



## EFECTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LA LLUVIA SOBRE LA DINÁMICA DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y EL ENCOSTRAMIENTO EN UN SUELO ARCILLOSO SIN VEGETACIÓN.

*Rainfall kinematics energy effect on physical properties dynamics and crusting of a clayey bare soil.*

D. Regüés <sup>(1)</sup> y D. Torri <sup>(2)</sup>

(1) Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera" (CSIC). C/ Lluís Solè i Sabarís s/n. 08028 Barcelona.  
e-mail: dregues@ija.csic.es

(2) Istituto per la Genesi ed Ecologia del Suolo (CNR). Piazzalle delle Cascine 15, 50144 Florencia (Italia).

**Resumen:** El abandono de cultivos causa en ocasiones un deterioro progresivo del suelo. El contexto climático Mediterráneo, por su régimen estacional de precipitaciones, favorece el encostramiento en suelos arcillosos descubiertos durante ciertas tormentas. El objetivo de este trabajo es diferenciar que factores distinguen dichas tormentas críticas, por medio de realizar series de simulaciones de lluvia en campo y laboratorio, combinando diferentes características de la lluvia y condiciones superficiales de un suelo arcilloso. La información hidrológica y de la dinámica de la rugosidad superficial, asimilada al coeficiente de rugosidad hidráulica de Manning en dos trabajos, permitió relacionar la agresividad de la escorrentía con las condiciones experimentales. Los resultados indican un incremento de erosividad de la escorrentía relacionado con el descenso de la rugosidad superficial y el encostramiento del suelo. Esto puede justificar la aparición de erosión intensa en suelos arcillosos descubiertos durante determinadas tormentas, capaces de generar pequeños barrancos y modelar cárcavas.

**Palabras clave:** Energía de lluvia, rugosidad hidráulica, escorrentía, erosión intensa, encostramiento, cárcavas.

**Abstract:** Field abandonment on the rural landscape some times is associated to progressive soil degradation. The Mediterranean climatic setting, because of its irregular precipitation regime, makes de clayey bare soil prone to the crusting within certain storms. Nevertheless, it has not been clearly defined yet what conditions differentiates the said critical storms; this represents the main objective of this work. For this reason some rainfall simulation sets were performed in the field and laboratory, over a clayey bare soil, combining different rainfall characteristics and surface soil conditions. The measurements of hydrological responses as well as surface random roughness dynamics, that has been linked to Manning's hydraulic roughness coefficient through two sets of relationships proposed in the studies of Gilley and Finkner (1991) and Mwendera and Feyen (1992), allowed to estimate the runoff erosivity or drag force in relationships with the experimental soil physical conditions and rainfall characteristics. The results point to a large increase in drag, hence in erosive power of overland flow, reaching values of between 2 and 6 times, within storms mainly associated to dry soil conditions, which are prone to the surface random roughness reduction and crusting development. These results can justify intense erosion and ephemeral gullies occurrence in clayey bare soils within-storm, as well as bring some support to the knowledge about progressive badland formation and development.

**Key words:** Rainfall energy, hydraulic roughness, runoff, intense erosion, crusting, badlands.



Regüés, D., & Torri, D. Rainfall kinematics energy effect on physical properties dynamics and crusting of a clayey bare soil. *Rev. C. & G.*, 16 (1-4), 57-71.

## 1. Introducción.

El creciente abandono de campos de cultivo en el ámbito rural puede llevar, en determinadas circunstancias, al deterioro progresivo del medio natural, especialmente porque dicho abandono suele estar asociado a los suelos con mayor riesgo de erosión, por estar situados en pendientes elevadas o haber sufrido un empobrecimiento de su fertilidad. En cultivos aterrazados o en bajas pendientes, más favorables para la conservación del suelo, el mayor riesgo asociado al abandono de cultivos se deriva de la creación de canales de drenaje artificiales en los márgenes de los campos. En estas terrazas y durante eventos de precipitación importantes el volumen de la escorrentía puede superar su capacidad de evacuación, causando el consiguiente desbordamiento y la readaptación progresiva del flujo de escorrentía hacia las vías naturales de drenaje, lo cual puede llegar a producir la activación de procesos de erosión por incisión sobre la superficie de las terrazas (Gallart *et al.*, 1994).

Asimismo, las técnicas modernas de cultivo causan en algunos casos una degradación progresiva del suelo e implícitamente incrementan el riesgo de erosión. Algunos ejemplos de ello son: utilización de maquinaria pesada, cultivos sin laboreo o laboreo mínimo, sobreexplotación, extensificación de los campos y desaparición de terrazas, en este último caso con el consiguiente incremento de longitud de las pendientes y de la susceptibilidad a la erosión (Torri *et al.*, 1987). Sin embargo, cuando existe una relación entre la degradación del suelo y la aplicación de alguna de dichas prácticas, el agricultor suele resolver los problemas derivados mediante el arado de las zonas afectadas, eliminando con ello los primeros indicios de formación de regueros profundos y evitando su desarrollo, además de eliminar el encostramiento superficial en aquellas zonas donde se está produciendo.

En cualquier caso, la combinación entre una mala gestión agrícola del suelo y su posterior abandono puede causar un proceso degradativo desde un punto de vista físico, que se iniciaría con su encostramiento y la posterior activación de procesos de erosión acelerada del suelo, que llevan a su pérdida gradual. También hay que considerar que toda esta secuencia de cambios lleva asociada

la reducción del potencial de regeneración natural o revegetación. Así, como última consecuencia, hay que considerar que esta cadena de acontecimientos puede llevar a un deterioro del medio natural hasta alcanzar niveles críticos, que pueden ser irreversibles.

Así, si consideramos todas estas observaciones dentro del marco de la Europa Mediterránea, donde la erosión actúa como un proceso altamente compulsivo como consecuencia de un clima definido por una distribución muy irregular de las precipitaciones (Romero *et al.*, 1986; Edwards y Owens, 1991), entonces el efecto que producen las alteraciones causadas por vía antrópica puede aumentar dicha compulsividad y llevar a situaciones extremadamente susceptibles a la inestabilidad, o a una situación de transición de equilibrio dinámico en la que se producen continuas modificaciones geomorfológicas y ecológicas.

### 1.1. Procesos y mecanismos de degradación del suelo.

El conocimiento de las condiciones físicas que preceden a la degradación de un suelo, así como los procesos que la originan, constituye el primer paso hacia su prevención. En 1971 Rauschkolb propuso un listado de procesos y agentes que activan los mecanismos de degradación del suelo: erosión, salinización, alcalinización, residuos orgánicos, pesticidas, radioactividad, metales pesados, fertilizantes y detergentes.

Es evidente que la mayoría de agentes y mecanismos expuestos por Rauchkolb tienen un origen claramente antrópico, por lo que se puede considerar la mala gestión humana como el principal agente degradante, especialmente si tenemos en cuenta que las modificaciones del medio natural causadas por acción humana son prácticamente instantáneas, en concepto de tiempo geológico, y por ello son asimilables a los cambios inducidos por procesos geomorfológicos de tipo catastrófico.

Como consecuencia de dichas observaciones se definió el concepto de erosión acelerada o antrópica, que difiere de la erosión geológica o natural en que se manifiesta cuando un ecosistema pierde la capacidad de autorregulación y entra en una fase de transición dinámica hacia un nuevo equilibrio (Ortíz Silla, 1990).

Por otro lado, existen indicadores físicos cuantificables que informan sobre el estado de degradación de un suelo: compactación, disminución de la permeabilidad, mala aireación y degradación de la estructura. Todos ellos presentan como denominador común una reducción de la porosidad; que es una de las principales consecuencias relacionadas con el encostramiento o sellado superficial del suelo.

### *1.2. Mecanismos físicos de encostramiento.*

El principal proceso responsable del encostramiento es el impacto de las gotas de lluvia o “rain-drop impact” sobre la superficie del suelo. Este impacto de las gotas de lluvia produce una serie de modificaciones que causan la formación de una capa compacta y poco permeable, que en un principio se denominó sellado superficial (Mc Intyre, 1958a,b; Farres, 1978). Posteriormente se observó que el impacto de gotas de lluvia actúa principalmente en zonas de “interrill”, y como consecuencia de los procesos relacionados con ello se genera la denominada costra estructural (Chen *et al.*, 1980) o posteriormente también definida como “disruptional seal” o sellado de alteración (Arshad y Mermut, 1988; Slattery y Bryan, 1992). Este último término se puede considerar el más adecuado, dado que el impacto de gotas de lluvia causa básicamente una destrucción física de los agregados superficiales y la redistribución de las partículas disgregadas, rellenando huecos y poros.

Por otro lado, se han descrito dos tipos de sellado o encostramiento relacionados con la escorrentía. El denominado sellado deposicional (Evans y Buol, 1968), posteriormente definido como costra sedimentacional (Arshad y Mermut, 1988) o más recientemente sellado sedimentacional (Slattery y Bryan, 1994), este tipo de encostramiento o sellado se asocia básicamente a zonas sometidas a un flujo de escorrentía suficientemente intenso para causar la movilización y reordenación superficial de las partículas. Mientras el denominado “skin seal” (Mc Intyre, 1958a,b), posteriormente costra laminar (Arshad y Mermut, 1988) y finalmente “afterflow seal” (Slattery y Bryan, 1994), se produce a partir de la deposición de las partículas más finas movilizadas por el flujo de escorrentía, constituyendo una capa muy delgada e impermeable, por tanto este

proceso está principalmente relacionado con el flujo de recesión de la escorrentía tras el cese de la lluvia. También se ha observado que en suelos arcillosos, especialmente si presentan porcentajes significativos de esmectitas, los procesos de humectación-deseccación están más relacionados con el encostramiento que con la meteorización física (Regüés, 1995; Regüés *et al.* 2000) como consecuencia de la retracción que experimentan las arcillas al deshidratarse (especialmente las esmectitas) se produce una reordenación estructural, una disminución de la porosidad y el consiguiente efecto de compactación de la matriz arcillosa que afecta a todas las partículas enclavadas en ella (Pardini *et al.*, 1996).

Todos éstos procesos ponen de manifiesto el importante papel de la cobertera vegetal, especialmente las de tipo herbáceo y arbustivo, como agente inhibidor del encostramiento (Langbein y Schumm, 1958) por dos motivos:

- (1) Al interceptar las gotas de lluvia altera la distribución de tamaños y reduce su velocidad, lo que disipa su energía de impacto (Brandt y Thornes, 1987).
- (2) Proporciona una rugosidad superficial, a la vez que ayuda a preservar la existente en el suelo, lo cual reduce la velocidad de la escorrentía superficial y favorece la infiltración (Francis y Thornes, 1990).

Así, el encostramiento introduce una serie de modificaciones de la estructura física del suelo que afectan implícitamente a sus propiedades hídricas. En primer lugar, reduce la infiltración (Mc Intyre, 1958a) con lo que se trunca la transferencia vertical de nutrientes y otros componentes desde los horizontes superiores. En segundo lugar, causa una disminución de la rugosidad hidráulica, lo cual proporciona condiciones óptimas para una generación de escorrentía superficial más intensa y veloz (Larsen, 1964; Mwendera y Feyen, 1993). Y por último, limita la capacidad de germinación y crecimiento de las plántulas, por dos motivos: la dureza de la costra y una menor disponibilidad de agua subsuperficial.

Todas estas consecuencias implican una mayor agresividad erosiva e intensidad de la escorrentía y, en consecuencia, pueden ser indicativos del inicio de la erosión acelerada o intensa.

## 2. Exposición del problema y objetivos.

Hemos observado que el encostramiento es el primer indicador predictivo de activación de la erosión intensa, la cual está estrechamente relacionada a la dinámica de morfologías acarcavadas, por lo que su activación podría ser una de las causas que dan origen a dichos paisajes.

Sin embargo, todavía no está claro si el inicio de la formación de barrancos y cárcavas debe atribuirse a la acción de una sola tormenta, una serie de tormentas, un período de precipitaciones prolongadas o a la alternancia entre tormentas y períodos de sequía (Torri *et al.*, 2000). Aunque sabemos que durante las grandes tormentas algunas propiedades del suelo cambian rápidamente (Wainwright, 1996) y que existen las llamadas tormentas “críticas”, caracterizadas por su capacidad de socavar la superficie del suelo con formas que tienden a crecer y profundizar en eventos sucesivos. Por otro lado, algunos trabajos indican la existencia de una relación histórica entre la mala gestión del terreno y la progresiva aparición de cárcavas (Calzolari *et al.*, 1997).

Las consideraciones anteriores apuntan hacia la existencia de unos umbrales, referidos a las condiciones del suelo y de la precipitación, que determinan las consecuencias hidro-sedimentológicas asociadas a una tormenta. El objetivo de este trabajo está dirigido a obtener información referente a las situaciones susceptibles al encostramiento de suelos arcillosos, que preceden la aparición de erosión intensa o acelerada del suelo y que en último término puede derivar en la formación de una cárcava.

## 3. Materiales y métodos.

### 3.1. Zona de estudio.

La experimentación se desarrolló inicialmente en la estación experimental de Santa Elisabetta (Vicarello, Volterra, Italia). El clima de la zona ha sido definido como Mediterráneo sub-húmedo (Barazzuoli *et al.* 1993), con una precipitación media anual de 678 mm (1954-1996) que presenta dos máximos anuales, el principal en Otoño y un

secundario en Primavera (Bazzoffi y Pellegrini, 1992). La temperatura media anual es de 12,7°C, con mínimas anuales de hasta -10°C y máximas que alcanzan los 40°C.

La estación experimental cuenta con ocho macro parcelas experimentales (15 x 75 m) equipadas mediante sistemas para la medición en continuo de la escorrentía y captación de muestras (Bazzoffi, 1994). Dos de dichas parcelas se mantienen sin vegetación, aunque en ellas el suelo es arado regularmente.

El suelo es de tipo Vertic Xerorthent y está desarrollado a partir de un substrato compuesto principalmente por margas marinas del Plioceno. La dinámica superficial del suelo está regulada por procesos de contracción e hinchamiento, lo que causa importantes diferencias estacionales en las propiedades hídricas superficiales. Así, en invierno se han medido coeficientes máximos de escorrentía muy elevados (0,85), mientras en verano la formación de grandes grietas superficiales causa una elevada permeabilidad superficial, por lo que los coeficientes de escorrentía suelen aproximarse a cero, excepto cuando la intensidad de la precipitación es de una magnitud suficiente para producir escorrentía superficial por mecanismos de tipo Hortoniano.

La elección de esta zona de estudio estuvo supeditada a la susceptibilidad que presenta el suelo a la acción de la erosión intensa. Esto pudo ser constatado en mayo de 1994, cuando tras una tormenta que descargó cerca de 80 mm en poco más de 28 horas aparecieron grandes y profundos regueros sobre las parcelas experimentales sin vegetación, estimándose en ambas una tasa de erosión de unos 12.600 Mg km<sup>-2</sup>, más de 10 veces superior a las tasas medias anuales medidas en dicho ambiente (Bazzoffi y Pellegrini, 1992).

### 3.2. Metodología.

Si consideramos que los procesos de erosión hídrica en laderas están condicionados por dos factores dinámicos: las propiedades superficiales del suelo y las características de la lluvia, su estudio requiere una buena caracterización tanto de las condiciones físicas del suelo como de la precipitación. Evidentemente esto implica la necesidad de monitorizar algunas de las variables relacionadas con la acción de la erosión, lo cual difícilmente

puede lograrse en condiciones naturales. Dichas dificultades pueden ser parcialmente subsanadas mediante la simulación de procesos, en este caso se utilizó la simulación de lluvia.

Es importante reseñar que la información que proporciona esta técnica experimental no puede ser analizada desde un punto de vista cuantitativo, cuanto menos para obtener tasas absolutas de erosión o caudales de escorrentía, sin embargo es de gran utilidad para definir algunas de las relaciones cualitativas que facilitan la interpretación y descripción en el estudio de procesos complejos, lo cual permite definir modelos sencillos. En este caso a partir de las simulaciones de lluvia se pueden obtener algunas relaciones causa-efecto entre las características de las precipitaciones y la dinámica de las propiedades del suelo.

Los experimentos de simulación de lluvia se realizaron con un simulador de características similares al de Panini *et al.* (1993), para lo que fueron instaladas 6 parcelas de 0,75 m<sup>2</sup>. En cada parcela se realizó una serie de tres simulaciones, pero con diferentes características en cada serie de ensayos, como resultado de combinar tres variables: dos rangos de intensidad de lluvia, tres pendientes y cuatro rangos de energía de impacto de la lluvia (Tabla 1).

Las condiciones del terreno al inicio de cada serie experimental fueron similares: suelo seco, arado, fresado (homogeneizado de la superficie mediante triturado de los terrones grandes) y sin vegetación. Todas las experiencias se prolongaron hasta obtener medidas constantes de escorrentía,

Tabla 1. Características de las simulaciones de campo. Los valores marcados con un asterisco indican que la energía de lluvia fue disipada mediante una red de 1 mm de luz situada a unos 25 cm sobre las parcelas.

Table 1. Field rainfall simulation characteristics. The values highlighted with asterisks indicate that rainfall energy was dissipated with a net of 1 mm located about 25 cm over the plot.

Parcela	pendiente (%)	Intens.lluvia mm h-1	E.cinética J kg-1
P11	18.6	97	21
P12	20.1	55	16
P21	11.4	97	3.2*
P22	13.9	97	21
P31	34.5	55	2.9*
P32	34.5	97	21

por lo que las energías acumuladas fueron diferentes en cada ensayo. El intervalo entre las simulaciones de cada serie fue de 4 a 5 días que, dadas las altas temperaturas e insolación propias del verano, garantizaron un elevado desecado del suelo, y de esta manera las condiciones hídricas superficiales previas a cada ensayo fueron comparables.

Por otro lado, antes y después de cada experiencia de simulación se realizaron medidas de: humedad del suelo (muestreo y TDR), densidad aparente (muestreo con cilindros de 30 y 100 cm<sup>3</sup>), rugosidad superficial (perfilómetro manual) y resistencia o dureza de la costra (penetrómetro portátil modelos ST 308 y SHIMPO). Además durante los ensayos se tomaron muestras a intervalos regulares de tiempo para estimar la escorrentía y concentración de sedimentos.

Un primer análisis de los resultados indicó que se había producido una evolución muy rápida de la costra, relacionada con un rápido descenso de la rugosidad superficial (Figura 1) que fue evaluado mediante el índice RR (“random roughness” o rugosidad aleatoria) de Onstad (1984). Esto fue atribuido a una duración excesiva de los ensayos. Como consecuencia se obtuvo una información incompleta referida a la relación entre cantidad de precipitación y descenso de la rugosidad superficial, ya que en ningún caso se midieron valores de RR inferiores a 0,6 cm, por ello se planteó la nece-

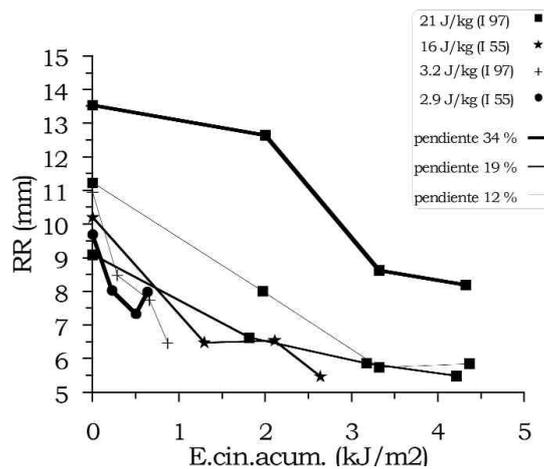


Figura 1. Evolución del índice de rugosidad aleatoria (RR) en relación con la energía cinética de lluvia durante los ensayos de campo.

Figure 1. Random roughness (RR) evolution in relationship with rainfall kinematics energy during field experiments.

sidad de programar nuevas series de experiencias de simulación de lluvia en el laboratorio, planificadas de manera que proporcionasen la información necesaria para complementar los vacíos existentes.

Así, se realizaron tres series de 11, 5 y 6 ensayos utilizando un simulador de lluvia de laboratorio muy similar al de campo, aunque las dimensiones de las parcelas eran ligeramente inferiores (0,4 m<sup>2</sup> de superficie y 10 cm de profundidad). En este caso se mantuvieron constantes tanto la energía cinética e intensidad de precipitación (EC: 16 J kg<sup>-1</sup>, I: 55 mm.h<sup>-1</sup>), como la pendiente de las parcelas (20 %), pero se combinaron otras variables (Tabla 2): el tiempo de precipitación, el contenido de humedad del suelo y el grado de rugosidad superficial, este último fue conseguido a través de una selección textural de los agregados mediante tamizados del suelo seco a distintos intervalos de luz.

En las series de ensayos realizadas sobre el suelo húmedo la parcela fue acondicionada hídricamente antes de realizar la primera simulación, para lo que se utilizó un pulverizador atomizador de agua, de esta manera se logró el efecto deseado sin causar alteraciones significativas sobre la estructura superficial, como es lógico dicho procedimiento no fue necesario en las pruebas sucesivas. Por otro lado, para facilitar el desecado superficial entre experiencias, durante las series de simulaciones realizadas sobre el suelo seco, fueron utilizadas lámparas de radiación infrarroja situadas a 1 metro

sobre la parcela y el complemento de un ventilador, evidentemente este procedimiento fue aplicado previamente a la realización de cada ensayo, con excepción del primero de la serie SL2 (Tabla 2).

Durante todos los ensayos de laboratorio también se realizaron mediciones de las condiciones físicas del suelo previas y posteriores, exceptuando las relativas a la densidad aparente que requieren una alteración demasiado importante de la superficie. Las variables medidas fueron: humedad superficial, resistencia o dureza de la costra y rugosidad superficial. Es importante destacar que en este caso las mediciones de rugosidad superficial fueron realizadas mediante un perfilómetro láser sin contacto, similar al de Pini *et al.* (1991), lo cual no solamente garantizó una mayor calidad de la información, dada su mayor precisión con respecto a los perfilómetros manuales, sino que también permitió la medición de dicha variable cuando el suelo muestra un contenido hídrico elevado sin causar alteraciones en la superficie de las parcelas experimentales.

### 3.2.1. Análisis de la rugosidad superficial.

La rugosidad superficial fue considerada como el principal indicador del grado de encostramiento o sellado superficial, asumiendo que los valores bajos de rugosidad corresponden generalmente a suelos encostrados, ya que esta disminución de la

Tabla 2. Características principales de las 3 series de simulaciones de lluvia realizadas en el laboratorio. La intensidad de lluvia (55 mm.h<sup>-1</sup>) y la pendiente (15 %) se mantuvieron constantes durante todos los ensayos.

Table 2. Main characteristics of three laboratory rainfall simulation sets. Rainfall intensity (55 mm.h<sup>-1</sup>) and slope (15 %) were constants during all the experiences.

SL1 (agregados 0,5-31,5 mm)			SL2 (agregados 0,5-31,5mm)			SL3 (agregados 0,5-8mm)		
Número simul.	Duración (min)	Estado suelo	Número simul.	Duración (min)	Estado suelo	Número simul.	Duración (min)	Estado suelo
1	20	húmedo	1	7,5	seco	1	7,5	húmedo
2	20	húmedo	2	24	seco	2	11	húmedo
3	20,5	húmedo	3	20	seco	3	11	húmedo
4	20	húmedo	4	20	seco	4	32	húmedo
5	20	húmedo	5	32,5	seco	5	11	seco
6	108	húmedo				6	25,25	seco
7	20,17	seco						
8	20	seco						
9	20,08	seco						
10	20	seco						
11	48	seco						

rugosidad implica una serie de transformaciones que afectan a las propiedades mecánicas e hidráulicas de la superficie del suelo, dado que condiciona la intensidad y velocidad de la escorrentía, especialmente para flujos con reducido radio hidráulico. Sin embargo, para que esta asunción sea factible es necesario analizar la rugosidad del suelo mediante un índice que describa la rugosidad superficial en relación con un coeficiente de rugosidad hidráulica. En este sentido, el índice de rugosidad aleatoria (RR) de Onstad (1984) ha sido asimilado al coeficiente de rugosidad hidráulica  $n$  de Manning en los trabajos de Gilley & Finkner (1991) o Mwendera & Feyen (1992), por medio de las siguientes ecuaciones:

$$(1) \quad n = \frac{0,172RR^{0,742}}{Re^{0,282}}$$

$$(2) \quad n = 0,0056e^{1,361RR}$$

La diferencia entre ambas relaciones está en que la ecuación de Gilley & Finkner (1) tiene en cuenta la dinámica del flujo por medio del número de Reynolds ( $Re$ ), y para cada valor de RR puede generar una infinidad de valores de  $n$  (rugosidad hidráulica), mientras la ecuación de Mwendera & Feyen (2) no considera las características del flujo por lo que para cada valor de RR proporciona solamente un valor de  $n$ . Esto hace suponer más adecuada la aproximación de Gilley & Finkner que la de Mwendera & Feyen.

En cualquier caso ambas ecuaciones predicen un descenso de la rugosidad hidráulica proporcional a la disminución de la RR, por lo que pueden ser aplicadas para evaluar cambios relativos en la agresividad del flujo de escorrentía, y de esta manera proporcionan un criterio para identificar el inicio de la erosión intensa o acelerada. Esto significa que los cambios que muestran las propiedades físicas superficiales del suelo durante su encostramiento repercuten directamente sobre sus propiedades hídras y respuesta hidrológica, y por tanto un análisis de la evolución de la rugosidad superficial en relación con la precipitación puede ser indicativo de su susceptibilidad al encostramiento.

Por otro lado, se puede obtener una relación de proporcionalidad entre la velocidad del flujo y el

coeficiente de rugosidad hidráulica para unas condiciones determinadas. Así si tomamos la definición que propone Chow (1959) de la  $n$  de Manning (3) y suponemos que el caudal ( $Q$ ) y la pendiente media ( $S$ ) se mantienen constantes, entonces obtenemos que velocidad del flujo ( $V$ ) es inversamente proporcional al coeficiente de rugosidad hidráulico de Manning ( $n$ ), mediante la siguiente relación:

$$(3) \quad V = \frac{R^{2/3}S^{1/3}}{n} = \frac{1}{n} \frac{nQ}{S^{1/2}} S^{1/2}$$

para  $Q$  y  $S$  constantes obtenemos que  $V = \frac{1}{n^{3/5}}$

( $R$ : radio hidráulico)

Por otro lado, también sabemos que existe una relación de proporcionalidad entre la fuerza de arrastre de la escorrentía o “drag” ( $D$ ) y el cuadrado de la velocidad del flujo ( $V^2$ ). Por tanto si consideramos las mencionadas relaciones existentes entre  $V$ ,  $D$  y  $n$  podemos establecer unos factores de proporcionalidad que relacionan dichos factores entre sí, para lo cual hay que considerar dos posibles respuestas de un mismo suelo frente a una tormenta: que las propiedades físicas superficiales se mantengan constantes (subíndice  $c$ ) y que dichas propiedades sean variables (subíndice  $v$ ). En consecuencia se obtiene la siguiente relación:

$$(4) \quad \frac{D_v}{D_c} = \frac{V_v^2}{V_c^2} = \frac{n_c^{6/5}}{n_v^{6/5}}$$

Esta relación indica que para calcular la velocidad o la agresividad instantáneas del flujo de escorrentía es necesario disponer de los índices de rugosidad hidráulica del suelo para cada caso, lo cual requiere una función que relacione la evolución que experimenta la rugosidad superficial con respecto a las cantidades totales de precipitación o a su energía. Por tanto si disponemos de dicha información podemos establecer una relación de proporcionalidad entre el “drag” ( $D$ ) para un suelo que no experimenta cambios o cuando se está encostrando, como resultado de ello se puede obtener una idea de la magnitud con que se incrementará la susceptibilidad a la erosión si dicho suelo se degrada o encostra.

#### 4 Resultados y discusión.

En las primeras experiencias de cada serie de simulaciones de laboratorio no se generó escorrentía superficial, como consecuencia de la corta duración de los ensayos. Este procedimiento favoreció que se produjera un descenso lento de la rugosidad superficial (Figura 2) y de esta manera se complementó la información generada durante las simulaciones de campo, por lo que se pudo disponer de un amplio rango de valores del índice de rugosidad aleatoria (RR) en relación con cantidades y energías de precipitación, así como con respecto a las diferentes condiciones físicas superficiales tomadas en cuenta.

En este sentido, es importante destacar las condiciones de humedad o sequedad superficial en que se produjo un mayor descenso de la rugosidad superficial y por consiguiente óptimas para el encostramiento del suelo. Esto pudo ser observado específicamente durante los ensayos de laboratorio, ya que fue una de las variables consideradas inicialmente. Así cuando el suelo estaba húmedo (Figuras 2a y 2c) no se produjeron variaciones significativas del índice RR, sin embargo durante las experiencias realizadas sobre el suelo seco la RR experimentó un rápido descenso (Figuras 2a y 2b). De esta observación se pueden extraer las siguientes explicaciones o conclusiones:

1. El suelo húmedo parece ser más resistente al encostramiento que el seco ya que experimenta menores variaciones de su rugosidad superficial por el impacto de las gotas de lluvia. Por tanto, en ambientes semiáridos, donde generalmente llueve sobre suelos secos, el riesgo de producirse erosión por "splash" es superior.
2. En suelos húmedos el desfase temporal entre el rápido inicio del encharcamiento superficial y la generación de escorrentía continua es mayor que en suelos secos (Lavee *et al.*, 1998; Cerdà y Sarah, 2000) y por tanto las partículas movilizadas por salpicadura o "splash" no sufren un transporte eficaz vertiente abajo, hasta que el flujo de escorrentía superficial no es continuo en toda la superficie. En este mismo sentido algunos trabajos (Whipkey, 1965; Kirkby, 1978) destacan la importancia del flujo sub-

superficial en ambientes templados, lo cual puede relacionarse con una conservación de la estructura interna del suelo, por lo que la infiltración se mantiene durante más tiempo y por tanto el transporte de las partículas de sedimento erosionadas se produce en senti-

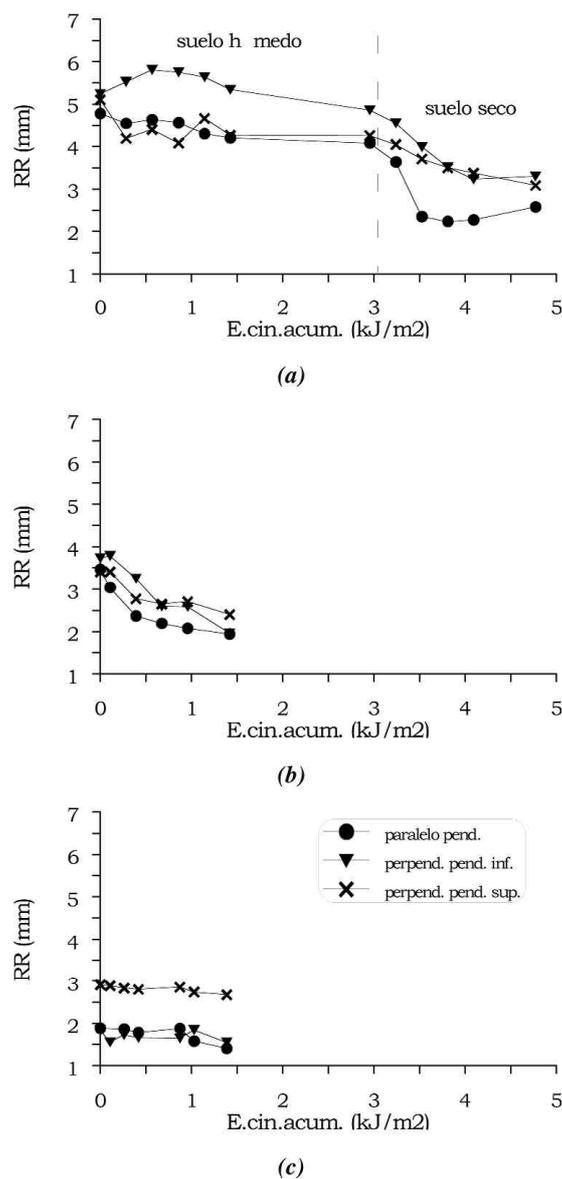


Figura 2. Evolución del índice de rugosidad aleatoria (RR) durante las series de experiencias de laboratorio. Las gráficas a, b y c corresponden a SL1, SL2 y SL3 respectivamente. Figure 2. Random roughness (RR) evolution during the laboratory experimental sets. Graphics a, b and c are from SL1, SL2 and SL3 respectively.

do vertical, al menos mientras no se produce el sellado superficial del suelo y se activa la escorrentía superficial.

3. Asimismo, se puede considerar que la discontinuidad en el flujo escorrentía causa temporalmente encharcamientos localizados, que protege la superficie al disipar parcialmente la energía de impacto de las gotas de lluvia, y por consiguiente dificulta la acción erosiva del citado proceso.

#### 4.1. Respuesta hidrológica.

Los valores estimados relativos a los coeficientes de escorrentía finales obtenidos en las experiencias realizadas en campo y laboratorio sobre el suelo inicialmente seco fueron relacionados con las cantidades de precipitación y sus energías cinéticas asociadas. Como resultado se obtuvo una mejor correlación entre la respuesta hidrológica y la energía cinética acumulada que con respecto a la lluvia acumulada (Figura 3). Así, el coeficiente de escorrentía final (CEF) se relaciona con la energía cinética acumulada (E) mediante las siguiente función exponencial:

$$(5) \text{ CEF} = 0,92 \cdot 1 - \exp \left( - \frac{E - 1,71}{0,12} \right), \text{ para } E \geq 0,171$$

(R= 0,956 y N= 18)

Por otro lado, si consideramos que la rugosidad superficial o hidráulica condiciona la intensidad y agresividad de la escorrentía, y que la intensidad de la escorrentía se relaciona bien con la energía cinética acumulada, entonces el descenso de RR debe depender más de la energía cinética de la lluvia que de la cantidad de precipitación, tal y como sugieren los trabajos de Dexter (1977) y Steichen (1984).

#### 4.2. Dinámica de las propiedades física.

En cuanto a la dinámica de las propiedades físicas superficiales, los valores de densidad aparente y humedad finales denotaron pocas variaciones entre experiencias y series de simulaciones, en el caso de la densidad aparente es probable que los errores derivados del método utilizado fuesen de un rango similar a la gran variabilidad causada por

la gran heterogeneidad superficial asociada a un campo arado, por este motivo los resultados obtenidos fueron poco coherentes. Como consecuencia de ello ninguna de dichas variables fue considerada en el análisis de los resultados que se expone en este trabajo.

Con respecto a las variaciones de dureza de la costra, diferenciando las de tipo estructural y deposicional, también demostraron mejor correlación lineal con la energía cinética acumulada que respecto a la precipitación acumulada (Figura 4). Estas relaciones fueron obtenidas mediante los datos de campo, ya que todas las experiencias de laboratorio fueron realizadas con una intensidad de lluvia constante, por lo que no demuestran ninguna

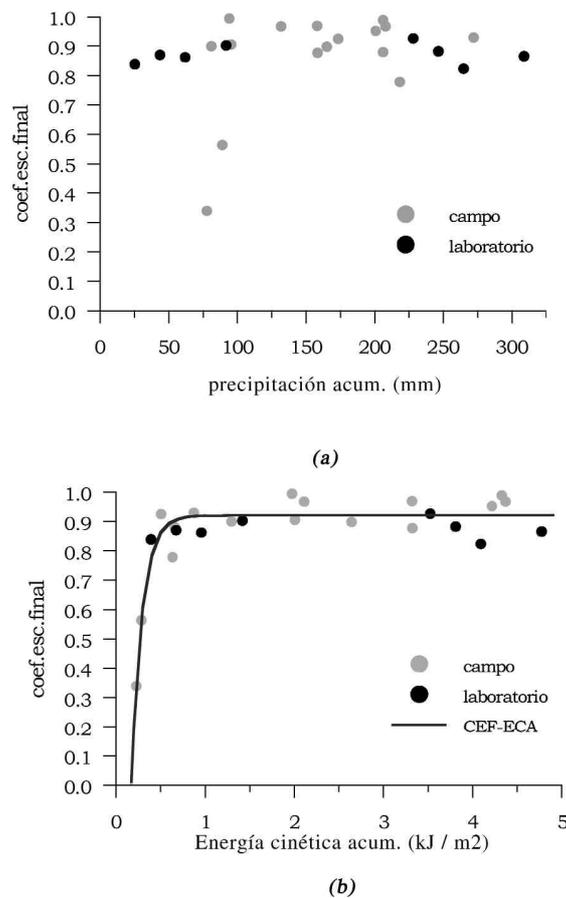


Figura 3. Coeficiente de escorrentía final (CEF) en relación con las cantidades acumuladas de precipitación (a) y energía cinética (b).

Figure 3. Final runoff coefficients (CEF) in relationship with cumulated amounts of rainfall (a) and kinematics energy (b).

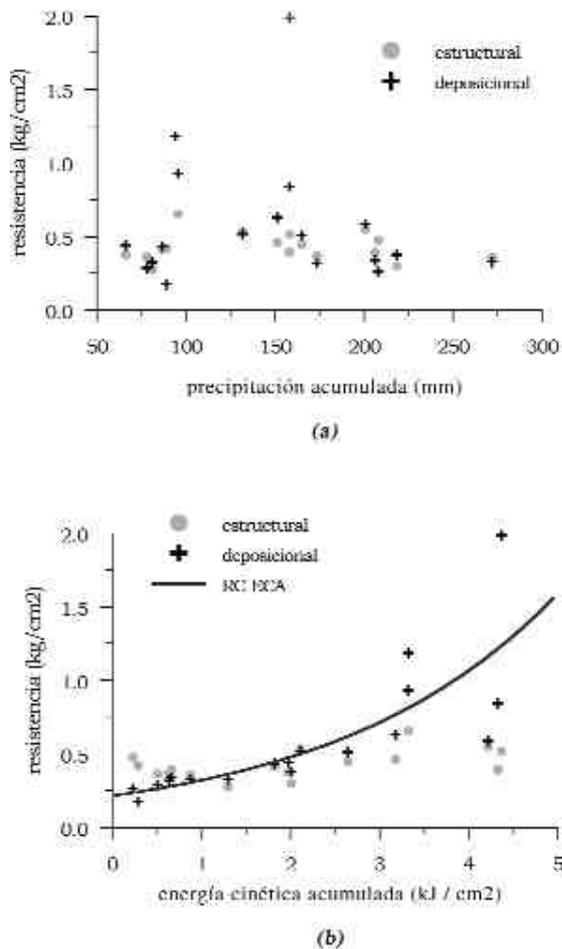


Figura 4. Dureza de las costras de alteración y deposicional en relación con la precipitación (a) y energía cinética (b) acumuladas.  
 Figure 4. Hardness of the structural and depositional crusts in relationship with rainfall (a) and kinematics energy (b) cumulated.

diferencia entre precipitación y energía cinética acumuladas.

Por lo que respecta a la evolución de ambos tipos de costra, parece ser que la resistencia de la costra deposicional (*RCD*) se incrementa siguiendo una clara tendencia de tipo exponencial (6) con respecto a la energía cinética acumulada (*E*). Por otro lado, la resistencia de la costra estructural no mostró cambios significativos con respecto a la energía cinética acumulada, lo cual queda evidenciado en la figura 4, donde los valores de resistencia de la costra presentan una disposición marcadamente rectilínea pero con una pendiente impercep-

tible, lo cual indica la invariabilidad de la citada propiedad con respecto al incremento de la energía cinética acumulada.

$$(6) \quad RCD = 0,21 \cdot 1,49^E$$

$$(R=0,78, N=18)$$

Estas observaciones ponen en evidencia que el desarrollo de la costra deposicional es una consecuencia directa del transporte de partículas derivado del “splash” acumulado en eventos sucesivos, de tal manera que su grosor se incrementa de forma progresiva a medida que se acumula energía de impacto. Por su parte, la costra estructural no puede evolucionar demasiado ya que su desarrollo está directamente relacionada con el efecto compactante asociado al impacto de las gotas de lluvia, por ello alcanza con una cierta rapidez una resistencia próxima al valor máximo posible, tras lo cual, y por un efecto de sucesivos impactos de gotas de lluvia, su evolución es muy lenta y solamente queda evidenciada mediante leves incrementos de su dureza.

Un aspecto que merece la pena destacar, relacionado con el incremento de resistencia en la costra deposicional, se refiere a la tendencia exponencial que muestra la dureza, en este caso alcanzando valores de hasta 8 veces superiores a los cuantificados inicialmente ó 4 veces con respecto a la costra estructural. Esto es de gran interés, ya que indica que se puede identificar el desarrollo de dicha costra con una rápida degradación del suelo. Esto es así porque a medida que se incrementa el grosor y dureza de la costra disminuye la posibilidad de germinación de las semillas. En este sentido se pueden encontrar dos causas: primero una fuerte reducción de la permeabilidad que condiciona la disponibilidad hídrica subsuperficial, y en segundo lugar la gran dureza que proporciona a la superficie imposibilita que las plántulas puedan germinar. Por consiguiente se podría decir que existe una estrecha relación entre la degradación del suelo y el desarrollo de la costra deposicional.

Una valoración general de los resultados obtenidos indica que el desarrollo de la costra depende más de las características de la lluvia que de su cuantía, lo cual es coherente con la importancia del

“splash” como principal proceso inductor del encostramiento, y confirmando por otro lado la importancia del desecado como proceso inductor del encostramiento.

4.3. Análisis de la agresividad de la escorrentía.

Por otro lado, la rugosidad superficial fue analizada mediante el cálculo del índice de rugosidad relativo *RRR* ó “random roughness ratio” ( $RR/RR_0$ ) que permite realizar un estudio más ecuánime de la dinámica superficial, ya que expresa las variaciones relativas del índice de rugosidad aleatoria (*RR*) con respecto a la rugosidad inicial ( $RR_0$ ), lo que implica que dicho índice tiene más en cuenta la evolución de la rugosidad que su valor absoluto. Esto permite un análisis integrado de la dinámica que experimenta un mismo suelo partiendo de diferentes rugosidades iniciales.

Así, la *RRR* fue analizada con respecto a las cantidades acumuladas de precipitación y energía cinética (Figura 5) y los resultados evidenciaron que la dinámica de dicho indicador también está mejor relacionada con la energía cinética acumulada de las precipitaciones (*E*) estando expresada dicha relación mediante la ecuación (7), lo que refuerza a su vez los resultados previos.

$$(7) \quad RRR = \frac{1}{(1 + 5,9E)^{0,176}} \quad (R=0,946; N=38).$$

Por último, al introducir esta relación en las ecuaciones (1), (2) y (4) obtenemos:

$$(8) \quad \frac{D_v}{D_c} (1 + 5,9E)^{0,156}$$

$$(9) \quad \frac{D_v}{D_c} \exp \frac{6}{5} RR_0 \frac{(1 + 5,9E)^{0,176} - 1}{(1 + 5,9E)^{0,176}}$$

Estas relaciones  $D_v/D_c$  basadas en las ecuaciones de Gilley y Finkner (1) y Mwendera y Feyen (2), permiten calcular factores de proporcionalidad entre la fuerza de arrastre (sin unidades) o erosividad de la escorrentía en condiciones de rugosidad superficial variable ( $RR_v$ ) y constante ( $RR_c$ ).

Como resultado el ajuste basado en Gilley y Finkner (8) propone un incremento de la erosividad de la escorrentía cercano a 2 veces en el caso más extremo simulado, aunque al depender solamente de la energía cinética acumulada este factor será mayor cuanto más energía descargue una tormenta (Figura 6). Sin embargo hay que considerar que esta aproximación no tiene en cuenta ninguna variable relacionada con la dinámica de la superficie del suelo, y que como sabemos es un factor tan importante como las características de la precipitación.

Por otro lado el ajuste basado en Mwendera y Feyen (9) indica que la relación proporcionalidad  $D_v/D_c$  es función de dos variables: la *RR* y la energía cinética acumulada (*E*). En la figura 6 están expuestos cuatro ejemplos teóricos que tienen en cuenta diferentes velocidades de descenso de la *RR* para una intensidad de lluvia constante ( $97 \text{ mm h}^{-1}$ ) lo cual permite evaluar como afecta la dinámica superficial sobre la agresividad de la escorrentía. Así, la predicción de mayores variaciones de fuerza de arrastre de la escorrentía o “drag” se produce

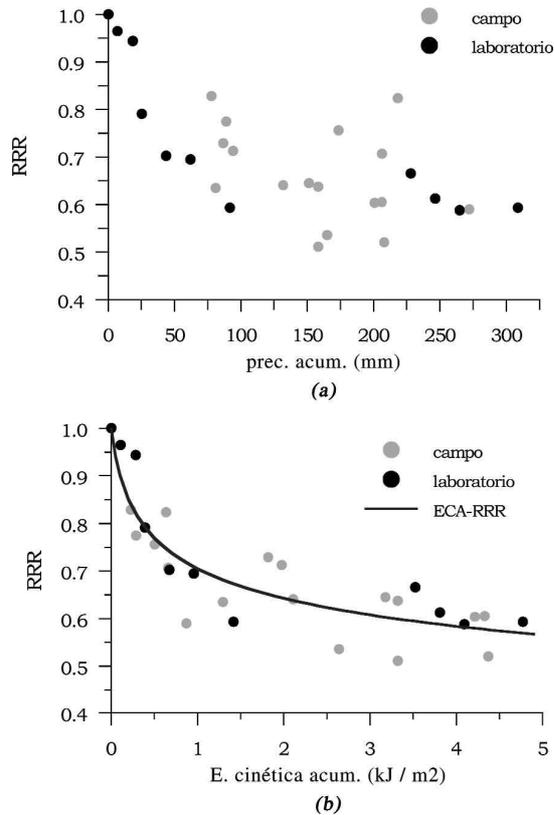


Figura 5. Índice de rugosidad relativa (RRR) en relación con la precipitación (a) y la energía cinética (b) acumuladas.

Figure 5. Random Roughness Ratio (RRR) in relationship with rainfall (a) and kinematics energy (b) cumulated.

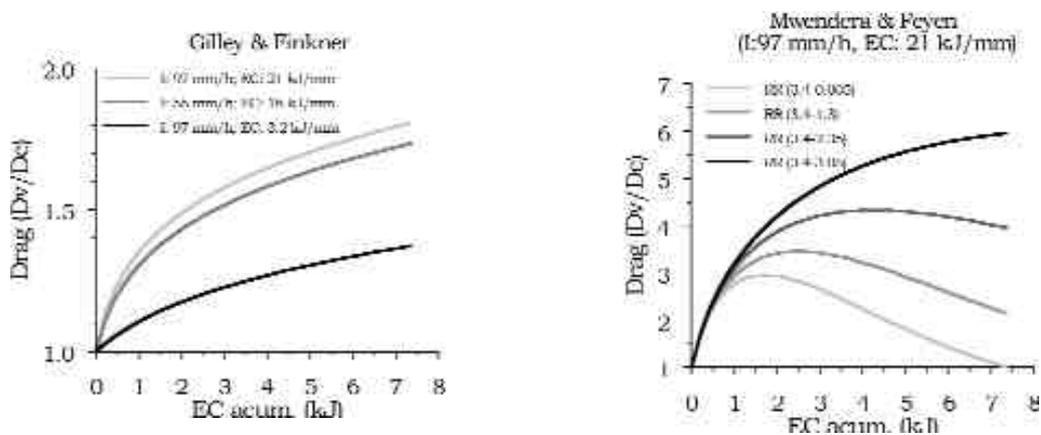


Figura 6. Ejemplos de tendencias del “drag” (erosividad de la escorrentía) en relación con la energía cinética acumulada (ECA), y expresado como un factor de proporcionalidad entre el “drag” estimado al considerar un coeficiente de rugosidad hidráulica ( $n$  de Manning) variable ( $D_v$ ) y uno constante ( $D_c$ ) para un mismo suelo.

Figure 6. Examples of drag (runoff erosivity) trends in relationship with cumulated rainfall kinematics energy (ECA), expressed like the rate between the drag obtained for a roughness hydraulic coefficient (Manning’s  $n$ ) variable ( $D_v$ ) and constant ( $D_c$ ) for the same soil.

cuando el descenso de la rugosidad superficial es muy lento. En este caso el incremento llega a ser de unas 6 veces, pero cuando se producen variaciones muy rápidas de la RR la relación  $D_v / D_c$  alcanza rápidamente un valor máximo próximo a 3 y dicho factor se aproxima asintóticamente a 1 a medida que los valores de RR se aproximan a cero. Por tanto en suelos arcillosos, sin vegetación y con una elevada rugosidad superficial, afectados por tormentas de intensidad elevada (superior a  $100 \text{ mm h}^{-1}$ ) y gran energía cinética, se pueden predecir incrementos de la fuerza de arrastre de la escorrentía que oscilan entre 2 y 6 veces, dependiendo de las variables consideradas en su evaluación.

Por consiguiente las diferencias observadas entre ambos resultados están motivadas porque la aproximación basada en Gilley y Finkner considera la agresividad de la escorrentía como una función que depende solamente de la energía cinética acumulada ( $E$ ), lo cual queda reflejado en un incremento constante de la erosividad respecto a la intensidad y cantidad de precipitación acumulada, es decir, la asocia directamente al incremento del flujo de escorrentía. Sin embargo la aproximación basada en Mwendera y Feyen al incluir también las condiciones de rugosidad superficial (RR) parece ser ahora más adecuada que la de Gilley y Finkner, ya que considera que la agresividad de la escorrentía

no depende exclusivamente de su cuantía y energía, sino que también es una función de la dinámica superficial, lo cual es mucho más correcto desde el punto de vista de la física de fluidos. Esto destaca la importancia que tiene la dinámica superficial del suelo, expresada como su predisposición al encostramiento.

Así, aunque ambas aproximaciones coinciden en predecir un incremento de la susceptibilidad a la erosión durante una tormenta, parece más acertado considerar que el incremento de agresividad de la escorrentía superficial puede oscilar alrededor de un orden de magnitud (posiblemente en condiciones naturales las diferencias pueden ser superiores), lo cual concuerda con lo sucedido durante el evento registrado en mayo de 1994 (ver apartado 3.1.Zona de estudio).

Estas consideraciones ponen de manifiesto uno de los riesgos asociados al abandono de campos de cultivo en suelos arcillosos, especialmente durante los meses o años posteriores, puesto que la supresión de las labores de arado del suelo favorece la susceptibilidad al encostramiento superficial, y en consecuencia incrementa las probabilidades de activación de flujos de escorrentía intensa, cuyo elevado poder de arrastre o erosivo aumenta el riesgo de formación de regueros incipientes y su posterior evolución en barrancos y cárcavas.

## 5. Conclusiones.

Las condiciones óptimas para el encostramiento de un suelo agrícola, arcilloso y sin vegetación parecen estar relacionadas con una combinación entre períodos de sequedad y tormentas de alta intensidad o elevada energía.

Los suelos arcillosos en condiciones de humedad superficial elevada son menos susceptibles a experimentar un descenso de la rugosidad superficial asociado al impacto de las gotas de lluvia, especialmente si la rugosidad superficial del suelo es moderada o baja. Esto puede relacionarse con varias causas:

1. Un encharcamiento rápido, asociado a flujos de escorrentía discontinuos y poco intensos, más propio de suelos húmedos que áridos (Lavee *et al.*, 1998; Cerdà y Sarah, 2000) posiblemente crea unas condiciones que protegen la superficie del impacto de las gotas de lluvia. Además, en dichas condiciones la escorrentía muestra poca capacidad erosiva y de transporte, por lo que no contribuye de manera eficaz al sellado superficial y la formación de la costra deposicional, que está asociada a la reordenación superficial del sedimento movilizado.
2. La mayor eficacia de la infiltración observada en suelos húmedos (Whipkey, 1965; Kirkby, 1978) puede favorecer el transporte subsuperficial del sedimento erosionado y, de esta manera, retarda el desarrollo de la costra deposicional, al disminuir la capacidad de sedimentación de las partículas en las micro-depresiones y la obturación de la porosidad de transmisión (>30 mm).
3. También habría que considerar, aunque de forma indirecta, que mientras se mantiene húmedo el suelo no se producen cambios estructurales derivados de los procesos de humectación-deseccación, por lo que no se produce el efecto de compactación por retracción de las arcillas que constituyen la matriz del suelo, lo cual no solo causa una reducción de la porosidad superficial sino que también parece favorecer el descenso de la rugosidad (Regüés *et al.*, 1994; Pardini *et al.*, 1996).

Por otro lado, los resultados también han confirmado que el desarrollo de la costra y sellado superficial está estrechamente asociado al descenso de la rugosidad, el cual depende mucho más de la intensidad y energía cinética de las precipitaciones que de su cuantía total.

Las buenas correlaciones obtenidas entre la energía cinética de la lluvia acumulada con respecto a la dinámica de las propiedades físicas del suelo y las respuestas hidrológicas coinciden con los resultados expuestos por otros autores (Bertuzzi *et al.*, 1990; Martínez-Mena *et al.*, 2001), cuyos trabajos también estuvieron realizados con experiencias de simulación de lluvia, aunque sobre litologías algo distintas.

El desarrollo de la costra deposicional, en términos de espesor y dureza, parece depender estrechamente de la energía de la precipitación, mostrando una tendencia de tipo exponencial. Sin embargo la costra estructural se relaciona con la energía de precipitación acumulada mediante una función lineal de pendiente muy baja, esto sugiere que tras una generación rápida prácticamente no evoluciona, contrariamente a las observaciones relacionadas con el desarrollo de la costra deposicional, cuya formación puede ser indicativa de una fase muy avanzada de la degradación del suelo.

El desarrollo de la costra superficial, especialmente la deposicional, conlleva una serie de cambios en las propiedades físicas del suelo, que se manifiestan mediante una respuesta hidrológica regida por fuertes incrementos de la intensidad y fuerza de arrastre de la escorrentía, hasta aproximadamente un orden de magnitud, lo cual puede estar perfectamente asociado con la activación de la erosión intensa o acelerada. En este sentido, Milliman y Syvitski (1992) sugieren que las modificaciones humanas en ambientes naturales (agricultura y deforestación) pueden llegar a incrementar hasta 10 veces las tasas de exportación de sedimentos por vía fluvial.

Estos resultados confirman la estrecha relación que puede existir entre las condiciones en que se puede encostrar un suelo arcilloso y la formación de regueros, que pueden evolucionar en barrancos incipientes y en última instancia en la formación de cárcavas.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los doctores Paolo Bazzoffi y Sergio Pellegrini por facilitar el acceso a la "Stazione Sperimentale de Sta Elisabetta", asimismo agradecen a Luigi Gabellini el apoyo técnico durante la fase experimental desarrollada en el campo y a la doctora Marta Yáñez por su colaboración durante algunas de las simulaciones realizadas en el laboratorio. Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos: MWISED (EU-ENV4-CT97\_687), HIDROESCALA (REN2000-1709-C04-02 GLO), TRANSMIN (PPQ2001-2100-C04-01) y PROHISEM (REN2001-2268-C02-01/HID).

## Referencias Bibliográficas

- Arshad M.A. & Mermut A.R. (1988). Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in north-western Alberta, Canada. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 52, 724-729.
- Barazzuoli P., Guasparri G., & Salleolini M. (1993). Il clima. En: *La Storia Naturale della Toscana Meridionale* (Giusti, F., ed.). Pizzi, Milano, 141-171.
- Bazzoffi P. (1994). The enhanced Fagna-type hydrological unit for measurement and sampling of runoff waters. En: *International Workshop on Soil Erosion in Semi-Arid Mediterranean Areas* (CNR ed.). ESSC-CSEI, Taormina, 28-30 October 1993, 195-204.
- Bazzoffi P. & Pellegrini S. (1992). Caratteristiche delle piogge influenti sui processi erosivi nel periodo 1964-1990 in un ambiente della valle dell'Era (Tocana). Evoluzione climatica e modelli previsionali. En: *Annali dell'Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo*, 161-182.
- Bertuzzi, P., Rauws, G. & Courault, D. (1990). Testing roughness indices to estimate soil surface roughness due to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 17, 87-99.
- Brandt C.J. & Thornes J.B. (1987). Erosional Energetics. En: *Energetics of Physical Environment* (K.J. Gregory, John Wiley & Sons, ed.). 51-87.
- Calzolari C., Torri D., Del Sette., Maccherini S. & Bryan R. (1997). Geomorphic features of a badland (biancane) area (Central Italy): characterisation, distribution and quantitative spatial analysis. *Catena*, 31, 237-256.
- Cerdà A. & Sarah P. (2000). The effect of climate on overland flow: laboratory rainfall simulation experiments. *Cuaternario y Geomorfología*, 14 (1-2), 63-75.
- Chen Y., Tarchitzky J., Brouwer J., Morin J. & Banin A. (1980). Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science*, 130, 49-55.
- Chow V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. (McGraw-Hill Book Co.Inc., ed.). New-York, 680 pp.
- Dexter A.R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J.Terramech*, 1, 11-22.
- Edwards W.M. & Owens L.B. (1991). Large storms effects on total soil erosion. *J.Soil and Water Conservation*, 46, 75-78.
- Evans D.D., & Buol S.W. (1968). Micromorphological study of soil crusts. *Soil American Society of America Proceedings*, 32, 19-22.
- Farres P. (1978). The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 3, 243-254.
- Francis C.B. & Thornes J.B. (1990). Matorral: erosion and reclamation. En: *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales Mediterráneas* (J.Albaladejo, M.A.Stocking & E.Díaz, ed.). (C.S.I.C.), 87-115.
- Gallart F., Llorens P. & Latron J. (1994). Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *J.Hydrology*, 159, 291-303.
- Gilley J.E. & Finkner S.C. (1991). Hydraulic roughness coefficients as affected by random roughness. *Transactions of ASAE*, 34, 897-903.
- Kirkby M.J. (1978). *Hillslope Hydrology*. Wiley-Intersciences, Norwich, 389 pp.
- Langbein W.B & Schumm S.A. (1958). Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions American Geophysical Union*, 39 (6), 1076-1081.
- Larsen W.E. (1964). Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. *Soil.Sci.Soc.Am.Proc.*, 28, 119-122.
- 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, 407-422.
- Martínez-Mena M., Abadía R., Castillo V. & Albaladejo J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Cuaternario y Geomorfología*, 15 (1-2), 31-43.
- Mc Intyre D.D. (1958a). Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Science*, 85, 188-189.
- Mc Intyre D.D. (1958b). Soil splash and the formation of surface crust by raindrop impact. *Soil Science*, 85, 261-266.
- Milliman, J.D. & Syvitski, J.P.M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *J.Geol.*, 100, 525-544.
- Mwendera E.J. & Feyen J. (1992). Estimation of depression storage and Mannin's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*, 52, 235-250.
- Mwendera E.J. & Feyen J. (1993). Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Science*, 155, 229-235.
- Onstad C.A. (1984). Depressional storage on tilled soil surface. *Transactions of the ASAE*, 27, 729-732.
- Ortiz Silla R. (1990). *Mecanismos y procesos de degradación del suelo con especial referencia a las condiciones ambien-*

- tales Mediterráneas*. Ed: J.Albaladejo, M.A.Stocking, E.Díaz (C.S.I.C.), 47-68.
- Panini T., Salvador Sanchís M.P. & Torri D. (1993). A portable rain simulator for rough and smooth morphologies. *Quaderni di Scienza del Suolo*, V, 47-58.
- Pardini G., Vigna Guidi G., Pini R., Regüés D. & Gallart F. (1996). Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, 27, 149-165.
- Pini R., Vigna Guidi G. & Barbini A. (1991). Determinazione della rugosità superficiale del terreno con un sistema laser. En: *Atti del convegno della Società Italiana di Chimica Agraria*, 219-220.
- Rauschkolb R.S. (1971). Land degradation. *FAO Soil Bulletin*, 13.
- Regüés D. (1995). *Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimentos en un área acaravada*. Tesis doctoral inédita. Facultad de Geología U.B. 302 pp.
- Regüés D., Pardini G., Vigna Guidi G. & Gallart F. (1994). El efecto de los ciclos térmicos e hídricos sobre las rocas arcillosas, un experimento de laboratorio. En: J. Arnáez-Vadillo, J.M. García-Ruiz, A. Gómez Villar Eds. *Geomorfología en España Vol.I*. (SEG Logroño, 1984), 542 pp.
- Regüés D., Guàdia R. & Gallart F. (2000). Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena. Special Issue: Badland in changing environment*, 40 (2), 189-202.
- Romero M.A., López-Bermudez F., Thornes J.B., Francis C. & Fisher G.C. (1986). Variability of overland flow erosion rates in a semiarid mediterranean environment under matorral cover, Murcia, Spain. *Catena Sup.* 13, 139-146.
- Slattery M.C. & Bryan R.B. (1992). Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *Jour.Soil.Sciences*, 43, 517-529.
- Slattery M.C. & Bryan R.B. (1994). Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena*, 22, 17-34.
- Steichen J.M. (1984). Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil. *Soil and Tillage Research*, 4, 251-262.
- Torri D., Sfalanga M. & Chisci G. (1987). Threshold conditions for incipient rilling. *Catena Sup.* 8, 97-105.
- Torri D., Regüés D., Pellegrini S. & Bazzofi P. (2000). Within-storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms. *Catena Special Issue.Badlands in changing environments*, 40 (2), XXIV-XLIII.
- Wainwright J. (1996). Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena*, 26, 27-47.
- Whipkey R.Z. (1965). Subsurface stormflow on forested slopes. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 10, 74-85.

Recibido 14 de enero de 2002

Aceptado 26 de marzo de 2002