

VARIABILIDAD INTERANUAL DEL SISTEMA ECOGEOMORFOLÓGICO A ESCALA DE LADERA BAJO CONDICIONES MEDITERRÁNEAS SEMIÁRIDAS (MONTES DE MÁLAGA, SUR DE ESPAÑA)

E. Ferre Bueno, J.D. Ruiz-Sinoga*; J.F. Martínez-Murillo

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga

RESUMEN

Los cambios inmediatos inducidos por la variabilidad pluviométrica sobre el patrón de vegetación y de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo de una ladera abandonada desde el punto de vista agrícola bajo condiciones climáticas semi-áridas han sido analizados, mediante la comparación de dos situaciones diferentes desde el punto de vista pluviométrico, una húmeda (Noviembre de 2002), y otra seca (Noviembre de 2005). El patrón de vegetación fue intensamente alterado por la falta de agua disponible en el suelo, ocasionando la muerte de numerosos individuos vegetales y el consiguiente aumento de la superficie de suelo desnudo activó los procesos hidrológicos superficiales, lo que afectó a algunas propiedades del suelo: la textura pasó a ser ligeramente más arenosa, el contenido de materia orgánica se redujo y la estabilidad de agregados disminuyó.

La modificación de las condiciones superficiales determinaron las variaciones en las tasas de infiltración del suelo, y aunque la reducción de los aportes de materia orgánica y de individuos vegetales hicieron disminuir la estabilidad de los agregados, pudiendo hacer más erodible al suelo, la aparición de pedregosidad superficial no embebida, debido al lavado de los materiales finos, supuso un efecto protector de la ladera.

La modificación textural provocó cambios en la capacidad de retención hídrica a tensiones bajas, próximas a la atmosférica, y en la conductividad hidráulica del suelo. Pero, precisamente y debido al incremento de la pedregosidad superficial no embebida en el suelo, a la reducción de la materia orgánica y a la pérdida de estabilidad de los agregados, la capacidad

Fecha de recepción: enero 2009.

Fecha de aceptación: septiembre 2009.

* E-mail: sinoga@uma.es. Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29071. Málaga. España.

de retención hídrica del suelo disminuyó a tensiones altas (- 2 cm) donde actúan fundamentalmente micro-poros. Así pues, desde el punto de vista hidrológico, el suelo se hizo mucho más dependiente de los eventos pluviométricos, especialmente de su intensidad, por lo que la escasa cubierta vegetal podría tener asegurado su suministro hídrico debido al aumento del agua disponible en el suelo.

Palabras clave: Periodos secos, patrón de vegetación, degradación del suelo, laderas.

ABSTRACT

The induced changes by the pluviometric variability on the vegetation pattern and physico-hydrological soil properties at abandoned hillslope under semiarid climate conditions was analysed since 2002 till 2005, comparing both different situations, one humid (November'02) and another dry (November'05). The vegetation pattern was intensely disturbed and the biomass reduce by the lack of soil water available which caused the death of numerous vegetation individuals and the increase on bare soil patches and the surface wash. Those changes affected the soil properties: the texture became slightly sandier, the organic matter content felt and aggregate stability dropped. The soil water properties changed as a consequence of the variability of the pluviometry and they became more water-transferring. Moreover, the increase in surface stoniness reduced evaporation and the scarcer vegetation in lower transpiration; and as a consequence more water available on the soil profile. This will encourage vegetation recovery, which is a good example of how fast semiarid ecosystems are adapted to the dry periods.

Key words: Dry periods, vegetation pattern, soil degradation, hillslopes.

I. INTRODUCCIÓN

En ambientes mediterráneos semiáridos, numerosas zonas de montaña estuvieron cultivadas hasta mediados del siglo XX y luego fueron abandonadas por el bajo rendimiento agrícola, momento en el que comenzó una variada recolonización de estas áreas por la vegetación natural, cuyo éxito dependió de las condiciones climáticas y del grado de degradación del suelo (López-Bermúdez et al., 1998). Se han conformado así, ecosistemas poco resistentes, en los que las modificaciones de los regímenes pluviométricos y la concatenación de periodos secos ha podido acarrear efectos no contemplados a priori, modificando a corto, medio y largo plazo la biomasa y alterando algunas propiedades físicas de los suelos así como su comportamiento hidrológico. Así, a los efectos derivados de la dinámica de campos abandonados deben añadirse los inherentes a la variabilidad pluviométrica mediterránea.

Kosmas et al. (1997) plantea que los efectos cualitativos derivados del abandono pueden ser positivos o negativos, dependiendo de los suelos y de las condiciones climáticas del área. Así, suelos bajo unas condiciones climáticas favorables que permitan el mantenimiento de la vegetación, pueden mejorar con el tiempo, incrementando los aportes de materia orgánica, la actividad biológica y faunística, mejorando la estructura del suelo, incrementando la capaci-

dad de infiltración y reduciendo el potencial de erosión. En este sentido, Martínez-Fernández et al. (1996) incide en los efectos positivos del abandono transcurrido un periodo superior a 10 años, en el cual las características del mismo, tenderían a ser similares a las condiciones previas al cultivo. Y en la misma línea, López-Bermúdez et al. (1998), muestra cómo suelos en estado de abandono por un periodo entre 4 a 10 años, evidencian una progresiva recuperación de la cubierta vegetal, y un significativo incremento en el contenido de materia orgánica, estabilidad de agregados, capacidad de infiltración y conductividad hidráulica.

En esta recuperación, influye que las regiones semiáridas mediterráneas se caracterizan por un régimen de precipitaciones muy variable en el espacio y en el tiempo (Kosmas et al., 1994), con precipitaciones de intensidades extremas, frecuentes periodos de sequía y largas rachas secas (Ceballos et al., 2002), con unos efectos a corto plazo sobre el sistema eco-geomorfológico que pueden ser diversos, contrapuestos y mostrando una respuesta inmediata del sistema eco-geomorfológico ante la modificación de alguno de sus elementos (Lavee et al., 1998). De hecho, Märker et al. (2008) observa que periodos secos, como el ocurrido en 2003 en el Sur de Italia, pueden resultar en cambios en la erosión del suelo y los procesos de transporte de sedimentos, dado que las condiciones superficiales (patrón de vegetación y propiedades superficiales de los suelos) tienen una mayor incidencia en las tasas de infiltración de los suelos. Los frecuentes periodos secos en el Mediterráneo son la vía mas efectiva de modificación de las características del suelo en superficie debido a sus efectos sobre la porosidad de los suelos, residuos vegetales en superficie, rugosidad, e incremento de la superficie de encharcamiento, que modifican la hidrología del suelo e incrementan la superficie expuesta a la evaporación (Kosmas et al., 2000). Por tanto, una pequeña variación o descenso en la cantidad de agua entrante en el sistema, puede tener consecuencias para su dinámica futura (Lázaro et al., 2001) y, especialmente, en la vegetación que intenta recolonizar el campo abandonado.

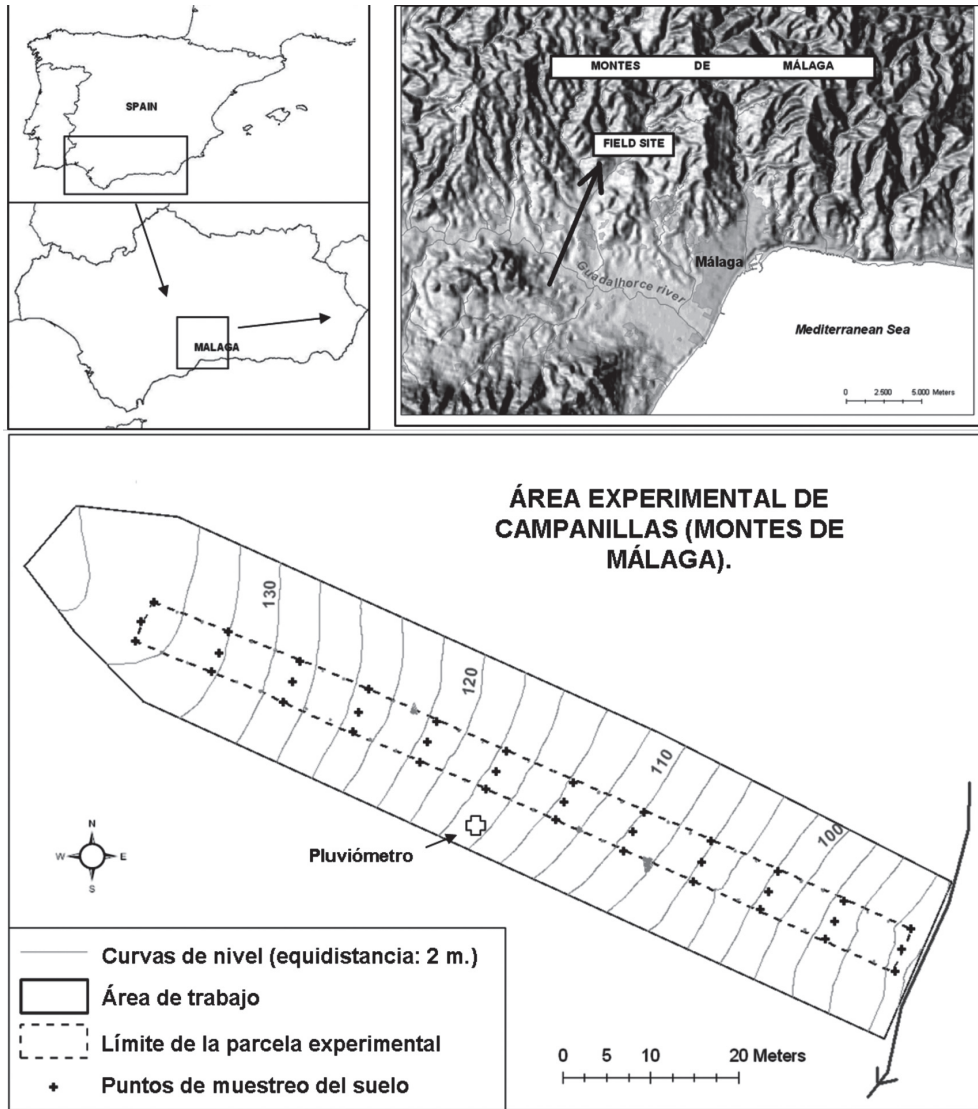
En este trabajo abordamos el estudio de los cambios inmediatos generados por la variabilidad pluviométrica interanual, con precipitaciones muy intensas y largas rachas secas, sobre el sistema eco-geomorfológico de una ladera de campo abandonado bajo condiciones climáticas semi-áridas. Los objetivos de esta investigación son los siguientes: i) mostrar las modificaciones sufridas por el patrón de vegetación y algunas propiedades físicas, químicas e hidrológicas del suelo, y ii) determinar cambios en las relaciones establecidas entre las propiedades del suelo antes y durante el periodo seco.

II. FUENTES Y MÉTODOS

2.1. Localización

La investigación se ha desarrollado en una ladera perteneciente al conjunto de los Montes de Málaga, unidad geológica de las Cordilleras Béticas y situados en el sur de España (figura 1) en la que establecimos una parcela abierta. La ladera está situada en el sector suroccidental de los Montes de Málaga a 10 km. al Oeste de la ciudad de Málaga. El entorno geomorfológico se encuentra dominado por la acción superficial de las aguas de escorrentía sobre terrenos con escasa cubierta vegetal, originando una profusa red de drenaje sobre un zócalo paleozoico constituido por pizarras, filitas y esquistos. La ladera se caracteriza por: una exposición de N115°, un desnivel de 36 m., una morfología recti-

Figura 1
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DETALLE DE LA PARCELA EXPERIMENTAL.



línea-convexa y una pendiente media de 36.0%. La litología está compuesta por filitas. Las condiciones climáticas del entorno eran tipo mediterráneo semiárido: precipitación anual = 454 mm., y temperatura media anual = 18.5 °C, en la estación meteorológica de Málaga-Consul del Instituto Nacional de Meteorología (situada a 3 km de distancia). La ladera estuvo cultivada de almendros hasta mitad de s.XX, y desde entonces fue abando-

nada y recolonizada por vegetación arbustiva (*Genista umbellata*, *Lavandulua stoechas*, *Lavandula dentata* y *Asparagus acutifolius*) y especialmente de un estrato herbáceo anual variable en extensión según la época del año (asociación *Tuberarion guttatae*).

2.2. Área experimental

En la ladera, que es representativa del entorno, se delimitó una parcela abierta y a su levantamiento topográfico utilizando un GPS LEICA en Noviembre de 2002 (figura 1). Esta parcela tiene una longitud igual a la distancia entre la divisoria de aguas superior y el talweg (112 m.) y una anchura igual a 5 metros, siguiendo la metodología utilizada por Calvo et al. (2005), Martínez-Murillo (2006) y Boix et al. (2007), mediante la cual se obtuvo información sobre las características del patrón eco-geomorfológico (vegetación y superficie del suelo). La ladera fue fotografiada con una cámara digital de alta resolución, colocada en una estructura metálica portátil de 4.5 metros de altura, para su posterior foto-interpretación mediante ArcGIS 9.0 y aplicando la metodología de Calvo et al. (2003). Desde el talweg de la ladera y cada nueve metros, en estos puntos (36 en total) se efectuó la recogida de muestras de suelo (a 5 y 15 cm de profundidad) en Nov-02 y Nov-05, tanto para la determinación de las propiedades físico-químicas, como para los experimentos de infiltración y seguimiento de la humedad del suelo. En la ladera se instaló un pluviómetro conectado a un datalogger Unidata en octubre de 2002.

2.3. Mediciones

En la investigación se han analizado distintas variables desde Noviembre de 2002 a Noviembre de 2005: pluviometría, cubierta vegetal y características superficiales del suelo y propiedades físicas, químicas e hidrológicas del mismo. En relación a la pluviometría, se realizó un análisis con información relativa a cada uno de los eventos o aguaceros producidos desde 1-10-2002 a 31-10-2005. Las muestras de suelo, modificadas y sin modificar, fueron utilizadas para el análisis de las siguientes propiedades en laboratorio: contenido de gravas (G) (tamizado a 2 mm.), textura (arenas, S; limos, L; arcillas, Cl) (Robinson, 1922), estabilidad de agregados (AS) (Kemper and Rosenau, 1986; Smith et al., 1992;), contenido de materia orgánica (OM) (AFNOR, 1987) y pH, porosidad (P) y densidad aparente (BD), capacidad de retención hídrica a saturación (SAT), capacidad de campo (FC) y punto de marchitez (WP) utilizando una caja de arena ($pF < 2.0$) y una membrana de Richard ($pF > 3.0$). En campo, en los mismos puntos de muestreo del suelo fueron llevados a cabo experimentos de infiltración utilizando un infiltrómetro de disco y aplicando la metodología de Zhang (1997) obteniendo las tasas de conductividad hidráulica (K) a las tensiones de -0.5 y -2.0 cm.

En esos mismos puntos de muestreo, cada dos semanas, fue medida la humedad del suelo (SWC) mediante un TDR-Tektronix 1502C a 5 y 15 cm de profundidad. El contenido de agua disponible para la vegetación (AWC) (1) fue calculado y representado de la siguiente manera:

$$(1) AWC = [(SWC-MP) / (FC-MP)] \times 100$$

AWC: Agua útil; SWC: Humedad del suelo; MP: Punto de marchitez; FC: Capacidad de campo.

2.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico de la base de datos fue realizado mediante el uso del software SPSS 14.0. Se ha llevado a cabo un análisis factorial de las propiedades edáficas analizadas en 2002 y 2005 mediante el método de Componentes Principales (ACP), que identifica aquellas combinaciones lineales más eficientes, que explican los porcentajes más altos de la varianza total. Cada componente extraído, mediante el criterio de Kaiser, está representando así la combinación de dos o más variables que se encuentran bien relacionadas.

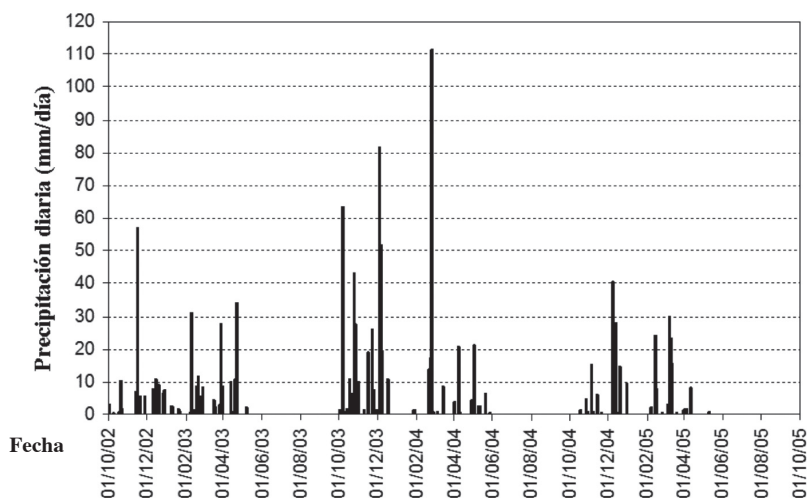
III. RESULTADOS

La variabilidad pluviométrica, la intensidad de precipitación y su incidencia sobre la ladera analizada, generaron unas repercusiones a muy corto plazo en el número de plantas, en el patrón de vegetación y en algunas propiedades del suelo.

3.1. Evolución y características de las precipitaciones

El análisis de los aguaceros producidos a lo largo del periodo de investigación (figura 2), ha mostrado no sólo lo escaso de los días de lluvia, sino también la existencia de frecuentes periodos absolutamente secos, con una duración superior a 5 meses/año, unido a intensos aguaceros superiores a 20 mm/día y en algún caso a 100 mm/día, siendo en el resto de los eventos, la precipitación inferior a 10 mm.

FIGURA 2
EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS OCURRIDOS DESDE 01/10/02 A 31/10/05



Fue especialmente significativa la situación generada a partir de mayo de 2004 con una disminución importante, no sólo del número de eventos lluviosos, sino también de la intensidad de los mismos, quedando de manifiesto un escenario de stress hídrico, con un número muy reducido de eventos pluviométricos y de escasa intensidad, salvo en una ocasión en que un aguacero superó los 40 mm. La reducción de la precipitación anual, del número de días de lluvia, y el desarrollo de intensos aguaceros horarios, ha tenido consecuencias sobre la biomasa, el patrón de vegetación, y sobre algunas propiedades físicas e hidrológicas de los suelos.

3.2. Cambios en el patrón de vegetación y en las condiciones superficiales del suelo de la ladera

La ladera estuvo cultivada de viñedo hasta finales del S XIX, posteriormente de almendros y abandonada hace al menos 30 años, para ser colonizada posteriormente por especies mediterráneas de matorral de carácter xerófito (*Genista umbellata*, *Lavandula stoechas*, *Retama sphaerocarpa*, *Asparagus albus*), componiendo un patrón de vegetación disperso. Kosmas et al. (1997) mostró que en general en las montañas de matorral mediterráneo, los procesos de erosión y escorrentía se incrementan con la reducción de la pluviometría por encima del umbral de los 280-300 mm anuales, y lo atribuyo a la reducción de la cubierta vegetal. Martínez-Fernández et al. (1996) planteó que las circunstancias específicas del post-abandono tienen una gran importancia en la recuperación del suelo tras el abandono de las prácticas de cultivo.

Entre los dos años considerados, 2002 y 2005, pudieron apreciarse algunos cambios sustanciales (figura 3) en el patrón de vegetación y en las propiedades superficiales del suelo de la ladera (Tabla 1). En Nov-02 la vegetación ocupaba un 60.8% de la superficie, mientras que en 2005 solo el 18.4%. Al contrario, la superficie de suelo desnudo aumentó considerablemente

Figura 3
FOTOGRAFÍAS DE LA LADERA EN NOVIEMBRE DE 2002 Y DE 2005

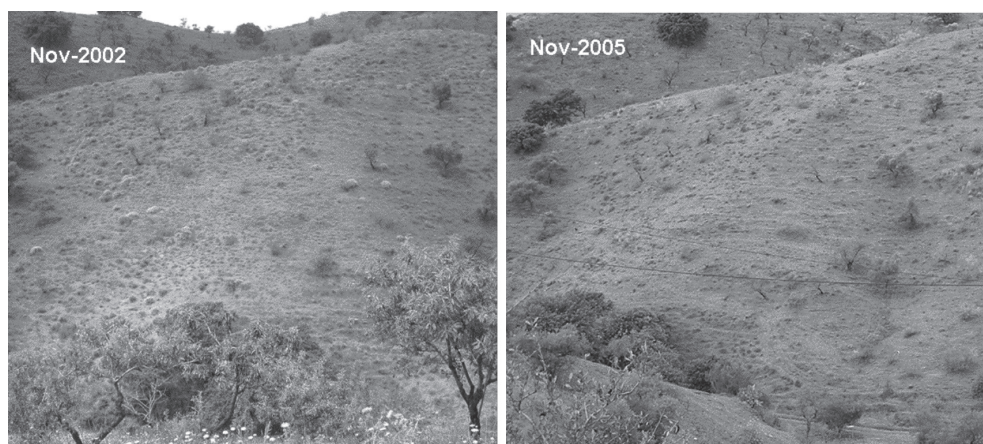


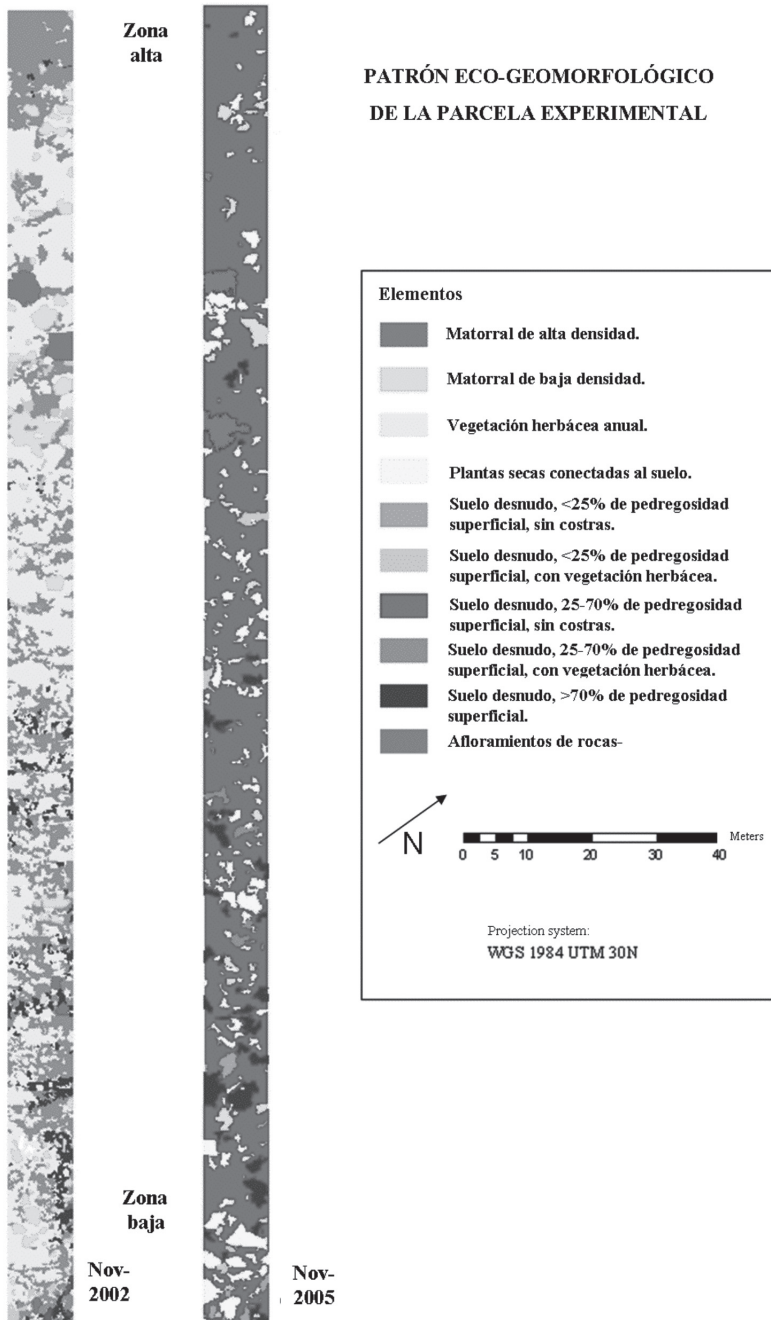
Tabla 1
 SUPERFICIE EN PORCENTAJE OCUPADA POR CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL PATRÓN ECO-GEOMORFOLÓGICO Y NÚMERO DE INDIVIDUOS VEGETALES DE LA PARCELA ABIERTA EN 2002 Y EN 2005

Elemento eco-geomorfológico	Area (%)		Número de plantas	
	nov-02	nov-05	nov-02	nov-05
Matorral de baja densidad	9,1	2,3	140	22
Plantas secas conectadas al suelo	0,3	6,5	17	68
Vegetación herbácea anual (patches)	49,0	5,8	477	112
Matorral de alta densidad	2,3	1,9	5	2
Afloramientos de rocas	0,1	0,2		
Suelo desnudo, <25% de pedregosidad superficial, sin costras	0,1	0,8		
Suelo desnudo, <25% de pedregosidad superficial, parcialmente cubierto de vegetación herbácea	1,9	0,8		
Suelo desnudo, 25-70% de pedregosidad superficial, sin costras	0,4	76,0		
Suelo desnudo, 25-70% de pedregosidad superficial, parcialmente cubierto de vegetación herbácea	31,6	0,6		
Suelo desnudo, >70% de pedregosidad superficial	5,1	5,2		
TOTAL	100.0	100.0	639	204

del 16.4% al 83.6%. Por tanto, la desprotección del suelo y su erodibilidad se incrementaron extraordinariamente, sin embargo esta reducción de la cubierta vegetal afectó especialmente a la vegetación herbácea anual, pasando de representar el 49.0% de la superficie de la parcela en 2002, al 5.8% en 2005. Por el contrario, el matorral de alta densidad fue el que menos sufrió los efectos del periodo seco, debido a su mayor adaptación a estas condiciones, afectando tan solo al 0,4% de la superficie. La superficie de matorral de baja densidad también se afectó, mediante una reducción del 9.1% a 2.3%. Por último, la superficie de vegetación muerta conectada al suelo se incremento siendo del 6.5% en 2005, cuando antes solo suponía el 0.3%. Esta reducción de la cubierta vegetal generó también una importante reducción en el número de individuos vegetales: mientras que el número de individuos de matorral de alta y baja densidad y las teselas de vegetación herbácea se redujeron, el de individuos de vegetación muerta conectada al suelo se incrementó, especialmente en la zona baja de la ladera.

La reducción de la cubierta vegetal tuvo como resultado el incremento del suelo desnudo. Si en 2002 la superficie de suelo desnudo suponía el 40.0%, en el año 2005 representaba el 83.6% de la superficie. Ese incremento también supuso una modificación de sus características. Fueron dos las principales modificaciones observadas: i) un importante incremento de

Figura 4
MAPAS DEL PATRÓN ECO-GEOMORFOLÓGICO DE LA PARCELA ABIERTA. (2002-2005).



las áreas de suelo desnudo con pedregosidad entre el 25 y 70% y sin costras, que antes suponían el 0.4% de la superficie de la parcela, y después el 76% de la misma, y ii) una reducción de la superficie de suelo desnudo con pedregosidad entre el 25 y 70% parcialmente cubierto por vegetación herbácea, que pasó del 31.6% en Nov-2002 al 0.6% de la superficie total en Nov-2005. Este incremento de la pedregosidad superficial no embebida en el suelo a lo largo de la ladera tuvo como efecto significativo el aumento de la rugosidad superficial, lo que podría tener repercusiones en el comportamiento hidrológico de la ladera, como plantearon Hansen et al., 1999 y Blevins y Frye, 1993.

La elevada variabilidad de las precipitaciones y el periodo seco que se inicia en verano de 2004 tuvieron unas consecuencias inmediatas sobre la cubierta vegetal de la ladera que teóricamente la hacía más vulnerable a los procesos de erosión, debido a la aumento de la exposición del suelo al impacto de las gotas de lluvia. La desprotección del suelo podría tener efectos negativos favoreciendo la generación de escorrentía y el arrastre de sedimentos ladera abajo. Pero el incremento de la pedregosidad superficial no embebida a causa de la desaparición de la vegetación herbácea anual, así como de la rugosidad superficial, podría contrarrestarlos pues estos favorecen la infiltración del agua en el suelo.

3.3. Cambios en algunas propiedades físicas y químicas del suelo

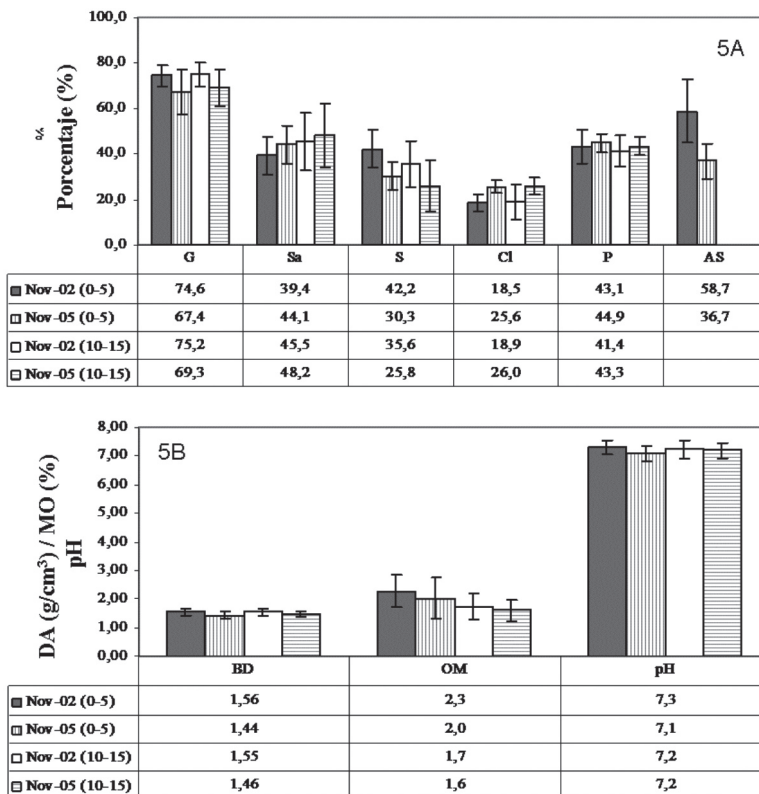
Si bien en términos generales las modificaciones de las propiedades del suelo son muy lentas, en el plazo inmediato que supone el periodo analizado (2002-2005), pudimos detectar pequeñas alteraciones en algunas de ellas, como consecuencia de los cambios observados en el patrón de vegetación y en las propiedades superficiales. Esos cambios no presuponen una tendencia, aunque si una respuesta inmediata del sistema ante modificaciones de algunos elementos del mismo. (Lavee et al, 1998).

La degradación del sistema eco-geomorfológico, debido a la modificación de las condiciones de aportes hídricos provenientes de la reducción de las precipitaciones, más los efectos agresivos de aguaceros torrenciales, generó efectos muy variados e inmediatos sobre algunas de las propiedades físicas y químicas del suelo.

La figura 5 muestra las variaciones ocurridas en las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas. En el periodo de estudio la textura del suelo evoluciono ligeramente hacia franco-arcillo-arenosa, incidiendo en la porosidad del suelo que se incrementó debido al aumento de la fracción de arenas y la densidad aparente se redujo por el incremento del contenido de arcillas. La mayor presencia de la fracción arenosa y la reducción del contenido de materia orgánica, pudo ocasionar el descenso de la fracción estable de agregados del suelo (Nov-02: 58.7%; Nov-05: 36.7%).

A la variabilidad temporal, hemos de unir una manifiesta variabilidad espacial a lo largo de la ladera, que fué generalizada a todas las propiedades analizadas (Figura 6). El contenido en materia orgánica (6B) se reducía desde las zonas altas a las bajas de la ladera en Nov-02, salvo en el primer punto de muestreo, coincidente con el talweg. Durante el periodo seco, en términos generales los valores son inferiores, cambiando este patrón puesto que los mayores valores aparecían en la zona alta y en la baja, descendiendo en toda la zona media de la ladera, precisamente donde la cubierta vegetal tuvo una fuerte reducción y donde el arrastre de materiales ladera abajo podía ser más activo. También la textura se vio afectada, siendo

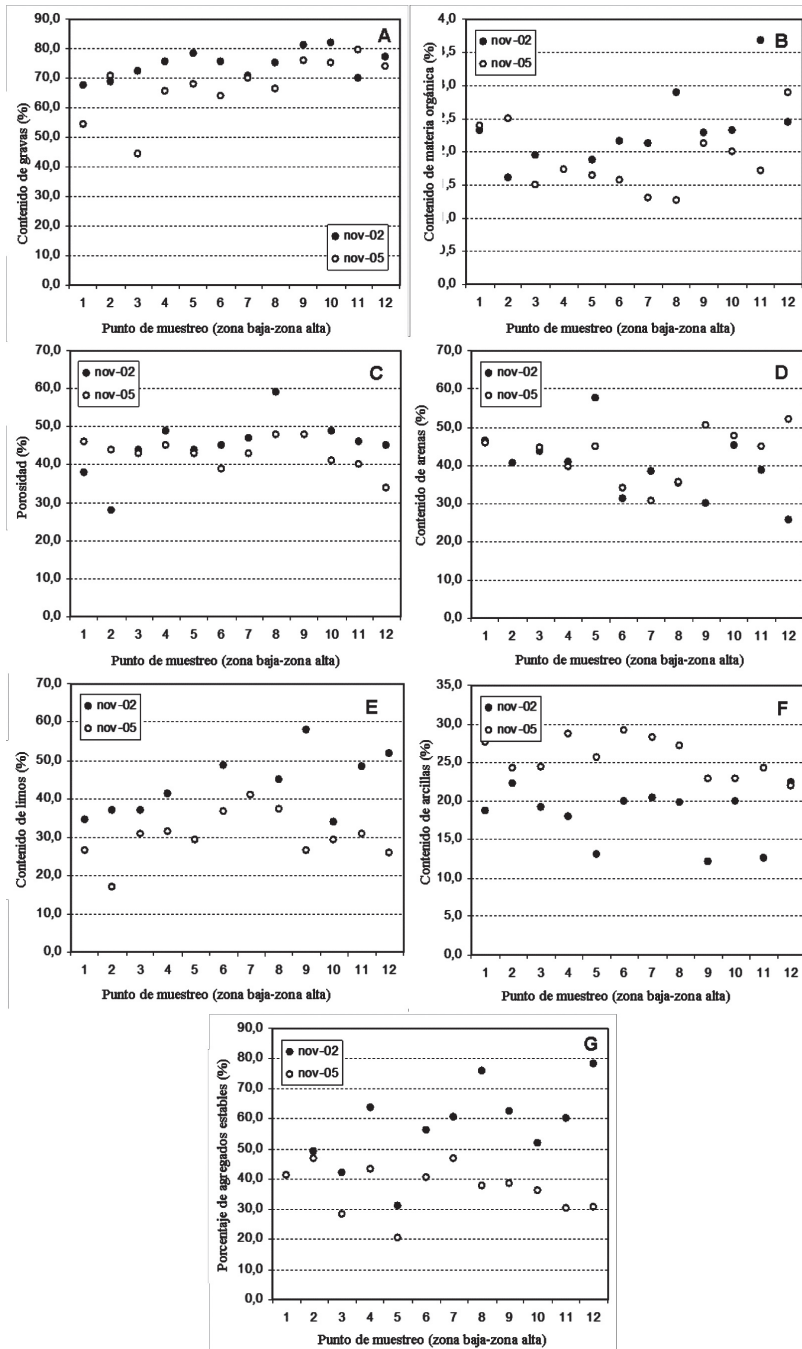
Figura 5



las fracciones más finas las que tuvieron mayores modificaciones espaciales (6D, E y F). Con la reducción de la cubierta vegetal ocasionada por la falta de precipitaciones, fueron los limos los que cambiaron en mayor medida, reduciendo su presencia en la zona alta y baja de la ladera y aumentando en la media. Esto podía relacionarse con una mayor actividad del arrastre de sedimentos por la escorrentía superficial desde la zona alta a la media de la ladera y desde la zona baja hacia el talweg, en este caso incorporando la fracción limosa al material depositado en el cauce. La reducción de limos favoreció el incremento porcentual de la fracción arenosa. Como consecuencia de estas alteraciones se generaron cambios en la estabilidad de los agregados (6G) a lo largo de la ladera, con un descenso generalizado de los valores de Nov-2005 aunque se mantuvo su patrón de distribución a lo largo de la ladera.

En definitiva, podemos apuntar que en el corto plazo, tuvo lugar una cierta modificación en la fracción orgánica, la textura y la estabilidad del suelo, que unido a una mayor actividad de la escorrentía superficial durante los fuertes aguaceros ocurridos y a la modificación de la cubierta vegetal durante el periodo seco, fueron los factores claves en la evolución del sistema eco-geomorfológico de la ladera

Figura 6



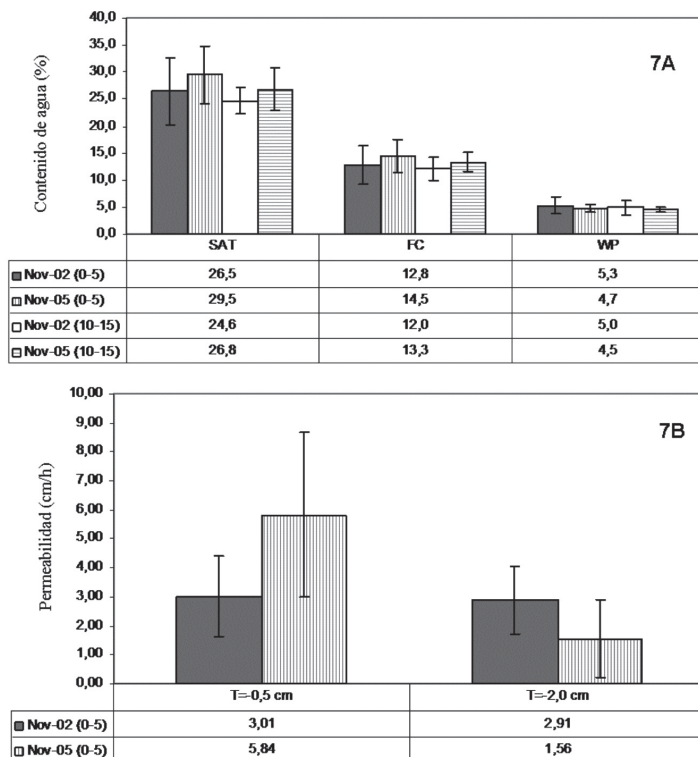
3.4. Cambios en las propiedades hídricas del suelo

Patrón de vegetación, rasgos superficiales del suelo y propiedades físicas y químicas de este controlan el comportamiento hidrológico de una ladera (Martínez-Fernández, 1996; Lavee et al., 1998; Calvo et al., 2003). Así, los cambios en el patrón eco-geomorfológico y en las propiedades del suelo observados supusieron una modificación de la hidrodinámica de la ladera, siendo el aumento de la pedregosidad superficial y la mayor presencia de arenas en el suelo, factores que podían favorecer los procesos de infiltración.

La capacidad de retención hídrica del suelo (RC) aumentó en estados de succión bajos, mientras que en las succiones más altas disminuyó (figura 9A). Tanto la capacidad de retención hídrica en saturación (pF 0.0) como en capacidad de campo (pF 2.0), se incrementaron en ambas profundidades de muestreo, mientras que en punto de marchitez (pF 4.2) se redujo ligeramente tanto a 5 como a 15 cm. La retención hídrica del suelo en estos tres estados energéticos ofreció variaciones significativas respecto a la profundidad de muestreo.

La conductividad hidráulica no saturada (K) fue medida a dos tensiones (-0.5 y -2.0 cm.) y los resultados obtenidos mostraron modificaciones en la capacidad de transmisión

Figura 7



del suelo (Figura 7). Estos muestran un incremento a tensiones cercanas a la presión atmosférica ($T=-0.5$ cm.) en casi 3.0 cm h^{-1} . Sin embargo, a una mayor tensión en la que deben succionar los poros de tamaño medio, se redujo 1.5 cm h^{-1} , pudiendo estar relacionado con los cambios granulométricos experimentados por el suelo a lo largo de la ladera. En Nov-02 la textura franca caracterizaba unas condiciones de transmisión hídricas medias, y los valores de K a lo largo de la ladera se acercaban bastante entre sí, pero en Nov-05 la textura del suelo sufrió una pequeña modificación pasando a ser predominantemente franco-areno-arcillosa, lo que se tradujo en un incremento de K en condiciones cercanas a la presión atmosférica, donde actúan fuerzas gravitacionales en poros de mayor tamaño, que son más abundantes por el incremento relativo sufrido por las arenas; al mismo tiempo, se redujo la K a tensión -2.0 cm. porque la fracción limosa disminuyó, así como el tamaño de poros que induce esta fracción dado que es la que controla fundamentalmente el flujo de agua en dicha tensión.

3.5. Modificación de la dinámica hidrológica

La humedad del suelo, especialmente bajo condiciones mediterráneas, es consecuencia de los aportes hídricos provenientes de las precipitaciones y de la capacidad de retención de los suelos, que varía dependiendo de las variables que integren el sistema ecogeomorfológico. Así, en situaciones de stress hídrico, (2004-05) el contenido de humedad en ambas profundidades fue ligeramente superior al de los años previos debido a un menor consumo hídrico dada la escasa vegetación. La evolución de la humedad del suelo es mucho más variable durante el periodo de stress hídrico, es decir, mucho más dependiente de los eventos pluviométricos, así la SD aumenta a casi el doble entre ambas situaciones: 2.7 y 3.4% a 5 y 15 cm. antes, mientras que después a 5 y 15 cm. quedan en 4.2 y 4.1% en el periodo oct-03 a may-04, y en 4.4 y 4.5% en el periodo oct-2004 a jun-05.

Los cambios introducidos en la evolución de la humedad del suelo, han permitido una modificación en la evolución del agua útil en el suelo, (Figura 8). En ambas profundidades se ha observado un aumento del agua útil disponible en el suelo, lo que puede deberse a varias razones. En primer lugar, la gran reducción de la cubierta vegetal y pérdida de biodiversidad tuvo como consecuencia un menor consumo hídrico, permaneciendo en la matriz del suelo una cantidad de agua que no podía ser succionada por la vegetación. Y en segundo lugar, porque el incremento de la pedregosidad superficial no embebida, debido al lavado superficial del suelo derivado de la acción de los procesos de escorrentía superficial, dificulta la evaporación del agua retenida en el suelo (Blevins et al., 1984; Munawar et al., 1990).

En la tabla 2 mostramos el número de días con agua útil en el suelo de la ladera durante el periodo de muestreo realizado en las tres estaciones húmedas seguidas, así como el incremento relativo de esta variable respecto del año inicial. En ambas profundidades de muestreo pudo observarse un mayor número de días con agua útil, siendo más significativo a 15 cm, donde siempre se superan 125 días, pero también supone que en cualquiera de los años considerados, hay más de 200 días en los que el suelo está desde el punto de vista hidrológico por debajo de punto de marchitez.

Las propiedades hídricas mostraron también una importante variabilidad intraladera. La conductividad hidráulica es mucho más variable en situación de stress hídrico que previamente, con mayores diferencias entre ambas tensiones.

Figura 8

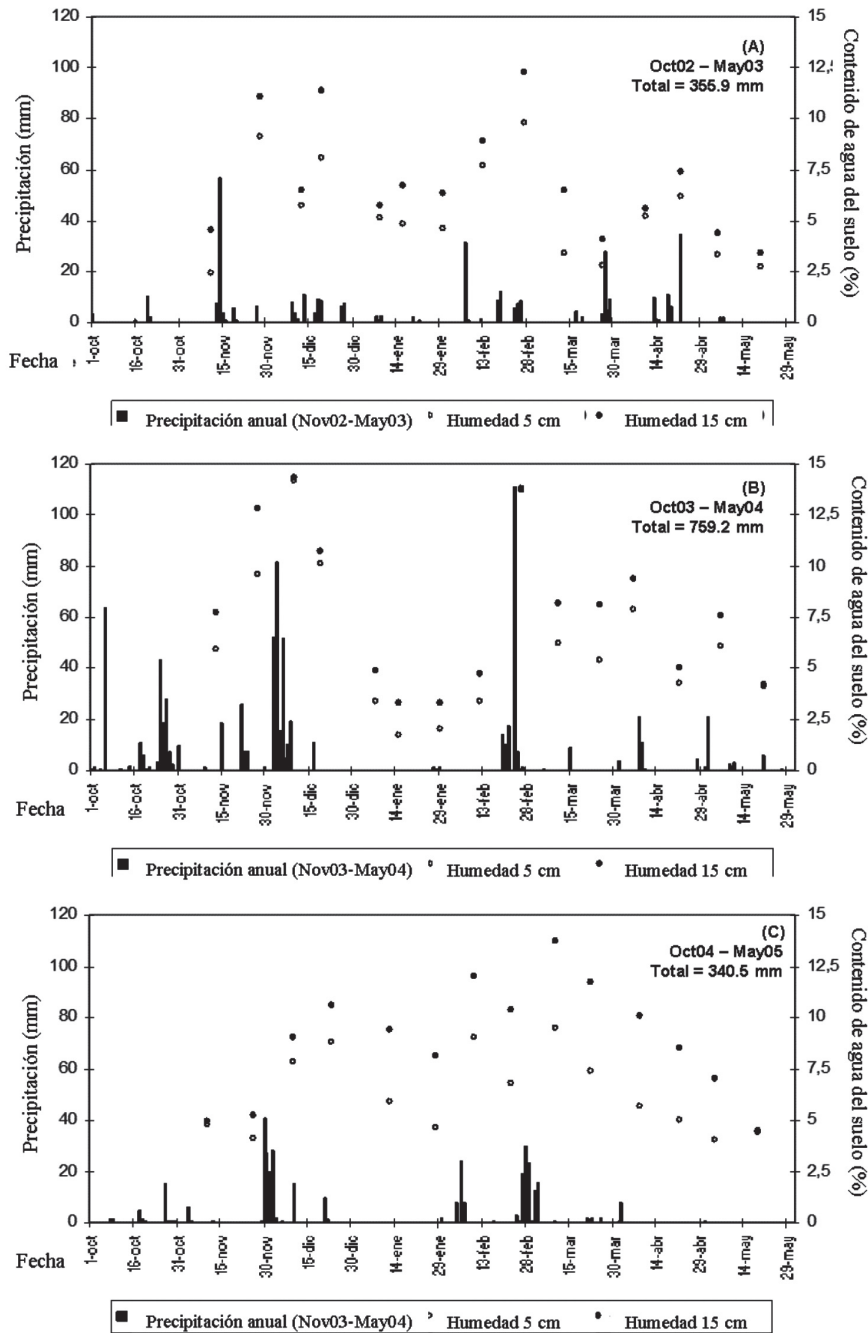


Tabla 2
 NÚMERO DE DÍAS CON AGUA ÚTIL EN EL SUELO E INCREMENTO RELATIVO RESPECTO AL AÑO INICIAL EN EL SUELO DE LA LADERA A 5 Y 15 CM DE PROFUNDIDAD.

Periodo	Precipitación total ^a (mm)	Días-5 cm. ^b	Δ (%) ^c	Días-15 cm. ^b	Δ (%) ^c
Oct-02 / May-03	355.9	104		130	
Oct-03 / May-04	759.2	112	7.7	140	7.7
Oct-04 / May-05	340.5	117	12.5	156	20.0

a: precipitación medida durante el periodo.

b: Número de días con agua útil para la vegetación en el suelo a 5 y 15 cm de profundidad.

c: Incremento del número de días respecto al primer periodo.

Si bien la K se redujo a ambas tensiones, las zonas más afectadas fueron la mitad de la ladera (-2 cm) y la zona baja (-0,5 cm), dependiendo de la pedregosidad superficial no embebida y de la reducción de contenido de limos. Las mayores diferencias en ambas tensiones aparecen cerca del interfluvio y cerca del talweg en ambas tensiones. Si bien el suelo pasó a tener una buena capacidad de infiltración a tensiones próximas a la atmosférica, en cuanto el agua circulaba por poros de tamaño medio a micro, su tasa de transferencia se reducía, con lo que la capacidad de recarga en la zona de las raíces del suelo también.

El contenido medio de humedad del suelo a lo largo de la ladera para el periodo considerado y en superficie, tuvo un patrón de comportamiento similar, aunque los valores son bajos, situándose entre el 6.0 y el 8.0 %, salvo en la zona baja que se llega a situar próximo al 10.0%.

En profundidad el contenido de humedad es más alto que en superficie, con unos porcentajes entre el 8 y el 12%. La menor cubierta vegetal y el menor consumo hídrico unido a la mayor pedregosidad superficial limitante de la evaporación del suelo suponen que la curva de humedad media intraladera alcanza unos valores más elevados. Además, la SD es en la parte media-alta de la ladera y bajo stress hídrico muy superior a la situación previa, lo que indica una respuesta más rápida ante los eventos pluviométricos y por consiguiente la existencia de un mayor número de fases de humectación-desección.

En la parte media-baja de la ladera, la SD durante la sequía es inferior cuando la humedad es menor en superficie, y superior en profundidad. Esto puede significar la existencia de un doble comportamiento hidrológico de la ladera, más escurridora en la zona media y alta, y más infiltradora en la zona baja, debido a la incidencia desigual tanto de algunas propiedades del suelo como de la reducción de la cubierta vegetal, lo que se traduce en una incidencia diferente intraladera.

La consecuencia del doble comportamiento hidrológico se plasma en la distribución y evolución del contenido de agua útil en la ladera, siendo la zona alta de la ladera la que tuvo un mayor contenido de agua útil en stress hídrico, frente a las zonas medias y bajas, en las que en esta época el contenido fue inferior.

3.6. Implicaciones ecogeomorfológicas

Se ha comprobado una interdependencia entre las variables analizadas así como una rapidez de respuesta de los elementos del sistema en situaciones de stress hídrico, especialmente cuando se suceden alternativamente y tienen una cierta periodicidad, tendiendo el sistema eco-geomorfológico hacia un ciclo de retroalimentación positivo. El motor de este proceso sería la reducción de las precipitaciones, del AWC y de la cubierta vegetal de la ladera, y con ello, los aportes de materia orgánica al suelo, lo que favorece la generación de escorrentía y la movilización de sedimentos ladera abajo. Además, los pequeños cambios texturales generaron una mayor inestabilidad de agregados, alterando el funcionamiento hidrológico del suelo y favoreciendo la continua degradación del sistema: cada vez menor cubierta vegetal, mayor exposición del suelo al impacto de gotas de agua, más escorrentía superficial y más erosión del suelo (Lavee et al., 1998). Sin embargo, en Nov-05 la reducción de la cubierta vegetal (menor consumo) y la mayor pedregosidad superficial (menor evaporación), se tradujo en una mayor AWC.

Se trata así de un conjunto de elementos interrelacionados que determina el comportamiento hidrológico y erosivo del sistema eco-geomorfológico, por lo que la aplicación del análisis factorial mediante el método de Componentes Principales (ACP) permitió establecer el grado de asociación entre las variables medidas en ambos periodos (Tablas 3 y 4).

En Nov-02 el ACP definió cuatro componentes que explicaban el 82.0% de la varianza total:

C1, es relativo a las “propiedades estables del suelo” (31.9% de la varianza). Bajo unas condiciones de protección del suelo debido a la presencia de una mayor biomasa, especialmente de vegetación terófito, la menor presencia relativa de arenas (-0.75) y el mayor contenido de materia orgánica en el suelo (0.79) implican una estabilidad estructural de los agregados (0.82) que definen la menor erodibilidad del suelo en esos momentos. Por otro lado, el mayor contenido en limos (0.79) en el suelo ejerce un control sobre la conductividad hidráulica (-0.44) provocando una menor transferencia a tensiones donde esta fracción granulométrica influye más ($T=-2.0$ cm). Por el contrario, los menores niveles de humedad (-0.71) durante la estación húmeda vienen explicados por un mayor consumo de agua por parte de la vegetación, que actuaría como autentico regulador hidrológico de la ladera.

C2, esta relacionado con los “indicadores de degradación de la ladera”, (20.6% de la varianza), y agrupa a las áreas con mayor contenido de gravas (0.83), con suelos más porosos (0.57) y menor densidad aparente (-0.83).

C3, es relativo a la “capacidad de retención hídrica” (17.8% de la varianza), indicando un equilibrio en la capacidad de retención hídrica de los suelos a diferentes tensiones (capacidad de campo, 0.97, saturación, 0.92, punto de marchitez, 0.86) y la K (-0.5 cm), en condiciones próximas a la atmosférica (0.39)..

C4, define la “capacidad de transferencia del suelo”, (11.9% de la varianza) y muestra la relación inversa entre el contenido de arcillas (-0.77) y las tasas de conductividad hidráulica a tensiones -0.5 y -2.0 cm (0.80 y 0.82, respectivamente) y con el contenido de humedad del suelo (0,31).

Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
<i>Gravas</i>	0.00	0.83	-0.04	-0.42
<i>Arenas</i>	-0.75	-0.05	-0.24	0.44
<i>Limos</i>	0.79	0.26	0.29	-0.09
<i>Arcillas</i>	-0.08	-0.48	-0.12	-0.77
<i>Densidad aparente</i>	-0.26	-0.83	-0.05	0.04
<i>Porosidad</i>	0.45	0.57	-0.05	0.05
<i>Materia orgánica</i>	0.79	-0.02	-0.35	0.30
<i>Agregados estables</i>	0.82	-0.23	0.23	-0.17
<i>pH</i>	-0.27	0.81	0.04	0.24
<i>Retención hídrica en saturación</i>	0.20	0.20	0.92	0.00
<i>Retención hídrica en capacidad de campo</i>	0.10	0.04	0.97	0.06
<i>Retención hídrica en punto de marchitez</i>	0.03	-0.17	0.86	0.10
<i>K(-0.5cm)</i>	-0.11	-0.28	0.39	0.80
<i>K(-2.0cm)</i>	-0.44	-0.13	-0.16	0.82
<i>Contenido de humedad (2002/03)</i>	-0.71	-0.43	-0.08	0.31

En Nov-05 ACP definió también cuatro componentes que explicaban el 82.6% de la varianza total (Tabla 4).

C1 es relativo a las “propiedades físicas del suelo controladoras de la hidrología”, (35.2% de la varianza), y muestra la relación positiva del contenido de arena (0.79) y negativa del limo (-0.69) y arcilla (-0.79) sobre las tasas de conductividad hidráulica a -0.5 cm (0.82) y -2.0 cm (0.78), la materia orgánica (0.71) y el contenido de humedad del suelo (0.67).

C2, esta relacionado con la capacidad de ‘retención hídrica’, (21.7% de la varianza), y agrupa inversamente el contenido de gravas (-0.48) y limos (-0.58) con la capacidad de retención hídrica del suelo (ST = 0.77, FC = 0.73, WP = 0.47) y la conductividad hidráulica a -2 cm (0.39).

C3, se relaciona con la ‘transmisividad’, (14% de la varianza) agrupando inversamente el contenido de gravas (0.47), la porosidad (0.69), y la materia orgánica (0.49), con el contenido de arcillas (-0.36), la densidad aparente (-0.70) y la conductividad hidráulica a -2cm (-0.39), y especialmente, no mostrando relación alguna con el contenido de humedad del suelo (0.11).

Por último, C4 se relaciona con la “estabilidad estructural del suelo”, (11,7% de la varianza) vinculándola positivamente (0.75) con el contenido de arcillas (0.38), con el de gravas (0.34), con la porosidad (0.34), y negativamente con el estado hidrológico del suelo de punto de marchitez (-0.50).

Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
<i>Gravas</i>	0.47	-0.48	0.47	0.34
<i>Arenas</i>	0.79	0.45	0.26	-0.18
<i>Limos</i>	-0.69	-0.58	-0.19	0.08
<i>Arcillas</i>	-0.79	0.01	-0.36	0.38
<i>Densidad aparente</i>	0.51	-0.17	-0.70	-0.37
<i>Porosidad</i>	-0.57	0.14	0.69	0.34
<i>Materia orgánica</i>	0.71	0.26	0.49	0.01
<i>Agregados estables</i>	-0.18	0.32	-0.03	0.75
<i>pH</i>	-0.52	-0.36	0.39	-0.38
<i>Retención hídrica en saturación</i>	-0.46	0.77	0.19	-0.02
<i>Retención hídrica en capacidad de campo</i>	-0.51	0.73	-0.08	-0.32
<i>Retención hídrica en punto de marchitez</i>	-0.29	0.47	0.31	-0.50
<i>K(-0.5cm)</i>	0.82	0.14	0.16	-0.03
<i>K(-2.0cm)</i>	0.78	0.39	-0.39	0.18
<i>Contenido de humedad (2003/04)</i>	0.05	0.84	-0.29	0.38
<i>Contenido de humedad (2004/05)</i>	0.67	-0.39	0.11	0.28

En definitiva, en situaciones de normalidad pluviométrica el agua aportada por las precipitaciones, es consumida por una vegetación terófito más abundante, lo que se traduce en una menor disponibilidad de agua útil, aunque favorece ciertos aportes de materia orgánica al suelo, que garantizan una mejor agregación del mismo. Sin embargo, ante una situación de stress hídrico, se reduce la protección del suelo por la disminución de la cubierta vegetal, debido a un descenso del número de individuos vegetales, modificando el patrón de vegetación de la ladera hacia mas disperso, lo que redujo el suministro de materia orgánica, si bien se incrementaron los flujos gravitacionales provenientes de precipitaciones no agresivas por la mayor pedregosidad superficial y una textura más arenosa. Así, la disponibilidad de agua en el horizonte superficial del suelo aumentaba en momentos inmediatamente posteriores a los eventos pluviométricos, debido a ausencia de vegetación consumidora de agua.

IV. CONCLUSIONES

La respuesta del sistema ecogeomorfológico a una situación de stress hídrico era extraordinariamente compleja. Cabría pensar que la mayor desprotección del suelo podría tener solo efectos negativos en el comportamiento hidrológico de la ladera, sin embargo y de acuerdo con Lampurdanés (2006), la rugosidad superficial incrementa las áreas de encharcamiento, reduciendo la escorrentía superficial. Por tanto, los efectos de una situación específica de stress hídrico en el balance de agua de una ladera dependerán tanto de las características del suelo como de las condiciones en las que se puedan producir las escasas precipitaciones en

dicho periodo. En este estudio, la modificación de las condiciones superficiales determinaron las variaciones en las tasas de infiltración del suelo, y aunque la reducción de los aportes de materia orgánica y de individuos vegetales hicieron disminuir la estabilidad de los agregados, pudiendo hacer más erodible al suelo, la aparición de pedregosidad superficial no embebida, debido al lavado de los materiales finos, supuso un efecto protector de la ladera.

La modificación textural provocó cambios en la capacidad de retención hídrica a tensiones bajas, próximas a la atmosférica, y en la conductividad hidráulica del suelo. Pero, precisamente y debido al incremento de la pedregosidad superficial no embebida en el suelo, a la reducción de la materia orgánica y a la pérdida de estabilidad de los agregados, la capacidad de retención hídrica del suelo disminuyó a tensiones altas (- 2 cm) donde actúan fundamentalmente micro-poros. Así pues, desde el punto de vista hidrológico, el suelo se hizo mucho más dependiente de los eventos pluviométricos, especialmente de su intensidad, por lo que la escasa cubierta vegetal podría tener asegurado su suministro hídrico debido al aumento del agua disponible en el suelo.

V. BIBLIOGRAFÍA

- AFNOR (Association française de normalisation), (1987). *Qualité de sols, methods d'analyse*. AFNOR, Paris, France.
- BLEVINS, R.L., SMITH, M.S., THOMAS, G.W., (1984). «Change in soil properties under no-tillage». In: Phillips, R.E., Phillips, S.H. (Eds.), *No Tillage Agriculture*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 190-330.
- BLEVINS, R.L., FRYE, W.W., (1993). «Conservation tillage: an ecological approach to soil management». *Adv. Agron.* 51, 33-78.
- BOIX-FAYOS, M. MARTÍNEZ-MENA, A. CALVO-CASES, E. ARNAU-ROSALÉN, J. ALBALADEJO, V. CASTILLO, (2007). «Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions». *Earth Surface Processes and Landforms* 32-1, 85-101.
- CALVO, A., BOIX, C. AND IMESON, A.C., (2003). «Runoff generation, sediment movement and soil water behavior on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in Southeast Spain». *Geomorphology* 50, 269-291.
- CALVO-CASES, A., BOIX-FAYOS, C., ARNAU-ROSELEN, E., (2005). «Pattern and thresholds of runoff generation and sediment transport on some Mediterranean hillslopes». In: C. García and R. Batalla (editors), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*, 31-51 pp.
- CEBALLOS, A., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., SANTOS, F. Y ALONSO, P., (2002). «Soil-water behaviour of sandy soils under semiarid conditions in the Duero Basin (Spain)». *Journal of Arid Environments* 51, 501-519.
- HANSEN, B., SCHJØNNING, P., SIBBESEN, E., (1999). «Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces». *Soil Till. Res.* 52, 103-111.
- KEMPER, W.D., ROSENAU, R.C., (1986). «Aggregate stability and size distribution». In: A. Klute (Editor), *Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edition, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, pp. 425-442.

- KOSMAS, C., MOUSTAKAS, N., DANALATOS, N.G. Y YASSOGLU, N., (1994). «The effect of rock fragments on wheat biomass production under highly variable moisture conditions in Mediterranean environments». *Catena* 23, 191-198.
- 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., PUIGDEFABREGAS, J., ROXO, M., SIMAO, A., STAMOU, G., TOMASI, N., USAI, D., VACCA, A., (1997). «The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions». *Catena* 29, 45-59.
- KOSMAS, C., GERONTIDIS, ST., MARATHIANOU, M., (2000). «The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece)». *Catena* 40, 51-68.
- LAMPURLANÉS, J., ANGÁS, P., CANTERO-MARTÍNEZ, C., (2001). «Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions». *Field Crops Res.* 69, 27-40.
- LAVÉE, 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, 407-422.
- LÁZARO, R., RODRIGO, F.S., GUTIÉRREZ, L., DOMINGO, F., PUIGDEFÁFRAGAS, J., (2001). «Analysis of a 30-year rainfall record in semi-arid SE Spain for implications on vegetation». *Journal of Arid Environments* 48, 373-395.
- LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., ROMERO-DÍAZ, A., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., (1998). «Vegetation and soil erosion under a semiarid Mediterranean climate: a case study from Murcia (Spain)». *Geomorphology* 24, 51-58.
- MÄRKER, M., ANGELI, L., BOTTAI, L., CONSTANTINI, R., FERRARI, R., INNOCENTI, L., SICILIANO, G., (2008). «Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: A case study in Southern Tuscany, Italy». *Geomorphology* 93, 120-129.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., (1996). *Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia. 191 pp.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., ROMERO-DÍAZ, M.A., BELMONTE-SERRATO, F., (1996). «Evolution of vegetation and pedological characteristics in fields with different age of abandonment: a case study in Murcia Spain». *Soil degradation and desertification in Mediterranean environments*. Geoforma Ediciones, pp. 279-290.
- MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., (2006). *Variabilidad espacio-temporal del sistema ecogeomorfológico mediterráneo en un ambiente ecotono semiárido/subhúmedo de los Montes de Málaga. Implicaciones hidrológicas y erosivas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga. 481 pp.
- MUNAWAR, A., BLEVINS, R.L., FRYE, W.W., SAUL, M.R., (1990). «Tillage and cover crop management for soil water conservation». *AGRON. J.* 82, 773-777.
- ROBINSON, G.W., (1922). «A new method for mechanical analysis of soil and other dispersion». *J. Agr. Ac.* 12, 306-321.

- SMITH, G.G., FOLEY, J.L., LOCH, R.J., (1992). «Effects of electrical conductivity of water used in a wetting and in wet sieving on measured aggregate stability». *Soil Technology* 5, 177-184.
- ZHANG, R., (1997). «Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer». *Soil Science Society of America* 61, 1024-1030.