

# CONSECUENCIAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DEL SOBREPASTOREO EN RELIEVES METAMÓRFICOS ADEHESADOS DE UN SECTOR DE LA SERRANÍA DE RONDA (MÁLAGA)

JUAN F. MARTÍNEZ MURILLO, PALOMA HUESO-GONZÁLEZ Y JOSÉ D. RUIZ SINOGA

**RESUMEN:** El estudio analiza la influencia del sobrepastoreo en el funcionamiento hidro-erosivo de un ecosistema adhesionado en condiciones climáticas húmedas, en la Serranía de Ronda. La actividad pastoril en la zona de estudio es de tipo caprino (todo el año) y vacuno (de octubre a mayo); el área experimental se encuentra en la zona de tránsito diario del ganado. Se consideraron dos factores en este estudio a escala de detalle: exposición y características superficiales del suelo. Mediante el registro continuado de la escorrentía y la erosión del suelo en parcelas, se evidenció la importancia de la exposición de la ladera porque influía en las características superficiales de los suelos, favoreciendo el crecimiento de plantas anuales y musgo en umbría a pesar del paso continuo de ganado, mientras que en solana quedaba completamente desnudo. En consecuencia, la ladera de solana respondió de modo similar a lo que se ha observado en condiciones climáticas mediterráneas más áridas debido al impacto del pastoreo en la cubierta vegetal y los suelos. Por todo ello, mediante una gestión del territorio sostenible, es muy importante alcanzar un equilibrio entre la capacidad de carga ganadera de ámbitos geográficos, como el estudiado en la Serranía de Ronda, y la carga real en cabezas de ganado y no ver perjudicados los recursos hídricos y edáficos que sustentan la vegetación mediterránea de la zona.

**PALABRAS CLAVE:** procesos geo-ambientales, degradación, resiliencia, sobrepastoreo, incendios forestales.

**SUMMARY:** The study analyzes the influence of overgrazing on the hydro-erosive functioning of a developed ecosystem in humid climate conditions, in the Serranía de Ronda. The shepherding in the area of study includes goats (all year round) and cows (from October to May); the experimental area is transited by herds on daily basis. Two factors were considered in detail in this study: exposure and surface characteristics of the soil. Through the continuous recording of the runoffs and soil erosion on the plots, the importance of hillside exposure was evidenced as it influenced the surface characteristics of the soils, favoring the growth of annual plants and moss in shade despite the continuous passage of livestock. Meanwhile, the sunny part was completely bare. Consequently, the sunny slope responded similarly to what had been observed in most arid Mediterranean climate conditions due to the impact of grazing on the vegetation cover and soils. Accordingly, it is very important to achieve a balance between the capacity of livestock through sustainable land management in geographical areas, such as the one studied in the Serranía de Ronda, and the realistic impact of livestock numbers, thus avoiding damage to the water and soil resources that support the Mediterranean vegetation of the area.

**KEY WORDS:** geo-environmental processes, degradation, resilience, overgrazing, forest fires.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Serranía de Ronda es un espacio geográfico complejo tanto desde un punto de vista físico como humano. En este espacio confluyen una serie de elementos físico-naturales en cuanto a relieve, climatología, hidrología, vegetación, etc., como socioeconómicos en cuanto a su uso histórico y actual, que lo hacen partícipe de una serie de procesos geo-ambientales que, en algunas ocasiones, pueden ocasionar la degradación del sistema geo-ambiental y, en otras, su recuperación o resiliencia. En definitiva, en este espacio confluyen intereses de diversa índole que hacen difícil su ordenación y gestión. A continuación, se expone un caso de estudio acerca de un proceso geo-ambiental que tiene una serie de consecuencias paisajísticas, ambientales y socioeconómicas en la Serranía de Ronda, como es la actividad pastoril cuando alcanza niveles de carga ganadera superiores a las sostenibles. Se trata de un estudio centrado en el efecto que tiene el sobre-pastores en la respuesta hidrológica y erosiva de laderas de relieves metamórficos adhesionados en la Serranía de Ronda, determinando los factores más influyentes y sus consecuencias en la gestión de los recursos hídricos y de usos en este ámbito geográfico.

## 2. LOS EFECTOS DEL SOBREPASTOREO EN EL SISTEMA ECO-GEOMORFOLÓGICO MEDITERRÁNEO

La región mediterránea se caracteriza por una gran variedad de usos del suelo y cambios en ellos durante siglos afectando directamente a determinados procesos geo-ambientales (Kosmas et al., 1997). En el caso del pastoreo, esta actividad humana introduce profundas modificaciones desde el punto de vista ambiental e hidro-geomorfológico (Cerdà, 1998). Las modificaciones son especialmente claves en la cubierta vegetal y las propiedades edáficas (Thornes, 1990; Boix et al., 1995) resultando en una reducción de las áreas potenciales de infiltración para el agua de lluvia (Cammeraat y Imeson, 1999) y en un incremento de los procesos de degradación que dirigen al sistema natural hacia la desertificación (López-Bermúdez y Albaladejo, 1990). De hecho, cuando el pastoreo alcanza cotas insostenibles, por encima de la capacidad de carga del medio, el sobre-pastoreo puede afectar gravemente a la susceptibilidad del suelo a la erosión y a la resiliencia del sistema para recuperarse del impacto de esta actividad, por ejemplo, de la elevada erosión del suelo que produce (Coppus et al., 2003).

Los relieves metamórficos de la Serranía de Ronda, compuestos por pizarras, filitas y esquistos, básicamente, dada su facilidad para el arado, suelen presentar usos agrícolas

(olivos, almendros, viñedos), si bien, en una gran extensión aparecen cubiertos por bosque mediterráneo, de alcornoques o encinas acompañados por el sotobosque propio, que en algunas zonas adquiere tintes de dehesa por su uso ganadero, fundamentalmente, caprino, aunque también vacuno y, en menor medida, ovino. Estos relieves rondeños suelen presentar una pluviometría superior a los 800 o 900 mm anuales, es decir, un clima mediterráneo de régimen sub-húmedo que, en algunas zonas bien orientadas los vientos húmedos atlánticos, rebasan los 1.000 mm anuales llegando a presentar un régimen húmedo. La consecuencia es que, en ausencia de una actividad humana que merme la cubierta vegetal, esta adquiere un grado de cobertura sobre el suelo muy superior al 80-90%.

Los sistemas eco-geomorfológicos adhesionados se caracterizan por un funcionamiento hidrológico complejo debido a esta actividad humana (Bergkamp, 1998) debido a que los mecanismos de generación de escorrentía varían enormemente en el espacio y en el tiempo (Schnabel, 1997). El pastoreo provoca la disminución de la cubierta vegetal a pesar de la notable precipitación que reciben algunas áreas de la Serranía de Ronda, resultando en un patrón temporal y espacial de vegetación lejos del esperado como ocurre en otras áreas de montaña mediterránea (Boix et al., 1995; Kosmas et al., 2000; Ruiz-Sinoga et al., 2011). En consecuencia, pueden observarse zonas de suelo desnudo, especialmente en laderas de solana, que se constituyen en áreas proclives a la generación de escorrentía (Arnau-Rosalén et al., 2008; Ruiz et al., 2010; Ruiz-Sinoga et al., 2010a), a pesar de que, en estas áreas húmedas, donde los factores bióticos del sistema eco-geomorfológico (cubierta vegetal, plantas anuales, musgo y materia orgánica del suelo) son dominantes y claves en los procesos de erosión del suelo (Lavee et al., 1998).

Estas áreas de suelo desnudo que pueden observarse en zonas pastoreadas de los relieves metamórficos en la Serranía de Ronda, presentan en ocasiones una cubierta de pedregosidad consecuencia del lavado y erosión de los horizontes superficiales del suelo. La abundancia y disposición de esta pedregosidad en la superficie del suelo tiene efectos directos sobre la respuesta hidrológica y erosiva de dichos relieves. Junto a esta pedregosidad, el crecimiento de plantas anuales a lo largo del otoño y el invierno tendrá también efectos importantes en los mecanismos de generación de escorrentía y, por tanto, en la erosión del suelo (Cerdà, 1998; Cerdà, 2001; Calvo et al., 2005; Martínez-Murillo and Ruiz-Sinoga, 2007; Ruiz-Sinoga et al., 2010b). De hecho, la superación de la capacidad de infiltración de los suelos por parte de la intensidad de lluvia en esas zonas desnudas de vegetación, puede llegar a ser un mecanismo de generación de escorrentía de gran importancia (Boix et al., 1995).

Los cambios que introduce un sobrepastoreo en el sistema eco-geomorfológico de los relieves metamórficos de la Serranía de Ronda, como ocurre en ambientes similares,

puede hacer que aparezcan rasgos propios de medios más áridos (Martínez-Murillo et al., 2011), como costras superficiales y pedregosidad embebida en la superficie del suelo, haciendo que la respuesta hidrológica y erosiva de sus laderas se aleje de la que es característica de dichos relieves (Katra et al., 2007; Ruiz-Sinoga et al., 2010c).

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

La figura 1 muestra la localización del área experimental donde se llevó a cabo este estudio. El estudio se centró en un sector de la Serranía de Ronda, en el área occidental de la provincia de Málaga, en concreto, en el entorno de la Sierra del Hacho, en Gaucín. El área de estudio se caracterizaba por un clima mediterráneo de régimen húmedo (precipitación media anual: 1.010 mm/año; temperatura media anual: 14,7 °C), una topografía montañosa, con pendientes generalizadas superiores al 25%, y sustrato geológico de origen metamórfico conformado por filitas y pizarras. El uso del suelo principal era la dehesa, con bosque mediterráneo aclarado en diferentes grados, afectados por pastoreo caprino (todo el año) y bovino (desde octubre hasta mayo), lo cual hacía descender la cubierta vegetal, por término medio, de un 90-100% al 40-60% aproximadamente, dependiendo de la orientación de las laderas.

En este ámbito de estudio, se seleccionaron dos laderas representativas las características eco-geomorfológicas descritas en el apartado anterior: sobrepastoreadas, una en exposición de umbría y otra de solana, con pendientes medias superiores al 25%, patrón de vegetación discontinuo y en mosaico (40-60% en la solana y 50-70% en la umbría). Cada día, el ganado caprino y bovino pastaban por ambas laderas, haciendo que la presión ganadera fuera elevada durante la estación de lluvias, desde octubre a mayo, coincidiendo con el crecimiento de las plantas anuales en las teselas desnudas de suelo desnudo, especialmente, en la ladera de umbría.

Como consecuencia de estos rasgos eco-geomorfológicos, la erosión hídrica era el principal proceso geomórfico en ambas laderas, si bien era más intenso en la de solana por una mayor superficie de suelo desnudo. En esta ladera, el suelo desnudo se caracterizaba en superficie por la presencia de costras y pedregosidad embebida creando una superficie sellada continua. La ladera de umbría presentaba también teselas de suelo sin cubierta de matorral y/o arbórea, aunque no totalmente desnudas pues era frecuente la presencia de musgo y plantas anuales. También, a consecuencia del paso continuo de ganado, aparecían morfologías erosivas como vías de paso y micro-terrazas en el perfil topográfico de las laderas.

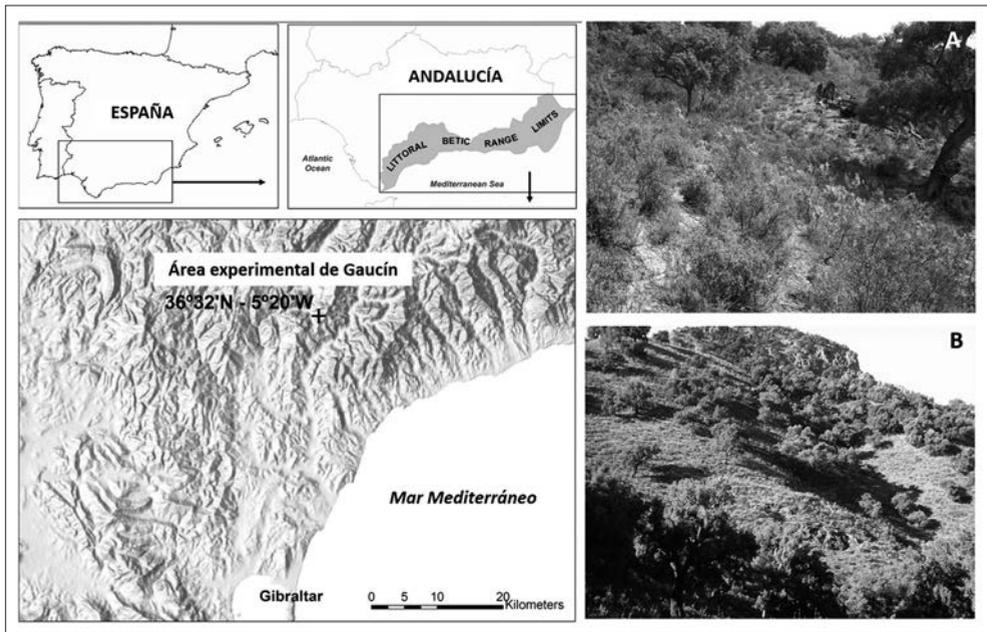


Fig. 1. Localización y vista general del área experimental. A: ladera de exposición sur; B: ladera de exposición norte.

#### 4. METODOLOGÍA

En las laderas seleccionadas para el estudio, se implementó el diseño experimental de acuerdo a los objetivos del trabajo (Fig. 2). En ambas laderas, se instalaron un conjunto de 4 parcelas similares en longitud y superficie: 1,5 m de largo y 1,3 m<sup>2</sup> de área. Estas parcelas tenían las características de incluir las condiciones eco-geomorfológicas propias de cada ladera: teselas de matorral y suelo desnudo, consecuencia del paso de ganado. En cada ladera, dos parcelas incluían el matorral en su mitad superior y en las otras dos, en su mitad inferior, con el objetivo de inferir las consecuencias del paso de ganado en la generación de escorrentía y la erosión del suelo; durante el periodo de estudio, que abarcó desde febrero de 2008 a febrero de 2010, el ganado tenía permitido el paso al interior de las parcelas. La escorrentía se recogía en tanques de 25 L después de cada evento de lluvia. Del total de escorrentía, se tomaba una muestra alícuota para su secado mediante evaporación del agua en estufa, en el laboratorio, a fin de obtener la cantidad total de sedimentos transportada por la misma. También, se instaló una estación meteorológica que registraba información de precipitación y temperatura (con un intervalo temporal de 10 minutos), así como sondas de humedad para conocer el contenido de humedad del suelo después de cada evento de lluvia.

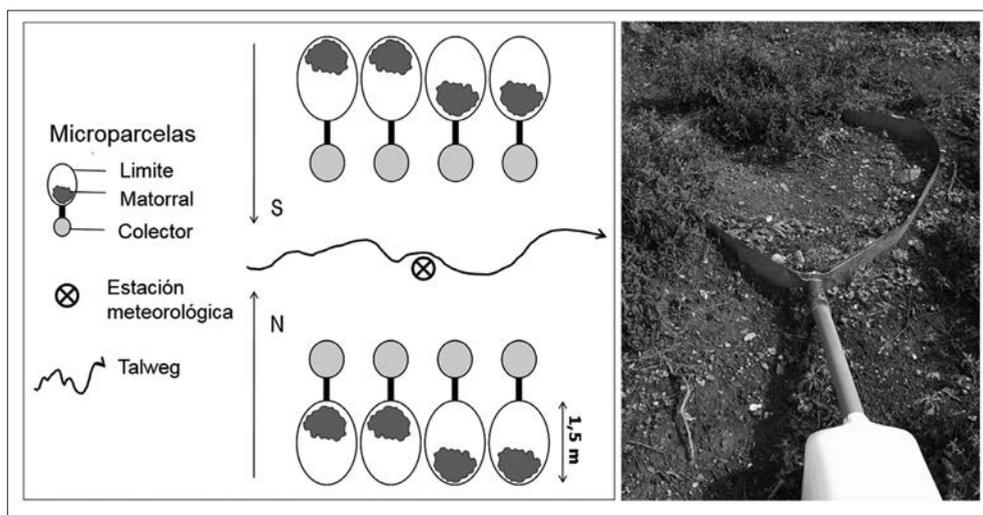


Fig. 2. Esquema del diseño experimental e instrumentación instalada en el área de trabajo, y detalle fotográfico de una de las micro-parcelas de la ladera con exposición sur

En cada parcela, se describieron los componentes superficiales que caracterizaban el sistema eco-geomorfológico de cada parcela, atendiendo a la cubierta de vegetación y de pedregosidad, disposición de esta pedregosidad en relación a la superficie del suelo, así como la presencia o ausencia de encostramientos, musgo y plantas anuales. También, en condiciones eco-geomorfológicas similares, pero fuera de las parcelas, se tomaron muestras de suelo superficiales para analizar en laboratorio propiedades edáficas claves en los procesos hidro-geomorfológicos, a la escala de trabajo, como son: contenido de gravas, textura, densidad aparente, materia orgánica y estabilidad de agregados.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. CARACTERÍSTICAS ECO-GEOMORFOLÓGICAS DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

La Tabla 1 muestra las características eco-geomorfológicas de las parcelas objeto de estudio. La pendiente del terreno en las parcelas era escarpada o muy escarpada (>20%). En la ladera de umbría, debido a la mayor humedad en el suelo, el porcentaje de cobertura vegetal fue siempre mayor que en la ladera de solana. En la primera, la presencia de la especie *Phlomis purpurea* L. era indicativa de la frecuente presencia de flujos sub-superficiales. De igual modo, en las zonas de suelo desnudo de la ladera de umbría, esas condiciones de humedad, favorecían la presencia de musgo en abundancia

(en este estudio toda superficie que no estaba cubierta por matorral se ha categorizado como suelo desnudo). Por otro lado, en la ladera de solana, dominaban las teselas de suelo desnudo o casi completamente desnudos que, en raras ocasiones, aparecían recubiertas por plantas anuales (grado de recubrimiento  $\leq 20\%$ ) o con presencia de fragmentos rocosos en superficie (grado de recubrimiento  $\geq 20\%$ ). Además, estas áreas mostraron las mayores evidencias de erosión hídrica y efectos del pastoreo.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS ECO-GEOMORFOLÓGICAS DE LAS PARCELAS

Exposición	Norte			
Parcela	SCN1	BSN-1	BSN-2	SCN-2
S ( $m\ m^{-1}$ )	0.15	0.20	0.20	0.15
VP	B	T	T	B
VS	<i>Cistus monspeliensis</i>			
VC (%)	30	30	40	40
D (cm)	5	80	90	10
RF (%)	10	20	15	20
SSC	1	1	1	1
Exposición	Sur			
Parcela	SCS-1	BSS-1	SCS-2	BSS-2
S ( $m\ m^{-1}$ )	0.25	0.25	0.25	0.25
VP	B	T	B	T
VS	<i>Cistus monspeliensis</i> , <i>Phlomis purpurea</i>			
VC (%)	60	40	60	40
D (cm)	10	80	10	120
RF (%)	5	10	5	15
SSC	2	2	2	1

ABREVIATURAS: SCN, parcela norte con matorral; BSN, parcela sur con suelo desnudo; SCS, parcela sur con matorral; BSS, parcela sur con suelo desnudo; S, pendiente; VP, posición del matorral (B: baja; T: alta); VS, especie vegetal; VC, cubierta vegetal; D, distancia al colector; RF, cubierta de fragmentos rocosos; SSC, condición superficial del suelo (1: encostrado y con cubierta de fragmentos rocosos del 20 al 70% embebida en la superficie del suelo; 2: musgo y plantas anuales).

La Tabla 2 contiene los resultados de los análisis de las propiedades de los suelos de ambas laderas. Los suelos de la ladera de umbría presentaban un contenido de gravas y densidad aparente menor. Además, la textura del suelo era franco-arenosa. Por otro lado, el porcentaje de materia orgánica y estabilidad estructural de los agregados eran siempre mayores que los encontrados en la ladera de solana. El suelo bajo matorral de ambas laderas mostró una tendencia muy similar a la descrita anteriormente para la exposición al norte. Los resultados indican mejores condiciones eco-geomorfológicas y una posible respuesta hidrológica predominantemente infiltradora en las áreas de matorral. Las áreas desnudas del suelo parecían estar más degradadas desde el punto de vista de la erosión hídrica por el lavado superficial ejercido por el agua sobre las partículas de suelo.

TABLA 2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS EN LAS LADERAS NORTE Y SUR

Ladera	Umbría		Solana	
	SC	BS	SC	BS
Propiedad edáfica	SC	BS	SC	BS
G (%)	26.6	49.8	46.4	69.4
S (%)	29.0	15.4	31.2	23.3
St (%)	43.2	60.4	46.8	55.7
C (%)	27.8	24.2	22.0	21.0
BD (g cm <sup>-3</sup> )	0.90	1.11	1.01	1.30
OM (%)	10.0	7.9	9.5	5.8
ASF (%)	92.0	84.1	92.6	56.8

Abreviaturas: SC, matorral; BS, suelo desnudo; G, contenido de gravas; S, contenido de arenas; St, contenido de limos; C, contenido de arcillas; BD, densidad aparente; OM; contenido de material orgánico; ASF, fracción de agregados estables.

## 5.2. EVENTOS DE PRECIPITACIÓN Y CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

La Tabla 3 contiene la estadística básica de los datos de precipitación registrados en el área experimental durante el periodo de estudio. Durante los dos años del estudio, se registraron más de 2,000 mm en 400 días de lluvia. Los eventos de precipitación se agrupan tal como sigue: i) 50% de los eventos con un volumen comprendido entre los 0 y los 5 mm; ii) 24,5% de los eventos con un volumen comprendido entre

10 y los 25 mm; iii) 14,1% de los eventos con un volumen comprendido entre 5 y los 10 mm; iv) 6,5% de los eventos con un volumen comprendido entre 25 y los 50 mm; y v) 4,3% de los eventos con un volumen comprendido entre 50 y los 100 mm. Finalmente, un único día registró más de 100 mm (144.0 mm, 31 de octubre de 2008). La intensidad de las precipitaciones registradas fue siempre baja-moderada, excepto en eventos ocasionales: 76,2 mm/h (23/Dic/2010); 45,6 mm/h (18/Dic/2009); and 42,3 mm/h (20/Oct/2009).

TABLA 3. RESUMEN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN REGISTRADOS DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO

T (mm)	2.232,1		
N	392		
	Media	SD ( $\pm$ )	Máx.
D (mm)	12,0	18,9	144,3
T (h)	0,92	3,5	19,0
I60 (mm/h)	2,9	1,6	10,0
I10 (mm/h)	8,1	9,7	76,2

Abreviaturas: T, precipitación total; N, número de días con lluvia; D, precipitación del evento; I60, intensidad de precipitación en 60 minutos; I10, intensidad de precipitación en 10 minutos.

La Figura 3 muestra la variabilidad de la precipitación a lo largo del periodo de estudio. La distribución temporal fue la típica del clima Mediterráneo, concentrándose la mayoría de eventos en los meses correspondientes con la estación húmeda (desde septiembre a mayo). Únicamente, se midieron tres meses sin precipitación, lo que es indicativo de que el área experimental se encuentra bajo condiciones húmedas mediterráneas. Respecto a las intensidades máximas, los mayores valores se observaron en las estaciones de otoño e invierno ( $>20$  mm/h), mientras que los eventos menos intensos se asocian a los meses de primavera ( $<20$  mm/h). Asimismo, la relación entre el volumen y la intensidad de la lluvia mostró dos tendencias opuestas: a mayor volumen, menor intensidad y viceversa.

En relación al contenido volumétrico del agua en el suelo medido durante el periodo de estudio, en términos generales, los mayores valores de humedad se midieron en la ladera de umbría y en las zonas bajo matorral. En las zonas bajo matorral con exposición norte, el contenido volumétrico del agua en el suelo fue de  $21,0\% \pm 11,8\%$  por término medio,

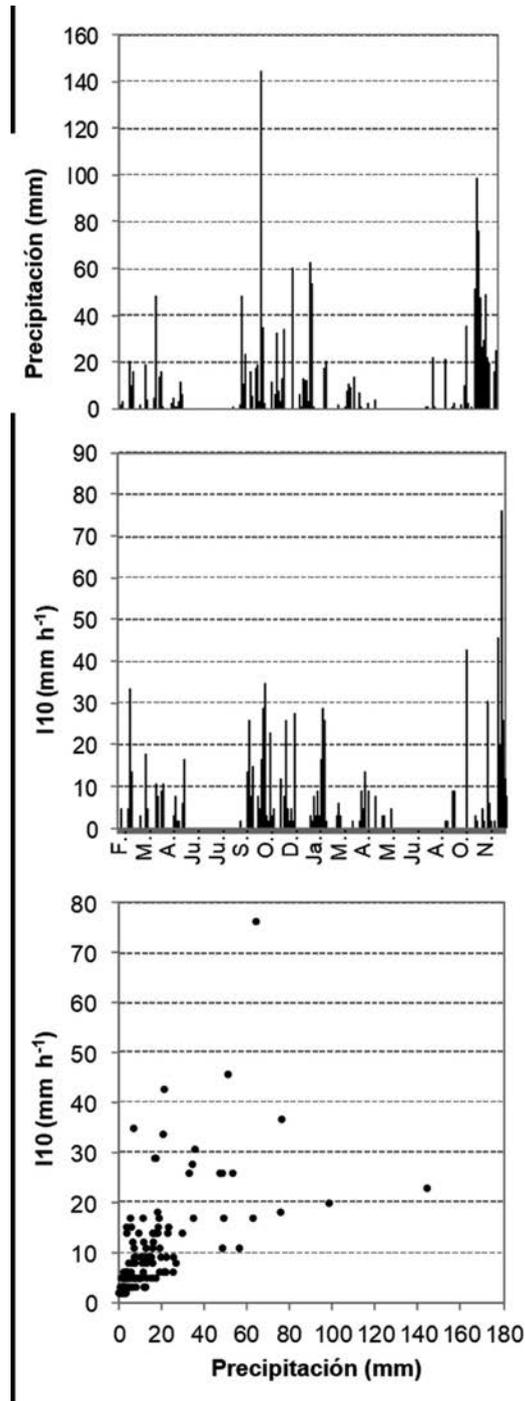


Fig. 3. Variabilidad de la precipitación (arriba) e intensidad de precipitación I10 (mitad) registrada en el área experimental. Relación entre la precipitación y la intensidad de precipitación en 10 minutos I10 (abajo).

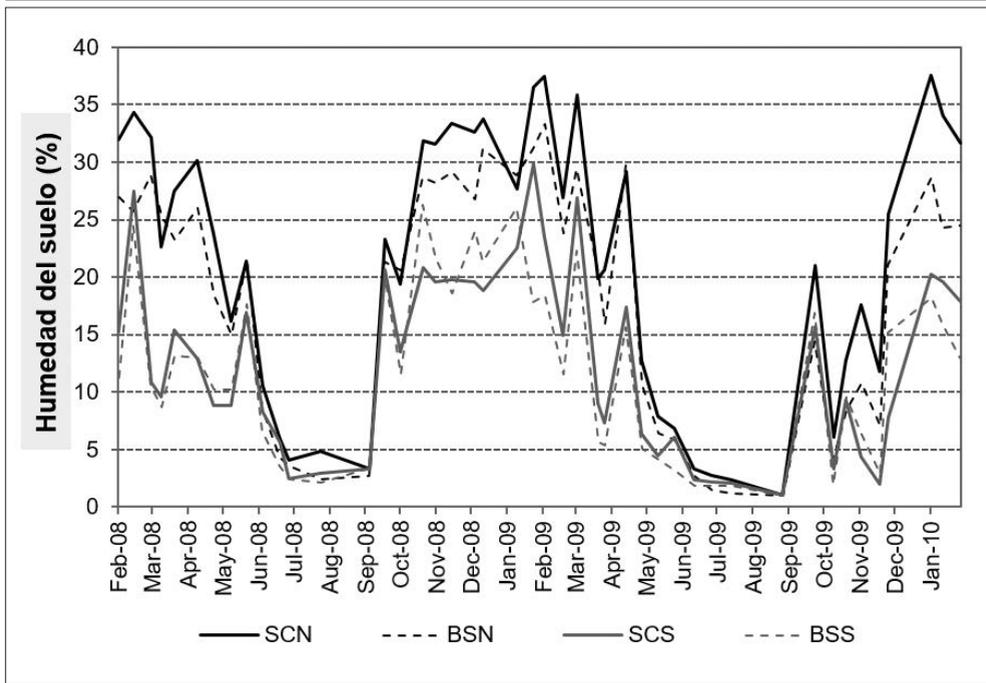


Fig. 4. Variabilidad de la humedad del suelo en los micro-ambientes de las parcelas en ambas laderas

mientras que en las zonas bajo suelo desnudo  $17,9\% \pm 10,6\%$ . En el caso de la ladera sur, las zonas bajo matorral también presentaron un mayor contenido en humedad ( $12,4\% \pm 11,6\%$ ) mientras que las zonas de suelo desnudo, los valores más bajos:  $8,0\% \pm 7,7\%$ .

Respecto a las Figuras 3 y 4, el contenido volumétrico de agua en el suelo se caracterizó por un patrón temporal similar al observado para las precipitaciones. En general, los suelos de la ladera de umbría presentaron mayor contenido de agua en la capa superficial del suelo que los de solana. Durante la estación húmeda las diferencias entre los valores de humedad superficial para las dos laderas se hacían más evidentes. Independientemente de la exposición, al final de estación seca (junio), los suelos se secaban rápidamente y el contenido de agua en el suelo decaía por debajo del 5%. Durante los periodos de precipitación continua, los suelos en la ladera de umbría se encontraban por encima de la capacidad de campo. De hecho, las áreas con pendientes menores al 5% alcanzaban la saturación y mostraban dificultades de drenaje.

### 5.3. ESCORRENTÍA Y EROSIÓN DEL SUELO

La Tabla 4 muestra los datos estadísticos de la escorrentía y erosión del suelo medidos en las parcelas. En general, considerando únicamente el factor exposición,

las parcelas de la ladera de umbría emitieron en torno a 20 litros menos que las parcelas de la ladera de solana (174.8 l y 190.3 l, respectivamente). En ambas exposiciones, la media de los datos de escorrentía fue muy similar: Norte = 0,82 L/m<sup>2</sup>, y Sur = 0,97 L/m<sup>2</sup>. Los coeficientes de escorrentía fueron muy bajos en ambas exposiciones (Norte = 0,8% y Sur = 1,4%). Finalmente, un gran número de eventos de precipitación no generó escorrentía, esto se debió a la gran cantidad de eventos de lluvia inferiores a 5 mm y con intensidades bajas que no produjeron ninguna generación de escorrentía. Cuando se comparan los datos hidrológicos considerando la posición del matorral dentro de las parcelas (mitad superior o inferior), las diferencias eran mucho más evidentes. La primera generó un total de 95,9 L, mientras que la segunda generó 265,0 L. Esto supuso un incremento del 250% en la escorrentía superficial según la posición del matorral, evidenciando la importancia de su presencia y localización en las laderas. De hecho, la tasa media de escorrentía en el suelo desnudo fue más del doble de la registrada en las micro-parcelas con matorral (1,31 L/m<sup>2</sup> y 0,60 L/m<sup>2</sup>, respectivamente). Diferenciando las parcelas de umbría y solana, la tasa media de escorrentía para aquellas con matorral situado en su parte inferior y exposición de umbría fue igual a 0,28 L/m<sup>2</sup>, mientras que en el sur las parcelas con el matorral en similar situación, emitieron 0,66 L/m<sup>2</sup>. Por el contrario, en parcelas con suelo desnudo en su mitad inferior, la escorrentía total fue muy similar en ambas exposiciones: umbría = 132,6 L; solana = 132,5 L.

La Figura 5 muestra los incrementos para la escorrentía total y el total de sedimentos emitidos en las parcelas. Salvo con una excepción, todos los eventos de precipitación generaron escorrentía en la ladera de solana. La exposición se constituyó en un factor decisivo en la introducción de diferencias significativas entre las parcelas, al igual que con las variables de erosión (sedimentos totales, concentración de sedimentos y tasa de erosión). Respecto a la variable “Posición de la vegetación dentro de la parcela”, todas las variables hidrológicas (escorrentía total, tasa de escorrentía y coeficiente de escorrentía) mostraban diferencias significativas dependiendo si el matorral se encontraba en la parte alta o baja de la misma. Sin embargo, no se encontraron diferencias para las variables erosivas y la “Posición de la vegetación en la parcela”. Así, no se producían cambios significativos en la escorrentía total debido a los factores ‘Exposición’ o ‘Posición de la vegetación dentro de la parcela’. Tampoco se obtuvieron cambios significativos en la escorrentía total considerando el efecto de ambos factores, por separado.

En este estudio, la relación entre la escorrentía, la precipitación y los datos de humedad se analizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados indicaron la existencia de relaciones significativas entre el volumen total de escorrentía

TABLA 4. EVENTOS Y RESULTADOS ESTADÍSTICOS GENERALES DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS Y REGISTRADOS

Parcela		R (l)	Rr (l m <sup>-2</sup> )	Rc (%)	S (g)	SC (g l <sup>-1</sup> )	SL (g m <sup>-2</sup> )
SCN-1	Total*/Media	4.18/0.13	0.09	0.1	2/0.2	0.33	0.14
	Ds	0.37	0.27	0.2	0.2	0.62	0.28
SCN-2	Total*/Media	38.1/1.19	0.47	0.3	2.4/0.2	0.35	1.85
	Ds	5.3	1.77	0.5	0.2	0.56	5.91
BSN-1	Total*/Media	16.4/0.51	0.22	0.2	4.4/0.4	0.25	0.19
	Ds	1.63	0.55	0.6	0.6	0.26	0.33
BSN-2	Total*/Media	116.1/3.63	2.49	2.8	25.8/1.3	0.81	1.05
	Ds	6.31	4.75	1.8	1.8	1.37	1.78
SCS-1	Total*/Media	38.8/1.21	0.87	0.7	24.2/2.2	0.45	0.14
	Ds	4.49	3.44	2.1	4.4	0.55	0.18
SCS-2	Total*/Media	19.0/0.59	0.46	1.0	38.4/2.7	2.29	4.21
	Ds	1.17	0.90	2.5	4.2	3.12	7.41
BSS-1	Total*/Media	63.7/1.99	1.04	1.1	30.3/2.0	0.83	1.96
	Ds	4.83	2.26	2.2	2.7	1.12	4.38
BSS-2	Total*/Media	68.8/2.15	1.50	2.6	69.0/4.3	1.78	5.72
	Ds	4.87	3.68	6.3	7.5	3.75	16.11
Umbría		198.3/1.4	0.82	0.8	37.4/0.63	0.48	0.85
Solana		190.3/1.5	0.97	1.4	161.8/2.89	1.40	3.31
Matorral		100.1/0.8	0.47	0.5	66.9/1.39	0.93	1.74
Suelo desnudo		265.0/2.1	1.31	1.7	129.5/2.06	0.97	2.35
Matorral (umbría)		42.2/0.7	0.28	0.2	4.4/0.19	0.3	0.96
Matorral (solana)		57.9/0.9	0.66	0.9	62.5/2.50	1.5	2.55
Suelo desnudo (umbría)		132.6/2.1	1.36	1.5	30.1/0.94	0.6	0.76
Suelo desnudo (solana)		132.5/2.1	1.27	1.9	99.3/3.20	1.3	3.84

Abreviaturas: R, escorrentía total; Sd, desviación estándar; Rr, tasa de escorrentía; Rc, coeficiente de escorrentía; S, sedimentos totales; SC, concentración de sedimentos; SL, pérdida de suelo.

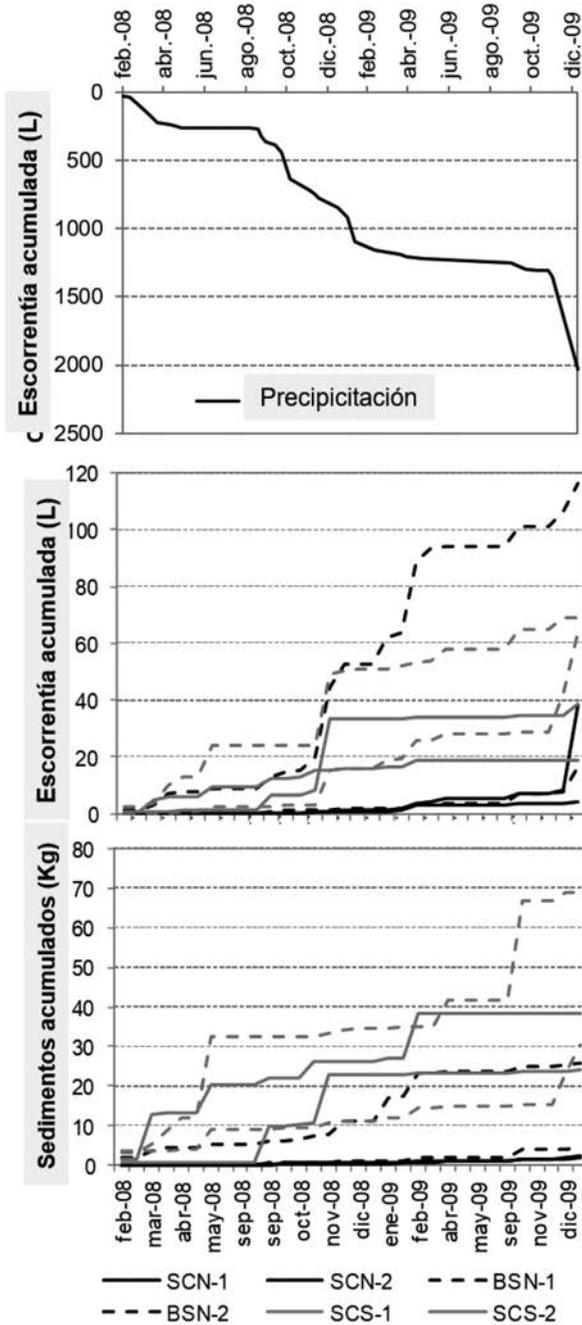


Fig. 5. Precipitación, escorrentía y sedimentos acumulados en las micro-parcelas de exposición norte y sur durante el periodo de estudio

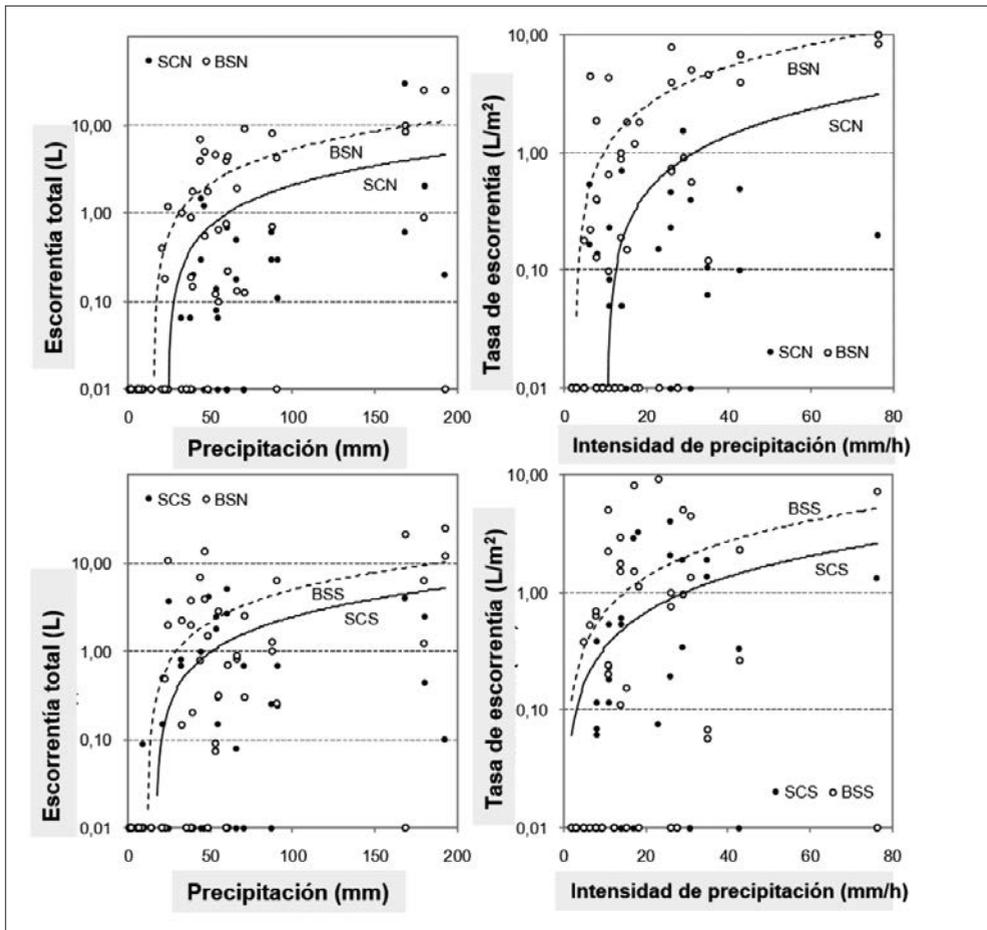


Fig. 6. Gráfico de nube de puntos y tendencia general de las relaciones establecidas entre precipitación total, intensidad de precipitación, escorrentía total y tasa de escorrentía registradas en las micro-parcelas con exposición de umbría y solana. Abreviaturas: I10, intensidad de precipitación máxima en 10 minutos.

/ lluvia y la escorrentía total / I10 ( $r^2 = 0,47$ ,  $p < 0,01$ ;  $r^2 = 0,39$ ,  $p < 0,01$ , respectivamente). Por otro lado, la tasa de escorrentía también se correlacionó positivamente con el volumen de la precipitación ( $r^2 = 0,28$ ,  $p < 0,01$ ), y el coeficiente de escorrentía con la humedad presente en el suelo ( $r^2 = -0,19$ ,  $p < 0,05$ ).

La Figura 6 muestra las relaciones entre diferentes variables hidro-meteorológicas. Aunque los datos presentan cierta dispersión, se podrían asumir algunas tendencias. El umbral del volumen de precipitación mínimo necesario para la generación de escorrentía fue siempre menor en parcelas de suelo desnudo que en las de matorral. Aunque se registraron muchos eventos pluviométricos con más de 50 mm y / o 20 mm/h que no registraron la escorrentía. Sin embargo, y especialmente en las parcelas de umbría,

algunos eventos de lluvia con menos de 20 mm/h también produjeron tasas de escorrentía mayores de 1 L/m<sup>2</sup>. Las líneas de regresión indicaron incrementos notables en la escorrentía con pequeños incrementos en I10 en todas las parcelas.

## 6. DISCUSIÓN

En la zona experimental, el pastoreo, sin ser excesivo, produjo una disminución de la cobertura vegetal respecto a las condiciones observadas en áreas naturales cercanas y no pastoreadas. El resultado del pastoreo fue que ambas laderas mostraran un patrón de vegetación desigual. Este patrón de vegetación es muy frecuente en pastizales bajo condiciones climáticas mediterráneas (Lavee et al., 1998, Cammeraat, 2004, Arnau-Rosalén y otros, 2008, Ruiz-Sinoga et al., 2011). Como consecuencia del pastoreo, en las laderas de solana, con menor cubierta de matorral e individuos de alcornosques aislados, los suelos permanecieron completamente desnudos. Los suelos desnudos de sus parcelas se caracterizaron por la abundancia de costras superficiales que se intercalaban con fragmentos de roca embebidos en superficie, formando una superficie continua impermeable, limitando la infiltración de agua de manera similar a la observada por otros autores en condiciones de laboratorio y campo (Poesen y Lavee, 1994, Poesen et al., 1994, Katra et al., 2007, Ruiz-Sinoga y Martínez-Murillo, 2009b). De hecho, en las zonas de suelo desnudo, los análisis de las propiedades edáficas pusieron de manifiesto condiciones de mayor degradación (menor contenido de arcilla, materia orgánica y estabilidad estructural) y, por tanto, mayores tasas de erosión son esperadas (Lavee et al.; 1998). Al contrario, los suelos sin matorral de las parcelas de la ladera de umbría se encontraban recubiertos gran parte del año por plantas anuales y musgo. Esto era posible debido a que la humedad edáfica era mayor y más estable a lo largo del año hidrológico. Respecto a las condiciones eco-geomorfológicas de los suelos bajo matorral en ambas laderas, los efectos no fueron tan significativos como los descritos para las áreas de suelo desnudo. En estos ambientes, con independencia de la exposición, los procesos de infiltración siempre se veían favorecidos. Una respuesta hidrológica similar fue descrita por Ruiz-Sinoga y Martínez-Murillo (2009b) y Ruiz-Sinoga et al. (2010c) en zonas de pastizal mediterráneo en las Cordilleras Béticas Litorales. En base a lo expuesto, se pueden evidenciar las siguientes cuestiones.

En primer lugar, ante eventos de precipitación de las mismas características, las diferencias eco-geomorfológicas en las parcelas implicaron diferentes respuestas de la humedad del suelo. Con independencia de las características del evento, la humedad del suelo siempre fue mayor en la ladera de umbría, bajo matorral. Esto ocurría

debido a que en esta ladera se daban mejores condiciones para la infiltración del agua de lluvia y, específicamente, este hecho se veía favorecido en los suelos bajo matorral. De hecho, en las zonas bajas de dicha ladera, era frecuente ver áreas saturadas, encharcadas, después de lluvias abundantes y prolongadas. En ambas exposiciones, las parcelas alcanzaron un valor de escorrentía total similar. Sin embargo, en la ladera sur, la humedad del suelo fue siempre menor en las zonas de suelo desnudo que en las zonas bajo matorral. En la ladera sur, la presencia de costras superficiales podría haber sido el factor limitante para la entrada de agua, lo que justificaría el aumento de las tasas de escorrentía observados en esta ladera. En las áreas de suelo desnudo de la ladera sur, las áreas fuentes de escorrentía, esta se generó por mecanismos de superación de la capacidad máxima de infiltración (llamados mecanismos hortonianos), mientras que los suelos sin matorral de la ladera norte actuaban como áreas sumidero de la precipitación por su mayor capacidad de infiltración, al encontrarse recubiertos por plantas anuales y musgos; por tanto, estas áreas se vincularon con mecanismos de generación de escorrentía por saturación del suelo (Martínez-Murillo y Ruiz-Sinoga, 2007; Ruiz-Sinoga y Martínez-Murillo, 2009c, Calvo et al., 2003; Boix -Fayos et al., 2007). Esto puede explicar la ausencia de diferencias significativas entre los datos de escorrentía de las parcelas de ambas laderas cuando se consideraba la posición de la vegetación dentro de la parcela. Sin embargo, sí se evidenciaron algunas diferencias cuando se analizaban los datos de las parcelas por eventos de lluvia. Así, las parcelas con exposición sur, suelo desnudo en su mitad inferior, registraron tasas de escorrentía superiores a  $1 \text{ L/m}^2$  con intensidades de lluvia menores De  $20 \text{ mm/h}$ .

En segundo lugar, los mecanismos de pérdida de suelo parecían estar directamente relacionados con las características eco-geomorfológicas presentes en el área. Así, la presencia de suelo desnudo en las laderas orientadas al sur justifica la gran cantidad y frecuencia de partículas de suelo emitidas, frente a las de umbría. Salvo para una parcela con orientación norte, todas las parcelas con orientación sur presentaban un orden de magnitud mayor en la emisión de sedimentos. Las costras y los pedregosidad embebida en la la superficie del suelo favorecían los mecanismos de generación de escorrentía y el transporte de partículas del suelo. A lo largo del periodo de estudio, no se identificaron tendencias temporales, ya que no se observaron diferencias significativas en cuanto a la emisión de sedimentos entre laderas. Un ejemplo de ello es el mayor arrastre de partículas medidas para las estaciones de otoño. En contraposición, el suelo sin matorral de las laderas de umbría, al quedar protegido por plantas anuales, y musgo registró una disminución en la emisión de sedimentos. En este sentido, únicamente una parcela de orientación norte presentó en un evento lluvioso del mes de otoño de 2008 tasas similares de pérdida de suelo respecto

a las parcelas de solana. La causa fue la perturbación ocurrida por el pastoreo, de modo más intensivo durante los días previos, lo que había conllevado a la desaparición del musgo y la presencia total de suelo desnudo en superficie. Una vez pasó la temporada de lluvias correspondiente, en dicha parcela se recuperó la cubierta de musgo y las plantas anuales crecieron. Esto conllevó la reducción de la pérdida de suelo como puede observarse en Figura 4.

## 7. CONCLUSIONES

Este estudio se llevó a cabo en un ámbito geográfico ampliamente representado en la Serranía de Ronda: un espacio adhesionado, con una intensidad de pastoreo (caprina) no demasiado elevada, que ocasiona la reducción de la cubierta vegetal. Ello, en determinadas condiciones eco-geomorfológicas, puede desencadenar notables problemas en la gestión de los recursos hídricos, por la pérdida de capacidad de infiltración de los suelos y el consiguiente aumento de la escorrentía superficial que alimenta los cursos de agua de la Serranía, las cuales pueden ir cargadas con abundantes sedimentos procedentes de la erosión del suelo de aquellas áreas pastoreadas y, por consiguiente, implica la reducción de la calidad de las aguas de escorrentía. Este proceso es mucho más activo e impactante en aquellas laderas con exposición a solana, donde la mayor radiación solar implica menores tasas de humedad edáfica y, por tanto, menor disponibilidad de agua para las plantas, especialmente, para el crecimiento de musgos y plantas herbáceas anuales, aunque con menor porte comparado con individuos de matorral, pueden reducir notablemente la erosión del suelo, como se ha observado en las laderas de umbría. Por todo ello, mediante una gestión del territorio sostenible, es muy importante alcanzar un equilibrio entre la capacidad de carga ganadera de ámbitos geográficos, como el estudiado en la Serranía de Ronda, y la carga real en cabezas de ganado y no ver perjudicados los recursos hídricos y edáficos que sustentan la vegetación mediterránea de la zona.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de este estudio por parte de la Agencia Andaluza del Agua, de la Consejería de Medio Ambiente y Territorio de la Junta de Andalucía.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARNAU-ROSALEN, E., CALVO-CASES, A., BOIX-FAYOS, C., SARAH P., LAVÉE, H., (2008) "Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hillslopes in Alicante (Spain)", *Geomorphology*, 101, pp. 595–606.
- BERGKAMP, G., (1998) "Hydrological influences on the resilience of *Quercus* spp dominated geoecosystems in central Spain", *Geomorphology*, 23, pp. 101–126.
- BOIX, C., SORIANO, M.M., TIEMESSEN, I.R., CALVO, A., IMESON, A.C., (1995) "Properties and erosional response of soils in a degraded ecosystem in Crete (Greece)", *Environmental Monitoring Assessment*, 37, pp. 79–92.
- BOIX, C., CALVO, A., IMESON, A.C., SORIANO, M.D, TIEMESSEN, I.R., (1998) "Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other properties along a mediterranean climatological gradient", *Catena*, 33, pp. 123–138.
- BOIX-FAYOS, C., MARTÍNEZ-MENA, M., CALVO-CASES, A., ARNAU-ROSALEN, E., ALBALADEJO, J., CASTILLO, V., (2007) "Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions" *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, pp. 85–101.
- CALVO, A., BOIX, C., IMESON, A.C., (2003) "Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in Southeast Spain", *Geomorphology*, 50, pp. 269–291.
- CALVO-CASES, A., BOIX-FAYOS, C., ARNAU-ROSALEN, E., (2005) "Patterns and thresholds of runoff generation and sediment transport on some Mediterranean hillslopes", en Garcia, C., Batalla, R.J. (Eds.), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*, Amsterdam, Elsevier, pp. 31–51.
- CAMMERAAT, E.L.H., (2004) "Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain", *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104, pp. 317–332.
- CAMMERAAT, H.C., IMESON, A.C., (1999), "The evolution and significance of soil vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain", *Catena*, 37, pp. 107–127.
- CERDÀ, A., (1998) "The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope", *Hydrological Processes*, 12, pp. 661–671.

- CERDÀ, A., (2001), "Effects of rock fragments cover on soil infiltration, inter-rill runoff and erosion" *European Journal Soil Science*, 52, pp. 59–68.
- COPPUS, R., IMESON, A.C., SEVINK, J., (2003), "Identification, distribution and characteristics of erosion sensitive areas in three different Central Andean ecosystems", *Catena*, 51, pp. 315–328.
- KATRA, I., BLUMBERG, D.G., LAVEE, H., SARAH P., (2007), "Topsoil moisture patterns on arid hillsides—micro-scale mapping by thermal infrared images", *Journal of Hydrology*, 334, pp. 359–367.
- KOSMAS, C., DANALATOS, N., CAMMERAAT, L.H., CHABART, M., DIAMANTOPOULOS, J., FARAND, R., GUTIERREZ, L., JACOB, A., MARQUES, H., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., MIZARA, A., MOUSTAKAS, N., NICOLAU, J.M., OLIVEROS, C., PINNA, G., PUDDU, R., PUIGDEFÁBREGAS, J., ROXO, M., SIMAO, A., STAMOU, G., TOMASI, N., USAI, D., VACCA, A., (1997), "The effect of land use in runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions", *Catena*, 29, pp. 45–59.
- KOSMAS, C., GERONTIDIS, ST., MARATHIANU, M., (2000), "The effect of land use on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece)", *Catena*, 40, pp. 51–68.
- LAVEE, H., IMESON, A.C., SARAH P., (1998), "The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean arid transect", *Land Degradation and Development*, 9, pp. 407–422.
- LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., ALBADALEJO, J., (1990), "Factores ambientales de degradación del suelo", en López-Bermúdez, F., Albadalejo, J., Díaz, E. (Eds.), *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*, Murcia, CSIC, pp. 15–46.
- MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., RUIZ-SINOGA, J.D., (2007), "Seasonal changes in the hydrological and erosional response of a hillslope under dry-Mediterranean climatic conditions (Montes de Málaga, South of Spain)", *Geomorphology*, 88, pp. 69–83.
- MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., RUIZ-SINOGA, J.D., GABARRÓN-GALEOTE, M.A., (2011), "Assessment of over-grazing effects on water and soil resources in Southern Spain", *Geophysical Research Abstracts*, 13, pp. 1756.
- POESEN, J., LAVEE, H., (1994), "Rock fragments in topsoils: significance and processes", *Catena*, 23, pp. 1–28.
- POESEN, J., TORRI, D., BUNTE, K., (1994), "Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review", *Catena*, 23, pp. 141–166.
- RUIZ, J.D., MARTÍNEZ, J.F., GABARRÓN, M.A., (2010), "Control de la orientación y los componentes superficiales del suelo en la escorrentía y pérdida de

- suelo en parcelas pastoreadas (Sur de España)”, en: Úbeda, X., Vericat, D., Batalla, R.J. (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010*, Solsona, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 177-182.
- RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., (2009a), “Eco-geomorphological system response variability to the 2004-06 drought along a climatic gradient of the Littoral Betic Range (southern Spain)”, *Geomorphology* (103), pp. 351-362.
- RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F. (2009), “Effects of soil surface components on soil hydrological behaviour in a dry Mediterranean environment (Southern Spain)”, *Geomorphology*, 108, pp. 234-245.
- RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F. (2009c), “Hydrological response of abandoned agricultural soils along a climatological gradient on metamorphic parent material in southern Spain”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp. 2047-2056.
- RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., GABARRÓN-GALEOTE, M.A. GARCÍA-MARÍN, R., (2010a), “Effects of exposure, scrub position, and soil surface components on the hydrological response in small plots in southern Spain”, *Ecohydrology*, 3, pp. 402-412.
- RUIZ-SINOGA, J.D., FERRE-BUENO, E., ROMERO-DÍAZ, M.A., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., (2010b), “The role of soil surface conditions in regulating runoff and erosion processes on a metamorphic hillslope (Southern Spain)”, *Catena*, 80, pp. 131-139.
- RUIZ-SINOGA, J.D., GARCÍA-MARÍN, R., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., GABARRÓN-GALEOTE, M.A., (2010c), “Pluviometric gradient incidence and the hydrological behaviour of soil surface components (southern Spain)”, *Land Degradation and Development*, 21, pp. 484-495.
- RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., GABARRÓN-GALEOTE, M.A., GARCÍA-MARÍN, R. (2011), “The effects of soil moisture variability on the vegetation pattern in Mediterranean abandoned fields (Southern Spain)”, *Catena*, 85, pp. 1-11.
- SCHNABEL, S. (1997), *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (debesas) in Extremadura, Spain*, Geoforma ediciones, Logroño, España.
- THORNES, J.B. (1990), *Vegetation and Erosion*, John Wiley, Chichester, United Kingdom.