

INFLUENCIA DE LOS FACTORES TOPOGRÁFICOS Y EDAFOLÓGICOS EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y DEPÓSITO EN UNA MICROCUENCA DE OLIVAR CON MÍNIMO LABOREO

E. V. Taguas¹, A. Peña¹, J.L. Ayuso¹, J.V. Giráldez².

¹ ETSIAM, Dpto. Ingeniería Rural–Proyectos de Ingeniería, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14080, Córdoba. Telf. 957 218571-8532, correo: ir2tarue@uco.es, ir1peala@uco.es, aymuj@uco.es.

² Dpto. de Hidráulica –Universidad de Córdoba, IAS, Alameda del Obispo, 14080, Córdoba. Telf. 957 499208, correo: aglgicej@uco.es

RESUMEN. La necesidad del estudio de la erosión en olivar a una escala menor que la de parcela, exige la aplicación de métodos de medida que permitan adquirir un alto número de datos sin testigos de una forma fácil y económica y con valores de precisión adecuada, tales como el GPS (Global Positioning System). Se ha establecido dentro de una microcuenca de olivar de sierra, una zona de estudio con las mismas condiciones de manejo, donde se ha dispuesto una malla de puntos de control del nivel de cota, localizándose puntos de erosión y puntos de depósito. La caracterización de estos puntos según las variables: área de desagüe (A), factor de longitud de ladera (LSF), índice de humedad topográfico (w_T), pendiente (β), curvatura plana (ω), curvatura del perfil (ϕ), orientación (Ψ), cota (H), fracciones de tamaños de partículas (*arena, arcilla y limo*), % $M.O.$, % $CaCO_3$, conductividad hidráulica saturada de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (K_{sat0} y K_{sat10}), densidad aparente de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (D_{ap0} , D_{ap10}) y capacidad de campo y punto de marchitez permanente de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (CC_0 , CC_{10} , PMP_0 y PMP_{10}); y la comparación de estadísticos, histogramas y distribución espacial con los correspondientes a la zona de estudio, han permitido identificar tendencias globales de los puntos de erosión y depósito. Las metodologías del Análisis de Componentes Principales y el Análisis Cluster han sido aplicadas para el examen de diferentes patrones de comportamiento.

En los puntos de pérdida tanto el papel de la topografía (β y LSF) como el de las condiciones de infiltración (K_{sat0}) resultan fundamentales para explicar la erosión. Así, las áreas más susceptibles a la pérdida de suelo en las cuencas de estudio son aquéllas donde el transporte de sedimentos se ve favorecido por la topografía o por la reducción de infiltración. En el caso del depósito, hay que destacar la tendencia a concentrarse en áreas con los valores más altos de K_{sat0} , lo cual muestra la importancia del manejo en los mecanismos de infiltración y redistribución de sedimentos en la cuenca.

ABSTRACT. Research on soil loss in olive orchards on a smaller scale than the plot size, requires methodologies that collect numerous data easily and economically and with sufficient accuracy, such as GPS. One area under the same management practices to control the height of

microrelief has been set up in a microcatchment with olive trees, evaluating erosion and deposition points. These points have been studied according to the following attributes: drainage area (A), LSF factor (LSF), topographic wetness index (w_T), slope (β), plan curvature (ω), profile curvature (ϕ), aspect (Ψ), height (H), texture (*arena, arcilla y limo*), % $M.O.$, % $CaCO_3$, saturated conductivity from 0 to -10 cm (under soil level) and beyond -10 cm (K_{sat0} y K_{sat10}), bulk density from 0 to -10 cm (under soil level) and beyond -10 cm (D_{ap0} , D_{ap10}) and field capacity and wilting point from 0 to -10 cm and beyond -10 cm (CC_0 , CC_{10} , PMP_0 y PMP_{10}). Statistics, histograms and spatial distribution of these parameters in the control area and in the erosion and deposition points have been compared to observe their global trends. Also, the Principal Components Analysis and Cluster Analysis have been applied to separate different patterns.

The most important attributes to explain erosion points in both watersheds are the slope, the LSF factor and the saturated conductivity (β , LSF , K_{sat0}), due to better topographic characteristics for the transport of sediment and poor conditions for infiltration. In the case of deposition points, the essential factor is the saturated conductivity so that the zones with the highest values showed a greater density of points. These attributes should be considered in order to plan and justify soil management practices.

1.- Introducción

El olivar es uno de los cultivos en los que el riesgo de erosión es mayor, debido principalmente a las elevadas pendientes en las que se disponen un buen número de ellos. Autores como López-Cuervo (1990) llegan a estimar estas pérdidas en 80 t/ha. Por otro lado, hay $1.48 \cdot 10^6$ ha en Andalucía en la cuales se obtienen el 54.7% del aceite elaborado en la U. E, siendo el 71.4% de las explotaciones olivareras en Andalucía pequeñas (tamaño medio 2.37 ha) y medianas, (18.02 ha) (Consejería de Agricultura y Pesca, 2003). Por consiguiente, la microcuenca es una unidad ambiental cuya extensión permite abordar los problemas de pérdida de suelo por fincas individuales o por grupos reducidos de propietarios; además, el número de fenómenos naturales que intervienen en la circulación de agua y sedimentos es mayor y más complejo que en las parcelas tradicionalmente usadas en el análisis de la erosión en olivar.

El manejo del suelo en olivar influye sobre distintas características del suelo que pueden acelerar los procesos de erosión (Gómez et al., 1999, Polo et al., 2003). También, controles topográficos como la pendiente, curvatura y longitud de ladera son componentes indispensables en el modelado de los procesos hidrológicos-erosivos de las cuencas (Wilson & Gallant, 2000, Cap. 1), especialmente cuando las operaciones de manejo inducen elementos locales como aterrazados, caballones y medialunas, que modifican las direcciones de flujo determinadas por la pendiente natural de la ladera en la cuenca.

Por otro lado, el reciente desarrollo tecnológico en la aplicación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ofrece amplias posibilidades para la caracterización temporal y espacial de las dinámicas de erosión y sedimentación (Higgit & Warbuton, 1999). La exactitud del GPS ha mejorado notablemente, haciéndolo aplicable al examen continuo de los cambios morfológicos de la superficie terrestre de pequeñas variaciones a intervalos cortos (Wu & Cheng, 2005). El desarrollo de esta técnica ha permitido que sea más barato, ligero y fácil de usar en investigaciones geofísicas como las medidas morfológicas de cárcavas efímeras en pequeñas cuencas (Wu & Cheng, 2005); estimaciones morfométricas de transporte de sedimentos en cursos fluviales (Higgit & Warbuton, 1999); cambios morfológicos de deslizamientos (Malet et al. 2002). Malet et al. (2002) comprueban en su trabajo sobre el uso del GPS para el control continuo de los deslizamientos que se pueden detectar variaciones de hasta 5 mm/día, y que esta técnica resulta fácilmente adaptable a cualquier tipo de entidad geofísica.

Los métodos tradicionales para la medida de pérdida de suelo pasaban por la determinación del descenso del nivel topográfico con respecto a unos testigos que indican la posición de la superficie original (Haigh, 1977; Sarre, 1984). Posteriormente, se optó por el uso de teodolitos u otros instrumentos topográficos que no requieran testigos y proporcionaban una alta exactitud (Laguna, 1989; Wesemael et al. 2006).

En los estudios dedicados a analizar la pérdida de suelo en olivar, la escala de trabajo ha sido la parcela, sin embargo el interés que suscita la ampliación de los estudios de erosión a la microcuenca requieren técnicas que permitan aumentar de un modo operativo y económicamente viable el número de puntos de control tales como el GPS.

Así, los objetivos de este trabajo son los siguientes:

1. La localización de zonas donde sea evidente la erosión o el depósito a partir de la diferencia de medidas en altimetría en una serie de puntos de control distribuidos por la microcuenca en el intervalo aproximado de un año (una campaña).

2. El estudio del papel de las variables topográficas y edafológicas en ambos fenómenos a la escala de trabajo.

2.- Material y métodos.

2.1. Introducción.

Se ha establecido en la cuenca de estudio una malla de puntos de control del nivel de cota donde, a partir de las diferencias de dos levantamientos topográficos al principio y al final de la campaña 2004-2005, se han determinado áreas de erosión y depósito. La siguiente etapa consistió en examinar los atributos topográficos y edafológicos de estos puntos de control: área de desagüe (A), factor de longitud de ladera (LSF), índice de humedad topográfico (w_T), pendiente (β), curvatura plana (ω), curvatura del perfil (φ), orientación (Ψ), cota (H), fracciones de tamaños de partículas (arena, arcilla y limo), % M.O., % $CaCO_3$, conductividad hidráulica saturada del suelo de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (K_{sat0} , K_{sat10}), densidad aparente de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (D_{ap0} , D_{ap10}), capacidad de campo y punto de marchitez permanente de 0 a 10 cm de profundidad y por debajo de 10 cm (CC_0 , CC_{10} , PMP_0 y PMP_{10}). En el caso de los atributos edafológicos, para la textura, %MO, % $CaCO_3$ se tomaron 11 muestras mientras que para Dap , PMP y CC fueron 30 por horizonte. El ensayo de K_{sat} (Philip, 1993) fue realizado también en 30 puntos por horizonte. La toma de muestras y los ensayos fueron realizados durante los meses de julio y agosto de 2004. Una vez examinados los datos, se compararon los estadísticos, histogramas y la distribución espacial de los atributos de la zona de estudio con los correspondientes a los puntos de erosión y depósito.

Para la elaboración de estos mapas de distribución, se interpolaron los valores puntuales muestreados por el método del inverso del cuadrado de la distancia a partir del sistema de información geográfica ArcView (ESRI, 2000). Finalmente, la aplicación de técnicas como el Análisis de Componente Principales (Malinowski, 1991) y el Análisis Cluster (Timm, 2002), permite el estudio de diferentes combinaciones de variables presentes en estas áreas de pérdida y ganancia de sedimentos.

2.2. Microcuenca de estudio.

La subcuenca de Setenil (Cádiz) tiene una extensión de 6.7 ha y se sitúa en una zona de olivar de sierra con una altitud media de 782.2 m y una pendiente representativa del 10,3 %. El clima de la cuenca se encuadra en el tipo mediterráneo subhúmedo de tendencia atlántica, con una media anual de 1100 mm. En cuanto a la variación anual, son las estaciones de otoño e invierno las que registran mayores lluvias (74.8 %), con un máximo que suele darse en el mes de diciembre. Los meses de verano registran valores muy bajos relacionados con tormentas intensas de poca duración. El suelo en la cuenca tiene una profundidad aproximada de 1.5 m, presenta textura francoarenosa con valores de materia orgánica medios del 0.9 %, en algunos puntos donde abundan además los elementos gruesos de carbonato cálcico. La microcuenca se divide en dos zonas: una de 1.4 ha en

cabecera con olivos jóvenes y la otra, que constituye la zona de estudio, con olivos de 20 años (Fig. 1). El manejo aplicado en ésta ha sido laboreo tradicional. Desde hace tres años, el manejo de la finca ha cambiado hacia laboreo mínimo que básicamente consiste en una labor poco profunda cruzando las calles en primavera (abril o mayo) si el año no es seco. En la campaña de estudio caracterizada por la escasez de lluvia, no se labró debido al temor de un exceso de evaporación que no beneficiaría la cosecha. Por consiguiente, la distribución de puntos de las áreas de erosión y depósito va a responder principalmente a la acción de la lluvia, ya que la incidencia mecánica de los aperos sobre la superficie del suelo es mínima. En cualquier caso, se asume que las pequeñas alteraciones debidas al transporte, pisoteo, etc, están incluidas en los niveles de precisión considerados (Ep. 2.3). Finalmente, en las campañas en las que se incorpore laboreo, la distribución de las zonas de pérdida

y ganancia de suelo deberían contemplarse como la respuesta combinada de acciones hídricas y mecánicas, considerándose además, aspectos como la orientación y la profundidad de la labor así como las alteraciones en la K_{sat} y la D_{ap} .

2.3. Levantamientos topográficos: puntos de control para el análisis de la erosión y el depósito de sedimentos.

Se ha establecido una malla de puntos de control sobre la cuenca de estudio en los que se han llevado a cabo mediciones en los meses de septiembre de 2004 y de 2005, con un equipo GPS Leyca 1200 de precisión planimétrica de $1.0\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$ y altimétrica de $2.0\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$, indicadas como el error medido cuadrático ($RMSE$)

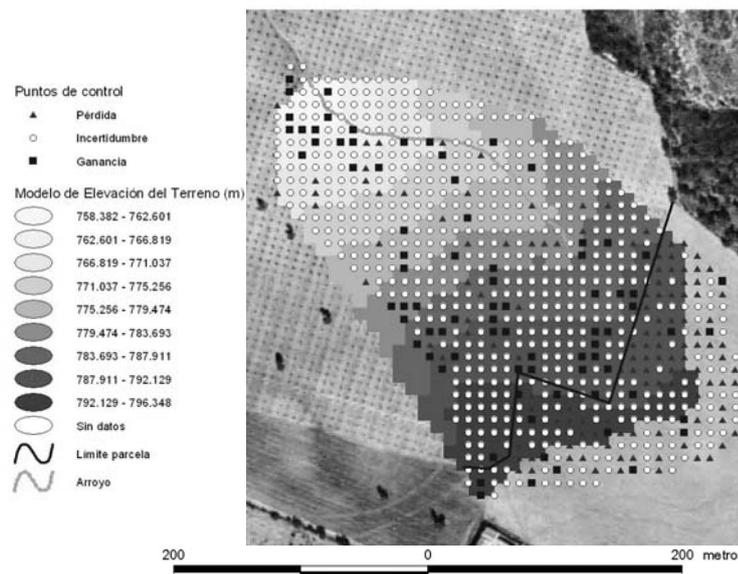


Fig. 1. Modelo de elevación de la cuenca de Setenil con la malla de puntos de control, mostrando los puntos de pérdida y ganancia de cota (triángulos y cuadrados) y el límite de la parcela con los olivos de 20 años

Así, cada medida en altimetría realizada tiene una probabilidad del 67% de no cometer un error superior al valor del $RMSE$. La teoría de transmisión de errores en la suma de dos magnitudes verificará siempre que el error de la misma ha de ser la suma de los errores de los sumandos. Por consiguiente, el cuadrado del $RMSE$ de la suma σ_c de dos magnitudes A_c B_c será igual a la suma de los cuadrados de los $RMSE$ de los sumandos, a_c y b_c , respectivamente (García, 1997) siempre que las medidas no sean sesgadas (los errores de medida tienen media 0) y que los errores en las medidas de un punto en 2004 y 2005 no estén relacionados (Ec. 1):

$$\sigma_c = \sqrt{a_c^2 + b_c^2} \quad (1)$$

De esta manera, sustituyendo el $RMSE$ de las medidas de altimetría del año 2004 y las correspondientes al año 2005 en la Ec. 1, se obtiene un $RMSE$ de la magnitud diferencia en altimetría de 2,8 cm, que supone un nivel de confianza del 67%. Si se amplía el intervalo de confianza correspondiente al $RMSE$ a 4.0 cm, la probabilidad de que la medida tenga un error inferior a ± 4.0 cm aumenta hasta el 84 % según la curva de Gauss.

Si se procede a evaluar el balance de cota en los puntos de control distribuidos por las cuencas entre los años 2005 y 2004, siempre que se hallen diferencias por encima o por debajo de 4.0 cm se tendrá una probabilidad de más del 80% de estar caracterizando eficientemente pérdidas o ganancias de suelo. Precisamente, éste ha sido el criterio para localizar puntos de control donde se ha considerado que la erosión (perdidas superiores a 4.0 cm) o el depósito son evidentes (ganancias de cota superiores a 4.0 cm).

De los aproximadamente 600 puntos de control de separación 10 x 10 m localizados en la parcela de olivos de 20 años (Fig. 1, ver límite), se han localizado según el criterio descrito, 36 puntos de pérdida y 62 de ganancia.

3.- Resultados.

3.1. Caracterización de los puntos de erosión.

Las Tablas 1 y 2 muestran la media (M), la desviación típica (Dt), el valor mínimo (Min) y el máximo (Max), el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de asimetría (CA) y la curtosis (CK) de la distribución de los puntos de pérdida y la de la zona de estudio. Además, se han comparado los histogramas para valorar distintas tendencias y se han examinado sobre los mapas de

distribución los atributos mas importantes de las áreas de mayor densidad.

De esta forma, los puntos de pérdida se sitúan en áreas caracterizadas por A , LSF y β altos en relación a los valores de la zona de estudio (Tablas 1 y 2). Las curvaturas planas y del perfil de las zonas donde se distribuyen los puntos de erosión, en general presentan bajo valor absoluto (curvaturas relativamente planas). La curvatura plana (ω) relacionada con la convergencia y divergencia del flujo, tiende a ser convexa, mientras que la curvatura del perfil, asociada a la aceleración del flujo, es mayormente cóncava. En relación a los atributos edafológicos, las Tablas 3 y 4 ofrecen los estadísticos representativos de los puntos de erosión y la zona de estudio. Se han excluido de la Tabla 3 los valores de CC y PMP , con medias 0.15 y 0.07 respectivamente por su baja variabilidad en la cuenca.

Tabla 1. Estadísticas de los atributos topográficos de los puntos de erosión.

	LS F	w_T	A (ha)	ω	φ	$\Psi(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$H(m)$
M	2.5	7.0	0.1	0.1	-0.2	297.3	6.8	779.5
Dt	1.8	0.5	0.4	0.6	0.8	91.9	1.5	7.7
Min	0.0	6.5	2.1	-1.3	-4.8	4.8	3.0	765.4
Max	7.5	8.5	5.0	1.5	0.8	357.8	9.3	790.7
CV	1.6	1.8	0.0	0.0	-5.1	-2.7	-0.5	-0.3
CA	2.4	3.4	6.0	0.7	29.1	6.5	-0.4	-1.2
CK	2.5	7.0	35.8	0.1	-0.2	297.3	6.8	779.5

Tabla 2. Estadísticas de los atributos topográficos de la zona de estudio.

	LSF	w_T	A (ha)	ω	Φ	$\Psi(^{\circ})$	β ($^{\circ}$)	$H(m)$
M	2.2	7.2	0.0	0.0	0.0	271.0	6.4	780.3
Dt	2.3	0.7	0.3	1.0	1.0	109.5	1.8	8.5
Min	0.0	6.0	0.0	-9.3	-22.5	0.0	0.0	759.0
Max	73.9	18.8	6.7	16.2	19.7	360.0	14.8	796.0
CV	1.0	0.1	7.8	194.4	-95.8	0.4	0.3	0.0
CA	7.4	3.9	14.3	0.1	0.4	-1.7	0.0	-0.3
CK	105.0	24.6	226.3	22.3	79.3	1.5	0.5	-0.8

Tabla 3. Estadísticas de los atributos edafológicos de los puntos de erosión.

	Ac %	Lm %	Ar %	MO %	$Carb$ %	K_{sat0} cm/h	K_{sat10} cm/h	D_{ap0} g/cm ³	D_{ap10} g/cm ³
M	14.4	9.3	76.4	0.92	10.4	13.5	11.9	1.69	1.73
Dt	1.0	1.4	1.5	0.17	4.0	10.5	5.5	0.09	0.08
Min	12.2	5.9	73.6	0.68	3.6	3.9	5.1	1.41	1.55
Max	15.7	11.7	78.5	1.33	20.6	40.5	33.7	1.89	1.83
CV	0.1	0.2	0.0	0.2	0.4	0.8	0.5	0.1	0.0
CA	-0.9	-0.3	-0.4	0.9	0.9	1.3	2.1	-0.3	-0.8
CK	-0.4	-0.5	-1.1	0.3	0.7	0.4	6.3	1.5	-0.1

Tabla 4. Estadísticas de los atributos edafológicos de la zona de estudio.

	Ac %	Lm %	Ar %	MO %	$Carb$ %	K_{sat0} cm/h	K_{sat10} cm/h	D_{ap0} g/cm ³	D_{ap10} g/cm ³
M	14.4	9.0	76.6	0.88	8.9	15.0	11.5	1.66	1.70
Dt	1.2	1.6	2.0	0.14	3.9	10.0	4.2	0.09	0.08
Min	6.9	5.0	71.9	0.41	1.6	2.0	3.0	1.11	1.47
Max	16.6	13.6	87.8	1.40	22.7	44.0	41.9	1.90	1.89
CV	0.1	0.2	0.0	0.2	0.4	0.7	0.4	0.1	0.1
CA	-1.7	0.3	0.3	0.6	1.0	0.7	2.3	-1.0	0.0
CK	4.7	-0.6	1.8	1.4	1.1	-0.8	9.8	4.0	-0.9

Tabla 5. Estadísticas de los atributos topográficos de los puntos de depósito

	<i>LSF</i>	<i>w_τ</i>	<i>A</i> (<i>ha</i>)	<i>ω</i>	<i>φ</i>	<i>Ψ</i> (°)	<i>β</i> (°)	<i>H</i> (m)
M	2.9	7.3	0.1	0.0	0.0	269.6	6.5	780.7
Dt	5.3	0.8	0.5	0.9	0.5	116.6	1.9	10.2
Min	0.0	6.5	0.0	-3.5	-2.9	1.4	2.4	761.3
Max	39.1	11.7	4.1	2.8	1.6	358.0	11.9	795.8
CV	1.9	0.1	5.9	-52.5	971.2	0.4	0.3	0.0
CA	5.9	3.7	7.4	-0.7	-1.9	-1.6	0.1	-0.7
CK	38.5	15.8	56.0	6.8	16.1	1.1	0.0	-1.0

Tabla 6. Estadísticas de los atributos edafológicos de los puntos de depósito.

	<i>Ac</i> %	<i>Lm</i> %	<i>Ar</i> %	<i>MO</i> %	<i>Carb</i> %	<i>K_{sat0}</i> cm/h	<i>K_{sat10}</i> cm/h	<i>D_{ap0}</i> g/cm ³	<i>D_{ap10}</i> g/cm ³
M	14.2	8.3	77.5	0.83	7.6	19.7	13.3	1.66	1.70
Dt	1.4	1.4	2.0	0.13	3.3	10.7	5.3	0.07	0.08
Min	8.2	6.3	72.3	0.49	3.3	3.3	4.7	1.49	1.54
Max	16.4	11.4	85.5	1.28	19.0	42.9	35.7	1.86	1.87
CV	0.1	0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.4	0.0	0.1
CA	-1.9	0.9	0.7	0.5	1.1	0.2	2.0	0.3	0.2
CK	5.2	-0.2	4.2	2.6	1.3	-1.1	5.5	0.3	-0.8

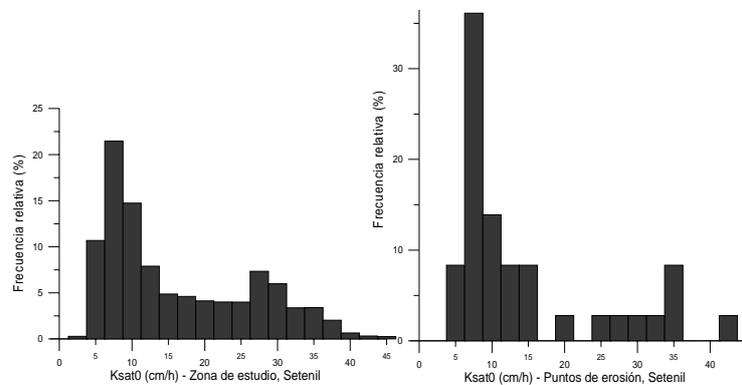


Fig. 2. Histogramas de *K_{sat0}*.

De acuerdo al examen de histogramas, estadísticos y mapas de distribución, tanto la *K_{sat0}* (Fig. 2 y Tablas 3 y 4) como la *D_{ap}* indican una tendencia mayoritaria de los puntos de pérdida a distribuirse en zonas donde las condiciones de infiltración resultan más desfavorables. Precisamente, parte de estas áreas se caracterizan por una mayor abundancia elementos gruesos en superficie (%*CaCO₃*) que dificultan la eficiencia de las labores y que mejoran los valores de %*MO* (Tablas 3 y 4).

3.2. Caracterización de los puntos de depósito.

La Tabla 5 muestra las características más importantes de la distribución de los valores topográficos alcanzados por los puntos de depósito.

En este caso, respecto a la zona de estudio (Tabla 2), se observa una alta densidad de puntos en áreas con los *LSF* más altos (proximidades del canal). El resto de variables no aporta información relevante, ya que a excepción de la ladera N, se extienden por prácticamente toda la cuenca. La ausencia de puntos de depósito en la ladera N, caracterizada por sus valores más bajos de *A* y *LSF*, puede explicar una redistribución de sedimentos mínima

en esta zona y el papel del canal como principal receptor de sedimentos.

En relación a las propiedades del suelo, las Tablas 6 y 4 presentan diferencias notables para los valores de *K_{sat0}* y *K_{sat10}*, junto con la M.O. y el contenido en carbonatos. Así, el 31.8 % de la superficie de la zona de estudio presenta *K_{sat0}* superiores a la media de los puntos de depósito, 19,7 cm/h, y en ella están situados el 50,0% de los mismos. En el siguiente horizonte, se mantiene la tendencia y el histograma de los puntos de ganancia se halla desplazado a la derecha tal y como indican los valores del CS.

Además, a las áreas con mayores tasas de infiltración se le asocia un mayor lavado y la disminución de elementos gruesos cálcicos superficiales que facilitan la actividad del herbicida y explican la reducción de la *MO*.

3.3. Análisis de la varibilidad de los puntos de erosión.

Debido a la heterogeneidad de la cuenca y la distribución de los puntos de erosión, se han examinado dentro del grupo distintos patrones de comportamiento en relación a las variables de estudio. Para ello, se ha aplicado la técnica de ACP sobre la matriz puntos de erosión-atributos, completándose con un AC (modalidad jerárquica del centroide) para la identificación de tendencias distintas.

En primer lugar, habría que señalar que la matriz de datos de entrada estaba tipificada para homogeneizar las unidades, de forma que el resultado de la matriz de covarianza es una matriz de coeficientes de correlación. Por otra parte, la información correspondiente al plano principal (primer y segundo eje) supone un 47% de la variabilidad del sistema, con un tercer eje se alcanza el 62%. De acuerdo a los pesos de las variables en los ejes principales se han considerado únicamente aquella cuyo valor era superior a 0.6. Así, se puede extraer que el primer eje principal responde a variables edafológicas y relacionadas con el manejo como la K_{sat} en ambos horizontes, el PMP_0 , el $\%CaCO_3$ y $\%limo$, mientras que el segundo recoge principalmente los aspectos topográficos: LSF , A , ϕ , β junto con el $\%$ arcilla. En relación al tercer eje, debido a que se repiten variables y que la CC_{10} tiene una variabilidad mínima, no se considera.

La Fig. 3, muestra la distribución de los individuos en el plano principal. De ella se han extraído los puntos cuya suma de los cosenos cuadrados sobre los ejes principales es inferior a 0.2 ya que al hallarse muy alejados, no puede juzgarse su proximidad real con el resto. Según los pesos obtenidos, en la Fig. 3 el primer y cuarto cuadrante mostraría los individuos con K_{sat} mayores y menores $\%CaCO_3$ y $\%limo$. En relación al segundo eje principal, el primer y segundo cuadrante muestra los puntos con A , w_T y $\%$ arcilla más altos y β y ϕ más bajas.

En el AC, el establecimiento del número máximo de grupos se ha llevado a cabo diferenciando sobre el terreno seis zonas de acuerdo a características visuales, la situación en la ladera y la posición respecto el arroyo. Sin embargo, se han examinado los resultados para cuatro, cinco y seis grupos, determinando que la mejor solución era la correspondiente a cuatro grupos, dado que el objetivo es establecer cualitativamente rasgos generales sobre la combinación de variables en la pérdida de suelo y el aumento o la disminución del número de grupo no proporcionaba información significativa.

Así, el Grupo 1, muestra una serie de puntos en el que las condiciones de infiltración son buenas (K_{sat0} entre 19.2 y 40.5 cm/h) y los condicionantes topográficos intermedios (β comprendidas entre el 8.0 y 12.5 % y ϕ entre -0.20 y 0.04). En esta zona (cabecera, ladera S), la ausencia de elementos gruesos limitando la eficacia de las labores ($\%CaCO_3$) y protegiendo el suelo de la salpicadura permite la pérdida de suelo que favorecen los agentes topográficos para intensidades de lluvia elevadas. El Grupo 2, se diferencia claramente del resto porque es

el único punto, pese a los efectos de resolución de la Fig. 3, que realmente pertenece según la información topográfica al canal. Su alto valor de A , valores de K_{sat} bajas y un $\%CaCO_3$ bajos asociados a un lavado profundo en el horizonte, los separa del resto.

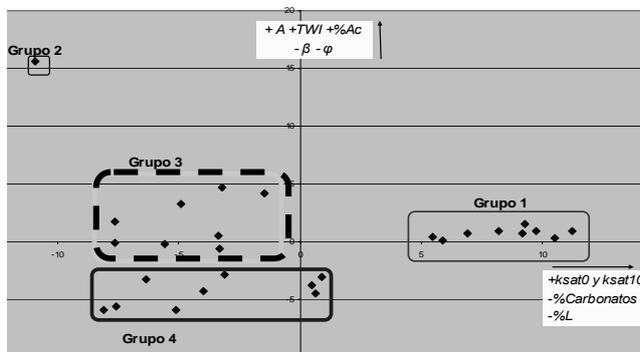


Fig. 3. Distribución de los puntos de erosión sobre los ejes principales.

El grupo 3 y el grupo 4 tienen en común los valores de K_{sat0} bajos: entre 3.9 y 10.0 cm/h para el 3 y valores entre 4.4 y 14.1 cm/h para el grupo 4, junto con una mayor proporción de $\%CaCO_3$ y $\%limo$. El grupo 3 muestra los valores más elevados de A mientras que en el grupo 4 son los valores de β y la ϕ los factores topográficos más característicos. Así, el grupo 3 presenta valores de pendiente entre el 7.5% y 16%, frente al grupo 4 con una pendiente mínima del 12,8% y ϕ más convexas. En estas áreas, pese a la presencia de elementos gruesos en superficie protegiendo el suelo, las reducidas tasas de infiltración favorecen la concentración del flujo y el poco material que quede suelto por la lluvia o las labores es susceptible de transporte a otras zonas.

3.4. Análisis de la varibilidad de los puntos de depósito.

En este caso, el plano principal (primer y segundo eje) supone un 45% de la variabilidad del sistema. Si se considerara el tercer eje se alcanzaría hasta 60%, sin embargo, este sólo muestra buena correlación con w_T que a su vez está correlacionado con el LSF que contribuye notablemente a la formación del primer eje. Por consiguiente, ampliar el número de ejes no mejora significativamente la caracterización de los individuos.

Las variables con peso mayor de 0,6, han sido para el primer eje principal: LSF , H , $\%$ arcilla y los PMP en ambos horizontes. El segundo eje, sin embargo representa únicamente variables de suelo y manejo como la fracción de limo y de arena y la K_{sat0} . El primer y cuarto cuadrante de la Fig. 4, mostraría los individuos con valores más altos de LSF y menor H y donde el $\%$ arcilla son reducidos. En relación al segundo eje principal, el primer y segundo cuadrante presentan los puntos de depósito donde el suelo es más arenoso y las K_{sat} son más altas, y donde el contenido en $M.O.$ y en limo son mínimos.

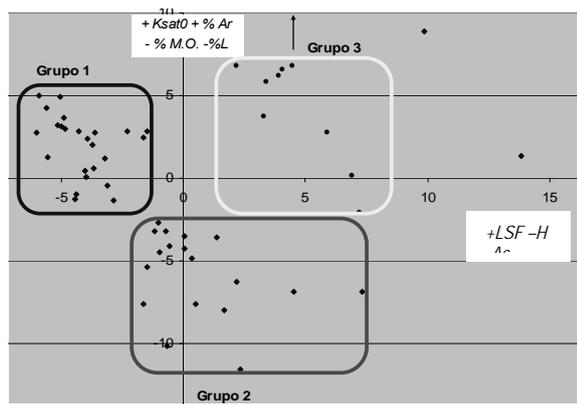


Fig. 4. Distribución de los puntos de erosión sobre los ejes principales.

En el AC, se consideraron también seis zonas o posibles grupos según criterios visuales y de cota en la cuenca de estudio. Sin embargo, se seleccionó la solución para 4 grupos ya que el aumento de agrupaciones significaba la aparición de individuos sueltos que no suministraban información nueva. Así, el grupo 1 correspondería a puntos con LSF bajos, situados en cabecera o en cotas altas, donde la K_{sat0} es elevada y el lavado y la aireación han reducido el contenido de $M.O.$ En relación a la textura, se trata de un área donde el $\%arcilla$ y $\%arena$ es mayor, en detrimento de $\%limos$. Este grupo se sitúa en la ladera S, próximo a cabecera, en el área donde las labores tienen el mayor impacto debido a la ausencia de elementos gruesos que dificultan la eficiencia de las mismas y donde se favorece la infiltración superficial. En el grupo 2, la K_{sat0} se ha reducido, sin embargo el LSF se ha incrementado junto con el contenido de $M.O.$ y las fracciones de $arcilla$ y $limo$. El papel del LSF y la mejora de la estructura pueden sustituir el papel de la conductividad como responsable del depósito. Este grupo se distribuye por toda la cuenca entre las curvas de nivel de 770 y 785 m. Los Grupos 3 y 4, son zonas donde coinciden especialmente los valores más elevados de LSF (zonas más bajas de la subcuenca) y K_{sat0} . Se trata de los enclaves más arenosos y con menor contenido de $arcilla$ y $limo$. Este grupo es el que presenta las características más evidentes para que se produzca el depósito, especialmente porque algunos de ellos forman parte del arroyo.

4.- Conclusiones.

Las áreas con mayor densidad de puntos de erosión, de acuerdo al análisis local de las variaciones de cota en una malla de 600 puntos de control, presentan dentro de la microcuenca de estudio, mayores valores A , LSF , β y Dap y menor K_{sat0} . Se han diferenciado distintos patrones de comportamiento según la zona donde se combinaban con distintos grados las variables topográficas tales como A y β y edafológicas K_{sat0} , K_{sat10} y $\%CaCO_3$.

En el depósito, por encima de los factores topográficos, la K_{sat0} tiene un papel primordial ya que los puntos de

recepción tienen una alta densidad en las áreas con los valores más altos. A medida que las condiciones de infiltración empeoran, la acumulación de flujo a lo largo de la ladera expresado como LSF cobra protagonismo, y los sedimentos pueden arrastrarse hasta zonas donde se reduce la aceleración (perfiles cóncavos) o hasta el arroyo donde gran parte de los sedimentos se acumulan.

El papel de la K_{sat} en ambos fenómenos, como propiedad del suelo en la que el tipo de manejo puede inducir variaciones debe considerarse a la hora de planificar ambientalmente las operaciones agrícolas sobre áreas susceptibles de erosión, especialmente en zonas donde la pendiente no es condicionante.

Finalmente, en la distribución de erosión y depósito hay que considerar la dependencia de los procesos de infiltración y generación de escorrentía con las características climatológicas anuales. La respuesta hidrológica de los suelos en el área mediterránea no se desarrolla de una manera uniforme en el espacio ni en tiempo sino que las laderas se convierten en mosaicos de áreas fuente y áreas sumidero (Calvo-Cases, 2003), de acuerdo a las características de la lluvia, el estado del suelo y los caminos de flujo. Por consiguiente, es necesario el estudio bajo diferentes condiciones climatológicas, donde se evalúen distintas respuestas y su distribución de modo que se amplíe el conocimiento sobre los rasgos más importantes que caracterizan los fenómenos de erosión y depósito en olivar.

Bibliografía.

- Calvo-Cases, A., C. Boix-Fayos y A.C. Imenson, 2003. *Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain*. *Geomorphology* 50, 269-291
- Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía, 2003. *El olivar andaluz*. Servicio de Publicaciones, Sevilla.
- E.S.R.I, 2000. *ArcView GIS*. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redland (Estados Unidos).
- García, F., 1997. *Topografía abreviada*. Eds. Mundi-Prensa, Madrid.
- Haigh, M.J., 1977. *The use of erosion pins in the study of slope evolution*. *Br. Geomorph. Res. Group Tec. Bull.* 29, 31-32.
- Higgitt, D.L., J. Warbuton, 1999. *Applications of differential GPS in uply fluvial geomorphology*. *Geomorphology*, 29, 121-134.
- Laguna, A., 1989. *Tesis no publicada: Análisis cuantitativo de la erosión del suelo*. Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Malinowki, E. R., 1991. *Factor analysis in Chemistry*, 2ª Ed. John Wiley, New York.
- Malet, J.P., O. Maquaire y E. Calais, 2002. *The use of global positioning system techniques for continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes de Haute Provence, France)*. *Geomorphology* 43, 33-54
- Philip, J.R. 1993. *Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter*. *Water Resour. Res.* 29: 3763-3768
- Polo, M.J., P. Lafuente y J.V. Giráldez, 2003. *Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de olivar y su influencia en el balance hidrológico global*. En: J. Álvarez-Benedi y P. Marinero (Eds.) *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* Vol. VI. pp 209-213.
- Sarre, R.D., 1984. *A subsurface baseplate technique for monitoring small-scale changes in surface levels*. *Br. Geomorph. Res. Group Tec. Bull.* 33, 27-32.
- Timm, N.H. 2002. *Applied Multivariate Analysis*. Springer-Verlag New York Inc., Secaucus NJ, USA.
- Wesemael, B., X. Rambaud, J. Poesen, M. Muligan, E. Cameraat y A. Stevens, 2006. *Spatial patterns of land degradation and their impacts on the water balance of rainfed tree crops: a case study in South East Spain*

- Geoderma, 133, 43-56.
- Wilson, J.P. y J.C. Gallant, 2000. *Digital Terrain Analysis*. En: John P. Wilson y John C. Gallant eds. *Terrain Analysis: Principles y Applications*, New York: John Wiley y Sons, 1-27.
- Wu, Y., y H. Cheng, 2005. *Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system*. 2005. *Catena*, 63, 154-166.