. Manuel del Haro Pinedo.

End of english version

el sistema de manejo que presentó las menores pérdidas de suelo por erosión hídrica fue el tratamiento de reforestación productiva, seguido por la opción VCV y PCB.

Las condiciones de vegetación nativa mostraron el siguiente comportamiento en cuanto a pérdidas de suelo: ND < NCM < P < NCB. Las pérdidas máximas de suelo por evento lluvioso se tuvieron en la condición de vegetación donde predomina el pastizal y en el pastizal con chamizos en bordos de tierra. Las relaciones estadísticas no lineales calculadas permitieron estimar las pérdidas de suelo a partir de datos individuales de energía de la lluvia. Los parámetros de la USLE permitirán la identificación de áreas con condiciones semejantes,

extrapolación de resultados, planeación y toma de decisiones. La respuesta del agostadero comunal excluido, expresada en una reducción de las pérdidas de suelo a niveles menores que las permisibles, sugiere descansar áreas de manera convenida con los productores, las cuales pueden ser superficies como la estudiada (50 ha), tratando de abarcar la totalidad del área comunal, en donde, posteriormente se aplique un uso racional del recurso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a los productores y autoridades del Ejido Pánuco, en Pánuco Zacatecas por haber permitido el uso del agostadero con fines experimentales. También se reconoce la participación de FIRCO en el estado de Zacatecas por su colaboración en la etapa de establecimiento del área de exclusión, así como al técnico de campo Sr. Manuel de Haro Pinedo.

LITERATURA CITADA

1. Branson FA, Gifford GF, Renard KG, Hadley RF. Rangeland Hydrology. Dubuke, Iowa, USA. Kendall/Hunt Pub. Co.; 1981.
2. Blackburn WH, Hickman CA, deSteiguer JE, Jackson BD, Blume TA, DeHaven MG. Silvicultural activities in relation to water quantity in Texas. Texas Water Resour. Inst. Tr-97. USA. Texas A&M Univ. 1978.
3. Wood MK, Blackburn WH. Sediment production as influenced by livestock grazing in the Texas rolling plains. J Range Manage 1981;(34):228-231.
4. Blackburn WH, Knight RW, Wood, MK. Impact of grazing on watersheds: a state of knowledge. Texas Agr Exp Sta Pub 1982: MP-1496.
5. Blackburn WH. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. In: Developing strategies for rangeland management. National Research Council/National Academy of Sciences. Boulder, CO. West-view Press, 1984;927-983.
6. McCalla II GR, Blackburn WH, Merrill LB. Effects of livestock grazing on sediment production, Edwards Plateau of Texas. J Range Manage 1984;(37):291-294.
7. Blackburn WH, Skau CM. Infiltration rates and sediment production of selected plant communities in Nevada. J Range Manage 1974;(27):476-479.
8. Takar AA, Dobrowolski JP, Thurow TL. Influence of grazing, vegetation life-forma, and soil type on infiltration rates and interill erosion on a Somalian rangeland. J Range Manage 1990;(43):486-490.
9. Jasso IR, Sánchez CI, Stone JJ, Martínez RJG, Gutierrez RE. Estimación de parámetros de la respuesta hidrológica en pastizales semi-áridos del norte de México. En: Medina MR editor. Simposio 4 Manejo integral de cuencas hidrológicas. IX Congreso nacional de irrigación. ANEI AC. Culiacán Sinaloa, México. 1999:109-115.
10. Renard KG, Foster GR. Managing rangeland soil resources: The Universal Soil Loss Equation. Rangelands 1985;(7):118-122.
11. Jasso IR, Sánchez CI, Stone JJ, Melgoza CA, Simanton JR, Martínez RJG. Estimación de parámetros para la modelación del escurrimiento superficial y erosión hídrica. En: Sanchez CI, *et al.* editores. Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. Libro Científico No. 1. SAGAR-INIFAP-CENID RASPA. México. 1999:75-97.
12. Figueroa SB, Amante OA, Cortés THG, Pimentel LJ, Osuna CES, Rodríguez OJM, Morales FFJ. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH Colegio de Postgraduados, CREZAS, Salinas de Hgo., SLP, México. 1991.
13. CETENAL. Carta de vegetación F-13-B-58, Zacatecas. [mapas] Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Dirección de Estudios Económicos. Secretaria de la Presidencia. Estados Unidos Mexicanos. 1971.
14. CETENAL. Carta edafológica F-13-B-58, Zacatecas. [mapas] Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Dirección de Estudios Económicos. Secretaria de la Presidencia. Estados Unidos Mexicanos. 1971.
15. SARH. Manual de conservación del suelo y agua. Colegio de Posgraduados. Chapingo, Méx. 1982:213-326.
16. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric., Handbook 537, US Government Printing Office. Washington, DC. USA. 1978.
17. Kincaid DR, Williams G. Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement treatments. J Range Manage 1966;(19):346-351.
18. Pieper RD. Técnicas de medición para vegetación herbácea y arbustiva. Departamento de ciencias animales de los pastizales y de la fauna silvestre. Universidad Estatal de Nuevo México. Las Cruces, Nuevo México. 1973:87-98.
19. Wischmeier WH. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil Sci Soc Am Proc 1959;(23):246-249.
20. SAS. Procedures guide. (version 6.0 ed.). Cary NC., US: SAS Inst. Inc. 1990.
21. Snedecor GW, Cochran WG. Métodos estadísticos. Novena Impresión. México Editorial CECCSA; 1952.
22. Infante SG, Zárate deLGP. Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario. 2a ed. México. Editorial Trillas; 1990.
23. Martínez MM. Notas del curso EDA-602 "Conservación de suelo y agua". Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. México. 1992.

SIN TEXTO