

# ESCORRENTÍA Y EROSIÓN A LO LARGO DE UN GRADIENTE CLIMÁTICO-ALTITUDINAL AFECTADO POR EL PASTOREO EN EL DESIERTO DE JUDEA

ARTEMI CERDÀ\* Y HANOCH LAVEE\*\*

Aceptado: 21-IX-99. BIBLID [0210-5462 (1999); 29: 27-50].

**PALABRAS CLAVE:** Desierto, gradiente climático, usos del suelo, hidrología, erosión.

**KEY WORDS:** Desert, climatic gradient, use of the card, hidrology, erosion.

**MOT CLEFS:** Desert, gradient climatique, occupation des sols, hidrologie, érosion.

## RESUMEN

Los suelos del Desierto de Judea generan rápidos encharcamientos y abundantes escorrentías, lo que es debido a las ínfimas tasas de infiltración y a curvas de escorrentía de gran pendiente que alcanzan súbitamente las tasas máximas ante chaparrones simulados de 50,36 mm h<sup>-1</sup> de intensidad y 45 minutos de duración. Se ha comprobado que el clima determina las características de los suelos y el comportamiento de los procesos geomorfológicos. A lo largo del gradiente climático estudiado las tasas de infiltración decrecen con la precipitación, mientras que las escorrentías, la salinidad de éstas y las pérdidas de suelo aumentan. Además del clima, el uso antrópico influye drásticamente en la respuesta del suelo ante la lluvia. Así, la influencia del clima se ve alterada por el sobrepastoreo, ya que éste modifica la composición florística, la cubierta vegetal y las costras superficiales, con lo que se favorece la erosión del suelo.

## ABSTRACT

The soils of the Judean Desert generate quick ponding and runoff (%), which is due to the low infiltration rates and runoff curves with high angle, reaching suddenly the maximum rates in front of simulated thunderstorms of 50,36 mm h<sup>-1</sup> of intensity and 45 minutes of duration. It is prove that climate determine the soil characteristics and the behaviour of the geomorphological processes. Along the climatological gradient the infiltration rates decrease with the precipitation, meanwhile the runoff, the salinity of the runoff and the soil losses magnify. Moreover the climate, the land use determines clearly the soil response to the rain. Thus, the influence of the climate is altered by the overgrazing, inasmuch this results in modifications of the floristic composition, vegetation cover and the surficial crust, and as a consequence in soil erosion.

\* Departament de Geografia. Universitat de València. 22060, 46080-València

\*\* Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE (CSIC, Univ. de València, Generalitat Valenciana). Camí de la Marjal, s/n, 46470 - Albal, València. , acerda@uv.es

\*\* Department of Geography. Bar-Ilan University. 52900, Ramat-Gan, Israel

## RÉSUMÉ

Les sols du Désert de Judée donnent lieu à de rapides inondations et à un ruissellement abondant, à cause des taux infimes d'infiltration et des courbes de ruissellement ayant une pente prononcée qui atteignent subitement les taux maxima lors de pluies simulées de 45 minutes et de 50,36 mm h<sup>-1</sup> d'intensité. Nous avons constaté que le climat détermine les caractéristiques des sols et le comportement des processus géomorphologiques. Tout au long du gradient climatique étudié, les taux d'infiltration diminuent avec la précipitation, alors que les eaux de ruissellement, la salinité de ces dernières et les pertes de sol augmentent. Outre le climat, l'activité humaine influence drastiquement la réponse du sol à la pluie. Ainsi, l'influence du climat se voit altérée par le surpâturage, étant donné que celui-ci modifie la composition florale, le couvert végétal et les croûtes superficielles, et favorise de ce fait l'érosion du sol.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las zonas semiáridas el agua es un agente modelador de primera magnitud debido a la intensidad de las lluvias y al reducido desarrollo de los suelos, lo que da lugar a una gran actividad de los procesos geomorfológicos superficiales, especialmente la arroyada (YAIR, A. y LAVÉE, H. 1985). A pesar de la importancia de los procesos de erosión hídrica existe poca información sobre ellos. Se desconocen los factores, los mecanismos básicos de transformación de la lluvia en escorrentía, y existen actualmente muy pocas mediciones de procesos básicos como es la infiltración, generación de escorrentía y pérdida de suelo (THORNES, J.B. 1994).

Junto a la litología, el clima es uno de los principales factores de los procesos edáficos y geomorfológicos. Ello es debido a que las tasas de meteorización y el desarrollo de la vegetación están directamente determinadas por la disponibilidad de agua y por la temperatura. En los ecosistemas semiáridos o áridos, caracterizados por temperaturas elevadas (desierto cálido) y por la falta de precipitaciones, cambios en ambas variables deben modificar el funcionamiento del ecosistema. Ello comportará alteraciones en los procesos geomorfológicos, sus tasas de actuación y por lo tanto en la dinámica del sistema fluvial y en las formas terrestres.

Además, conocer el efecto del clima sobre los procesos naturales puede servirnos para predecir el efecto del posible cambio climático (LAVÉE *et al.*, 1991), el cual tendrá efectos importantes sobre los procesos geomorfológicos (EYBERGEN, F. A. y IMESON, A. C., 1989). El objetivo de este trabajo es discernir las relaciones entre el clima y las tasas de actuación de los procesos geomorfológicos, centrando el estudio sobre la arroyada superficial y sus características.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El desierto de Judea comprende una amplia franja del actual territorio de Israel (Territorios Ocupados) situado entre el mar Muerto al este y las montañas de Jerusalén al oeste. Las zonas sur del desierto de Judea, las más áridas, entran en contacto sin

solución de continuidad con el desierto del Negev, mientras que al norte las montañas de Galilea y los altos del Golán delimitan claramente este espacio geográfico. Existe un claro gradiente climático de norte a sur debido a la latitud, y de oeste a este por la altura y lejanía al mar Mediterráneo. En el primer caso, la reducción de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas y tasas de evapotranspiración son evidentes hacia el sur, pero esos cambios son más marcados de oeste a este.

La reducción de altura desde las montañas de Jerusalén (650 m) hasta el mar Muerto (-400 m) fruto de una fosa tectónica (*rift valley*), supone cambios drásticos en las precipitaciones (de 620 a 100 mm anuales) (ver tabla 1 y figura 3). De este gradiente altitudinal se han seleccionado tres zonas de estudio: Kalia, Mishor Adumin y Ma'ale Adumin, las cuales tienen características semejantes –litología, uso antrópico, latitud, etc–, representativas del desierto de Judea, pero el clima es ligeramente distinto. La mayoría de las precipitaciones tiene su origen en las masas húmedas provenientes del Mar Mediterráneo, por lo que debido al efecto *foëhn* la precipitación se produce en la zona de barlovento de las montañas de Jerusalén, la situada entre el mar y ésta ciudad. La vertiente de barlovento, localizada entre Jerusalén y el Mar Muerto, reciben muy pocas precipitaciones y éstas descienden hacia el interior del continente asiático. Además del descenso en los volúmenes de lluvia, el origen de ésta es distinto, aumentando las precipitaciones convectivas hacia oriente y las frontales hacia occidente.

El paisaje está caracterizado por una muy baja cubierta vegetal, laderas escarpadas, suelos poco desarrollados, y cubiertas de fragmentos de roca importantes. La litología está dominada por las calizas, aunque también se encuentran margas en la zona más cercana al mar Muerto, sobre las que se desarrollan abundantes cárcavas (Yair *et al.*, 1980). En cada una de las zonas de estudio se seleccionó una ladera de orientación sur y pendientes medias de 10° donde se construyeron seis parcelas de 0,24 m<sup>2</sup> en las superficies más representativas. Al contrario que sobre litologías blandas, en las laderas sobre calizas del desierto de Judea no existen regueros, pero sí costras y fragmentos de rocas. El clima se caracteriza por las reducidas precipitaciones (100-330 mm). El invierno es la estación más húmeda, aunque también pueden producirse chaparrones convectivos durante el verano. La temperatura media anual es de 21° y las heladas nocturnas son prácticamente inexistentes. La vegetación está compuesta básicamente por pequeños matorrales y herbáceas.

La composición florística es distinta en cada zona de estudio. En Kalia la asociación dominante es *Zygophyllum dumosum-Reaumuria hirtella*. Otras especies importantes son *Salsola vermiculata*, *Gymnocarpos decander*, *Pteranthus dichotomus*, *Medicago laciniat* y *Plantago ovata*. Las especies dominantes en Ma'ale Adumin son *Sarcopoterium spinosum*, *Phlomis Brachodo*, *Filago sp.*, *Plantago coronopus* y *Asphodelous microcarpus*, mientras que Mishor Adumin son *Anabasis articulata*, *Halogetan alopecuroides*, *Salsola vermiculata*, *Reaumuria hirtella* y *Anagalis arvensis*.

Las parcelas fueron seleccionadas en la parte media de las laderas sur con el fin de hacer que los resultados sean comparable entre ellos y con otros estudios (LAVEE, H. *et al.*, 1991; CERDÀ, A. y LAVEE, H. 1994). La textura es arcillo-limosa en Kalia, aumentando las arenas en las zonas más húmedas. La estabilidad de los agregados es reducida, especialmente en la zona de Mishor Adumin y Kalia, donde el 50% de los

FIGURA 1.  
LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

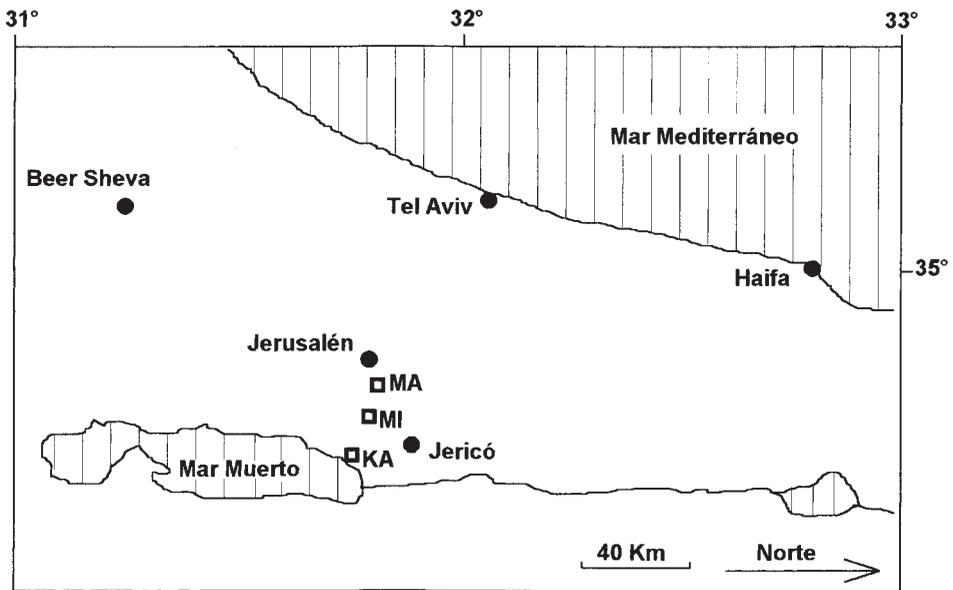


FIGURA 2.  
LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



FIGURA 3.  
CROQUIS DE LA SITUACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO, E INFLUENCIA DE ÉSTA SOBRE EL CLIMA: PRECIPITACIÓN (mm) Y TEMPERATURA (°C) MEDIA ANUAL

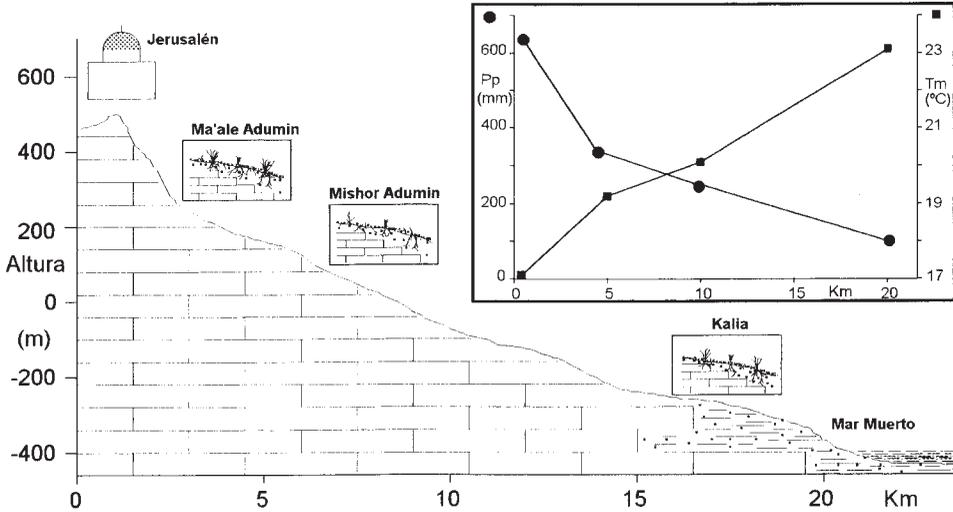


TABLA 1.  
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

Zonas de estudio	Altitud m	Precipitación mm	Temperatura °C
Kalia	-70	100	23
Ma'ale Adumin	230	260	20
Mishor Adumin	330	330	19
Media	163	230	21

agregados no resisten más de 30 impactos de gotas. El contenido en materia orgánica es bajo, aumentando desde Kalia a Ma'ale Adumin. El pH y la conductividad eléctrica del suelo (pasta saturada) se reduce con el aumento de la precipitación (tabla 2). Todas estas características confirman la existencia de un gradiente en las características de los suelos, el cual está claramente relacionado con el clima (LAVEE, H. *et al.*, 1994).

Pero, si bien la presión del pastoreo en todo el desierto de Judea es muy alta, en Mishor Adumin alcanza su máxima expresión. La cubierta vegetal en Mishor Adumin y Ma'ale Adumin es más reducida de lo esperado para precipitaciones que alcanzan los 300 mm, lo que sin duda está directamente relacionado con el sobrepastoreo de la zona desde hace milenios.

TABLA 2.  
TEXTURA EN LA CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO (0-2 cm),  
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), PH Y MATERIA ORGÁNICA (OM)  
EN CADA UNA DE LAS ZONAS ESTUDIADAS

Zonas de Estudio	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	EC (mmoh cm <sup>-1</sup> )	pH	OM (%)
KALIA	15,25	43,25	40,50	2,12	7,55	1,38
MISHOR ADUMIN	23,50	49,25	27,25	1,60	7,30	2,33
MA'ALE ADUMIN	32,00	39,00	29,00	1,37	7,20	4,19

Las zona donde se ha realizado el estudio forma parte de una amplio proyecto de investigación en el cual se están investigadondo los efectos del clima y el futuro cambio climático sobre la dinámica de los ecosistemas Mediterráneos (LAVEE, H. *et al.*, 1991; 1994; ERMES, 1995), aunque el impacto antrópico y sus consecuencias también son tenidas en cuenta.

### 3. EXPERIMENTOS CON LLUVIA SIMULADA

El simulador de lluvia utilizado es del tipo pulverizador, siendo el tamaño de las parcelas de 0,24 m<sup>2</sup>, aunque el área humectada es superior a 1 m<sup>2</sup> (ver figuras 4 y 5). La lluvia simulada siempre se ha producido con agua desionizada debido a la importancia de las sales en la generación de la escorrentía en este tipo de suelos (Shainberg, I. *et al.*, 1981; Imeson, A.C. y Verstraten, J.M., 1988).

Los experimentos consistieron en chaparrones de una intensidad de 50,36 mm h<sup>-1</sup> mantenida durante 45 minutos. En todos los casos, se pretendía alcanzar la infiltración final estable con el fin de conocer este parámetro, así como la curva de escorrentía en su totalidad. El caudal se midió a intervalos de un minuto y al menos cada 10 se tomaron muestras con el fin de conocer la concentración de sedimentos de la arroyada, la salinidad y las tasas de erosión. En cada parcela se ha medido al menos cuatro veces estas variables a intervalos regulares. La conductividad eléctrica de la escorrentía se midió directamente en el campo tras el filtrado de ésta. Ello permite conocer la salinidad de la escorrentía en distintas fases del hidrograma. Las variaciones temporales de la concentración de sedimentos (TCs) y la conductividad eléctrica (TCe) se han estimado a partir del ajuste de ecuación del tipo  $y = a + b(x)$ , mostrando el parámetro b la tendencia positiva o negativa de estas variables. Una detallada explicación de la metodología y el tratamiento de los datos se puede encontrar en Cerdà, A. (1993a; 1993b; 1995).

Al final de los experimentos –una hora después del inicio de la lluvia– se midieron los frentes de humedad y se tomaron muestras de suelo con el fin de determinar la humedad del suelo a dos profundidades: 0-2 y 4-6 cm. También se tomaron muestras antes del experimento para conocer la situación previa. Los experimentos se realizaron durante la época de lluvias, en concreto, durante el mes de Diciembre de 1993.

FIGURA 4.  
VISTA DEL SIMULADOR DE LLUVIA EN LA ZONA DE KALIA



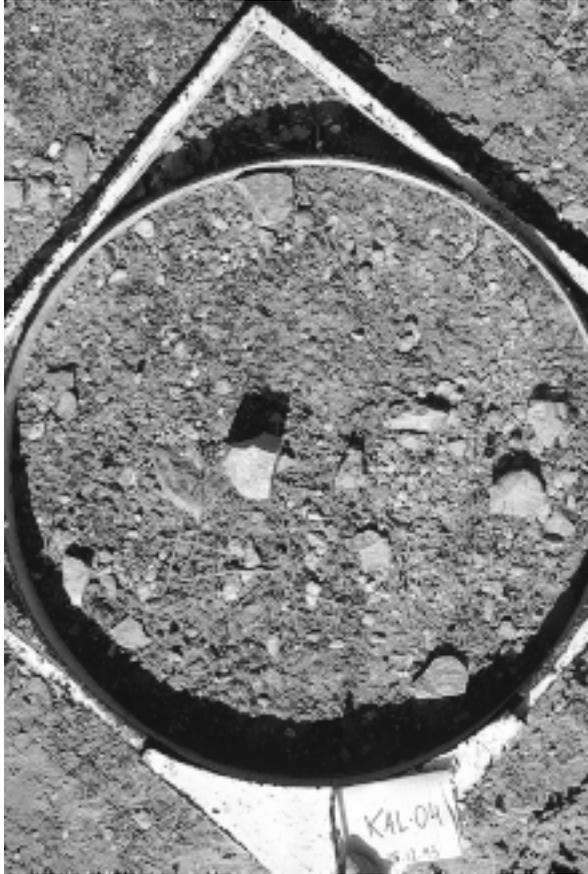
La curva de escorrentía medida en el campo ha sido modelizada mediante la ecuación de Horton (1940):

$$i = fc - (fo - fc) e^{-\alpha t}$$

- Donde:  $i$  = tasa de infiltración instantánea  
 $fc$  = infiltración final o constante  
 $fo$  = infiltración inicial  
 $t$  = tiempo  
 $\alpha$  = decaimiento exponencial de la tasa de infiltración instantánea

En cada una de las dos zonas la estrategia de muestreo consistió en la selección de seis superficies representativas de los suelos del Desierto de Judea, sobre las cuales se realizó un experimento de las características antes mencionadas: K1, K2, K3, K4, K5, y K6 en Kalia; M1, M2, M3, M4, M5 y M6 en Mishor Adumin; y A1, A2, A3, A4, A5 y A6 en Ma'ale Adumin.

FIGURA 5.  
VISTA DE UNA DE LAS PARCELAS (KAL04)

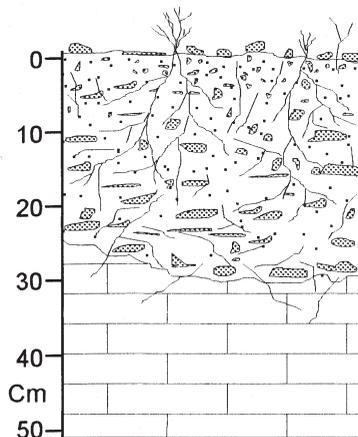


#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. *Características de los suelos*

Los suelos del desierto de Judea han sido clasificados como litosoles o aridisoles. En todos los casos son poco profundos, el horizonte A está poco desarrollado, aunque el horizonte AC puede alcanzar incluso 20-30 cm de espesor (Fig. 6). Hay una clara relación entre la precipitación media anual y la profundidad del suelo, ya que en Kalia

FIGURA 6.  
PERFIL TIPO DE LOS SUELOS DEL DESIERTO DE JUDEA.  
EL EJEMPLO PROCEDE DE LA ZONA DE MA'ALE ADUMIN (A6)



es de 12 cm (9-16 cm), mientras que en Mishor Adumin es de 25 cm (4-25 cm) y en Ma'ale Adumin de 27 cm (25-27 cm). Respectivamente las lluvias medias anuales son 100, 260 y 330 mm.

La microtopografía de las laderas hace que exposición y pendiente varíen entre 125° y 200°, y 3° y 14°, respectivamente, cuando se trata de parcelas individuales. En cuanto a valores medios de cada zona de estudio las variaciones son insignificantes: 172°-185° en la exposición y 6°-10° en la pendiente (ver tabla 1).

Tanto la cubierta de líquenes como la de musgos es mayor que la de plantas, aunque en general se produce un aumento de las plantas en las zonas más húmedas con un decrecimiento de musgos y especialmente líquenes. La zona intermedia siempre mantiene un comportamiento dispar a la tendencia general, lo que es debido al afecto de sobrepastoreo. Ello explica una mayor presencia de líquenes, menos musgos, muy poca vegetación (2%) y que ésta tenga una altura insignificante (1 cm). La zona más árida, Kalia, es la que recibe un menor impacto del pastoreo debido a su reducida productividad. La suma de la cubierta de musgos, líquenes y plantas ofrece una tendencia muy clara: aumenta desde el Mar Muerto hasta Jerusalén. En Mishor Adumin, esta cubierta es muy elevada debido al desarrollo de los líquenes, estando las plantas mucho menos representadas que en Ma'ale Adumin (ver tabla 3 y figura 7).

La pedregosidad del suelo es muy elevada, como es típico de los suelos desérticos. Si en Mishor Adumin la cubierta es menor, es debido a que uno de los impactos inmediatos del sobrepastoreo es la agrupación de las piedras. El paso del ganado hace que los fragmentos de rocas se reúnan y ocupen menos superficie, lo que reduce la

TABLA 3.  
 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIES ESTUDIADAS:  
 Exposición (*Exp*), Pendiente (*Pen*), cubierta de Líquenes (*Liq*),  
 Musgos (*Mus*) y Plantas (*Pla*), Altura de la vegetación (*Ave*),  
 cubierta de Fragmentos de rocas (*Pie*) y Profundidad del suelo (*Prs*)

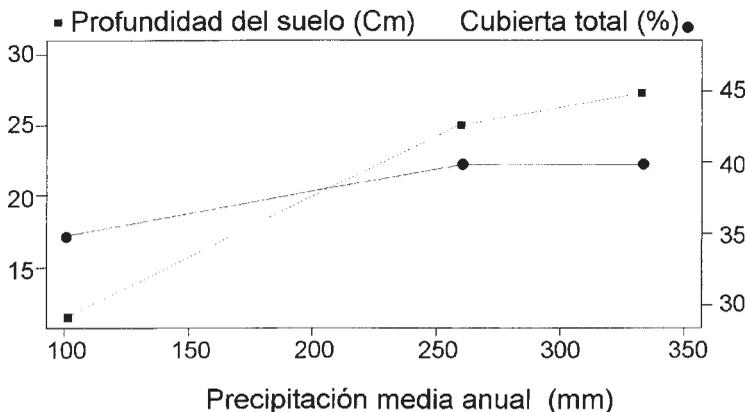
Parcelas	<i>Exp</i> (°)	<i>Pen</i> (°)	<i>Liq</i> (%)	<i>Mus</i> (%)	<i>Pla</i> (%)	<i>Alv</i> cm	<i>Pie</i> (%)	<i>Prs</i> cm
<b>Kalia</b>								
K1	175	12	35	20	0	0	15	10
K2	180	3	0	0	10	4	85	16
K3	185	11	45	20	2	7	20	14
K4	190	11	30	30	0	0	15	12
K5	180	10	0	0	0	0	90	9
K6	200	14	0	0	1	4	95	10
<b>Media</b>	<b>185</b>	<b>10,17</b>	<b>18,33</b>	<b>11,67</b>	<b>2,17</b>	<b>2,5</b>	<b>53,33</b>	<b>11,83</b>
<b>Mishor Adumin</b>								
M1	180	2	0	0	0	0	60	25
M2	185	10	0	0	0	0	65	24
M3	185	4	0	0	0	0	25	4
M4	125	9	25	45	2	1	5	23
M5	175	5	80	0	1	0,5	20	10
M6	180	3	80	0	10	3	20	12
<b>Media</b>	<b>171,67</b>	<b>5,5</b>	<b>30,83</b>	<b>7,5</b>	<b>2,17</b>	<b>0,75</b>	<b>32,5</b>	<b>24,83</b>
<b>Ma'ale Adumin</b>								
A1	180	10	30	30	5	1	30	35
A2	190	7	20	20	5	1	25	25
A3	180	3	5	3	2	1	70	30
A4	185	8	2	0	20	5	80	23
A5	190	10	1	0	5	3	80	21
A6	186	8	30	30	20	7	20	26
<b>Media</b>	<b>185,17</b>	<b>7,67</b>	<b>14,67</b>	<b>13,83</b>	<b>9,5</b>	<b>3</b>	<b>50,83</b>	<b>26,67</b>

cubierta real de piedras. Normalmente las piedras ocupan el 50% de la superficie, excepto en Mishor Adumin donde es ligeramente menor 33%.

#### 4.2. Respuesta hidrológica. Cambios producidos por la lluvia

La humedad previa del suelo es muy reducida. En término medio las zonas con mayores precipitaciones tienen suelos con niveles de humedad ligeramente mayores (Fig. 8). Después del experimento, la humedad del suelo aumenta en todos los casos y

FIGURA 7.  
 INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA PROFUNDIDAD DEL SUELO  
 Y LA CUBIERTA TOTAL  
 (Plantas + Líquenes + Musgos + Altura de las plantas)



se mantiene esta relación positiva con la precipitación media anual. Es de destacar que la penetración del frente de humedad fue muy reducido, de ahí que en muchos casos no se produjeran cambios a profundidades mayores a 4 cm, y que la humedad sea mucho menor que en la superficie (0-2 cm).

La lluvia produce una respuesta inmediata en los suelos del desierto de Judea. En primer lugar aparece un encharcamiento muy rápido. En Kalia fue medido después de 46 segundos en término medio, mientras que en Mishor Adumin fue de 1' 21" y en Ma'ale Adumin de 1' 43". Un minuto después del inicio del encharcamiento se produce la escorrentía en la parcela, y entre 30" y 40" después la escorrentía alcanza la salida de la parcela, iniciándose el hidrograma. Tan sólo en la zona de Mishor Adumin se produce una más rápida transformación del encharcamiento en escorrentía (tabla 4).

Se observa una tendencia en la relación entre la precipitación media anual y la respuesta del suelo ante la lluvia (Fig. 8). Cuanto más árida es la zona los suelos producen encharcamientos más rápidos, estos se convierten en escorrentía muy pronto y el hidrograma se inicia antes. En la zona más húmeda, Ma'ale Adumin, el encharcamiento se produce 1' 30" más retrasado que en Kalia, la zona más árida. También el inicio de la escorrentía en el colector es más retrasada en la zona más húmeda, en concreto 1' 14" más tarde que en Mishor Adumin.

La respuesta de los suelos del desierto de Judea es tan rápida ante la lluvia que incluso menos de 1 mm de precipitación genera encharcamientos. Además, la escorrentía alcanza el colector con menos de 2 mm en Kalia y Mishor Adumin y con 2,25 mm en Ma'ale Adumin (ver parámetro *Vte* en la tabla 4).

TABLA 4.  
HUMEDAD DEL SUELOS ANTES Y DESPUÉS DE LOS EXPERIMENTOS A DOS PROFUNDIDADES:  
0-2 cm y 4-6 cm. Tiempo de encharcamiento (*tp*), de escorrentía en superficie (*ts*), de su medición en la salida  
de la parcela (*te*) y volumen de lluvia necesario para producir escorrentía fuera de la parcela (*Vte*)

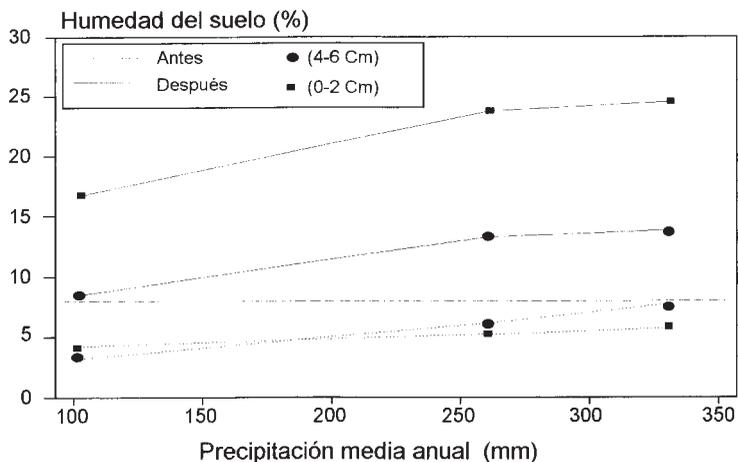
Parcelas	Humedad del suelo (%)				<i>tp</i>	<i>ts</i>	<i>te</i>	<i>vte</i> mm
	Antes		Después					
	(0-2 cm)	(4-6 cm)	(0-2 cm)	(4-6 cm)				
<b>Kalia</b>								
K1	4,08	3,09	15,32	13,73	0' 20"	1' 06"	1' 17"	0,98
K2	4,39	2,63	14,01	3,07	0' 40"	2' 10"	2' 40"	1,83
K3	4,34	1,80	20,00	4,11	0' 50"	1' 10"	2' 00"	1,57
K4	3,56	9,96	25,10	21,80	0' 25"	1' 04"	1' 50"	1,46
K5	4,41	2,38	13,23	5,18	1' 10"	2' 00"	4' 00"	3,07
K6	3,65	2,06	14,84	2,69	1' 10"	2' 25"	2' 45"	1,81
<b>Media</b>	<b>4,07</b>	<b>3,65</b>	<b>17,08</b>	<b>8,43</b>	<b>0' 46"</b>	<b>1' 39"</b>	<b>2' 26"</b>	<b>1,79</b>
<b>Mishor Adumin</b>								
M1	4,26	5,73	18,12	5,72	0' 50"	1' 10"	2' 15"	1,83
M2	3,27	6,41	22,63	12,80	1' 10"	1' 35"	2' 10"	1,85
M3	2,87	4,70	29,23	22,92	1' 40"	2' 10"	2' 25"	1,95
M4	5,20	4,74	24,66	5,82	1' 23"	2' 05"	2' 26"	1,35
M5	7,88	3,79	26,67	20,75	0' 40"	1' 00"	1' 35"	1,27
M6	6,37	6,63	24,87	11,37	0' 40"	1' 05"	1' 32"	1,07
<b>Media</b>	<b>4,97</b>	<b>5,33</b>	<b>24,36</b>	<b>13,23</b>	<b>1' 21"</b>	<b>1' 31"</b>	<b>2' 03"</b>	<b>1,55</b>
<b>Ma'ale Adumin</b>								
A1	3,88	4,74	28,55	21,17	2' 30"	3' 00"	3' 10"	2,33
A2	3,27	6,41	25,06	7,16	2' 10"	2' 30"	2' 40"	2,17
A3	2,87	4,74	16,50	6,51	1' 30"	2' 10"	2' 30"	2,01
A4	6,40	9,24	20,35	8,68	1' 21"	2' 45"	3' 50"	2,52
A5	7,08	11,88	19,83	14,25	1' 22"	3' 50"	4' 33"	2,00
A6	11,67	12,12	40,25	23,63	1' 30"	2' 40"	3' 00"	2,50
<b>Media</b>	<b>5,86</b>	<b>8,19</b>	<b>25,09</b>	<b>13,57</b>	<b>1' 43"</b>	<b>2' 49"</b>	<b>3' 17"</b>	<b>2,25</b>

#### 4.3. Respuesta hidrológica. Hidrogramas y balances

La característica definitoria de los suelos del desierto de Judea es la elevada escorrentía. Un ejemplo de ello es que de los 37,8 mm precipitados durante el experimento, una media de 28,7 mm se transforman en escorrentía. La escorrentía media es de 38,8, 43,44 y 32,5 mm h<sup>-1</sup> respectivamente para Kalia, Mishor Adumin y Ma'ale Adumin.

En cuanto al coeficiente de escorrentía siempre es muy alto, variando entre 48 y 94%. Por zonas, obviamente se repite lo visto anteriormente: Mishor Adumin es la zona con mayores pérdidas de agua (90% de la precipitada), seguido por Kalia (81%) y Ma'ale Adumin (74%). En cuanto al coeficiente de escorrentía después de treinta minutos de lluvia (*Rc30*) se mantiene la misma tendencia. Además, a pesar del reducido volumen de lluvia (25 mm) y con sólo 30 minutos de precipitación los

FIGURA 8.  
 INFLUENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA HUMEDAD DEL SUELO.  
 Antes y después del experimento con lluvia simulada (45 minutos a una intensidad 50,36% mm h<sup>-1</sup>) y a dos profundidades distintas (0-2 cm y 4-6 cm)

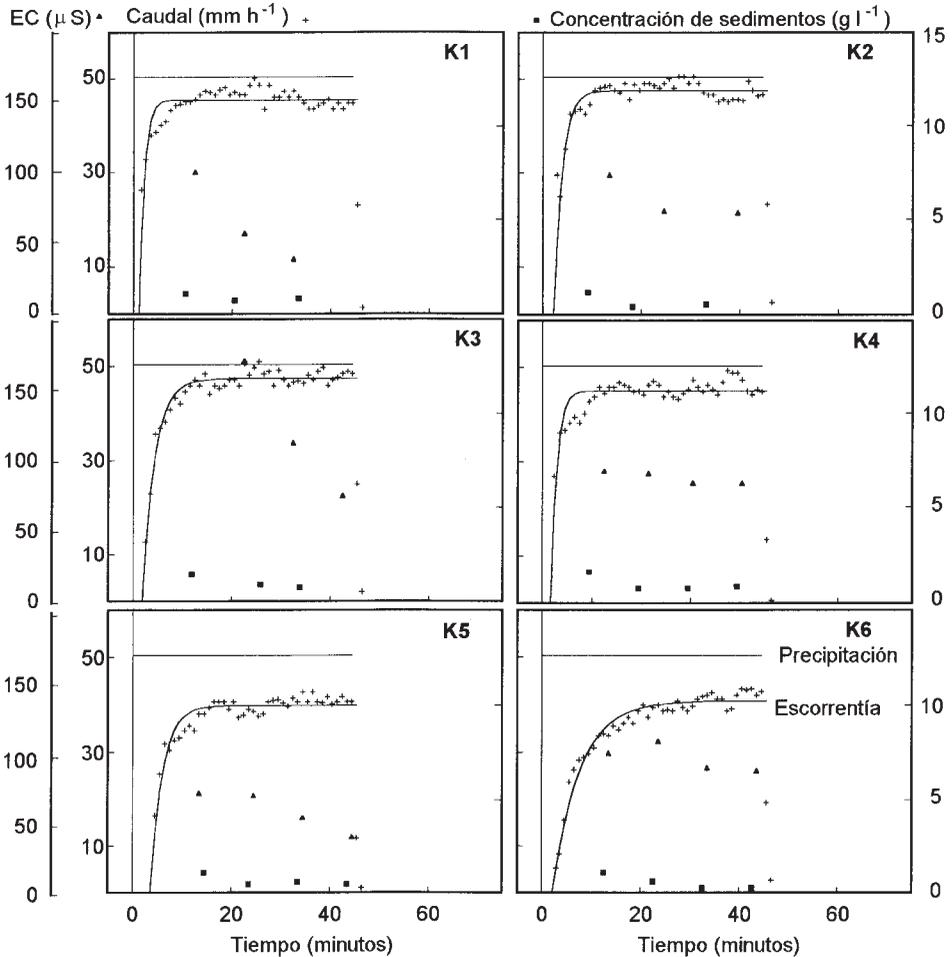


coeficientes de escorrentía son muy altos (77, 87 y 63% respectivamente para Kalia, Mishor Adumin y Ma'ale Adumin). Se rompe por lo tanto la tendencia vista anteriormente con parámetros como el tiempo de encharcamiento (*tp*) y la humedad previa y posterior al experimento, los cuales eran directamente influidos por el gradiente climático. En cambio, el tiempo de inicio de la escorrentía (*ts*) y su medición en el colector (*te*) se produce antes –y sus volúmenes son mayores– en la zona de Mishor Adumin que en la zona más árida, Kalia.

El balance hidrológico en los suelos del desierto está básicamente controlado por la tasa de infiltración final estable. Así los suelos de la zona de Mishor Adumin tienen las tasas más reducidas: 1,65 mm h<sup>-1</sup>, mientras que Ma'ale Adumin alcanza los 12,5 mm h<sup>-1</sup>, quedándose Kalia en una situación intermedia (6 mm h<sup>-1</sup>). Esto determina que después de 30 (*Vi30*) ó 60 (*Vi60*) minutos los volúmenes de infiltración sean ínfimos. En concreto, en Mishor Adumin la infiltración es de 3,3, y 4,2 mm después de 30 y 60 minutos respectivamente. En Kalia estos mismos parámetros son de 5,9 y 8,8 mm, y en Ma'ale Adumin de 9,2 y 15,2 mm.

Las formas de las curvas de escorrentía se caracterizan por un inicio casi inmediato, ser muy abruptas y alcanzar la tasa final estable muy rápidamente. Las diferencias entre zonas son insignificantes cuando se comparan los valores medios, aunque cuanto más árida es la zona menor es la pendiente de las curvas de escorrentía. Esto es poco lógico si se compara con los resultados de otros trabajos (Cerdà, A., 1993a), influyendo en este comportamiento curvas hidrofóbicas como la del experimento A6 en Ma'ale Adumin (ver tabla 4 y figuras 10, 11 y 12).

FIGURA 10.  
 HIDROGRAMAS DE LOS SEIS EXPERIMENTOS REALIZADOS  
 CON LLUVIA SIMULADA EN KALIA.  
 Escorrentía y precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ), concentración de sedimentos ( $\text{g l}^{-1}$ ) y evolución de la conductividad eléctrica de la escorrentía ( $\mu\text{s}$ )

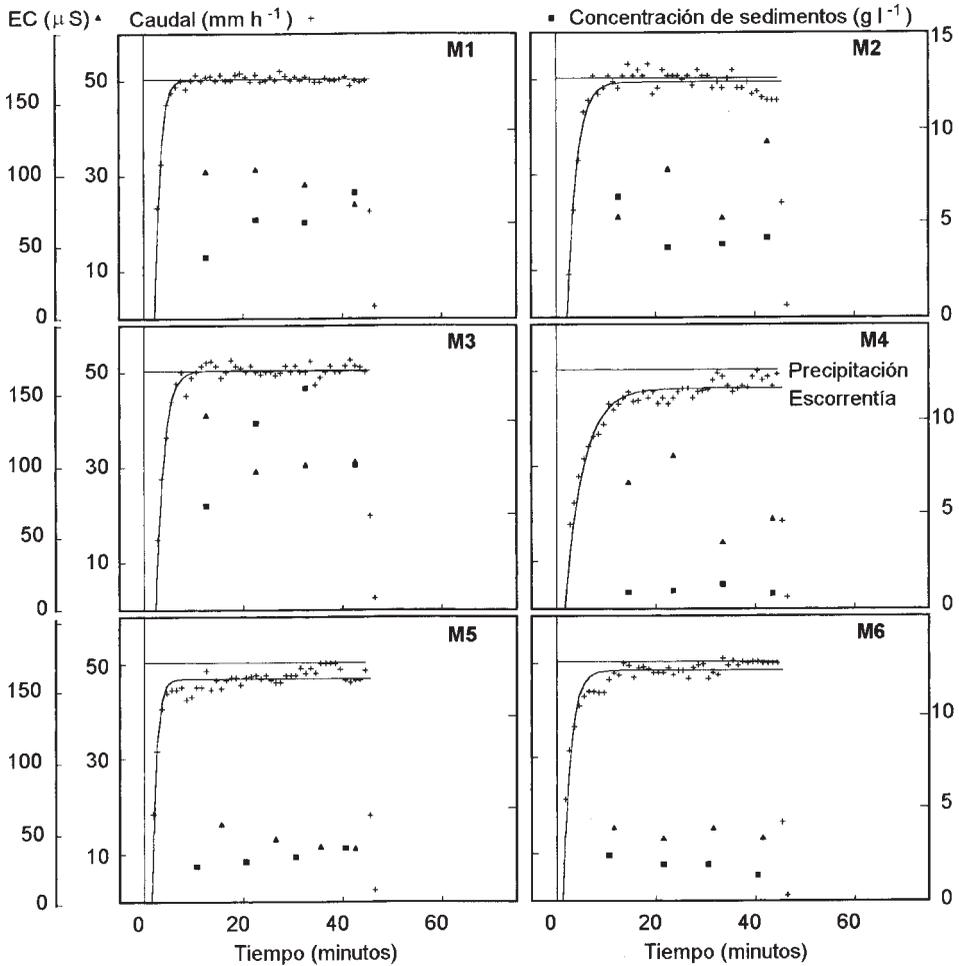


#### 4.4. Respuesta erosiva. Pérdida de sedimentos

Los suelos del desierto de Judea presentan respuestas hidrológicas muy dispares. En primer lugar la zona más árida y la más húmeda –Kalia y Ma'ale Adumin– se caracterizan por ser poco erosionables. En concreto, las concentraciones de sedimentos son de 0,77 y

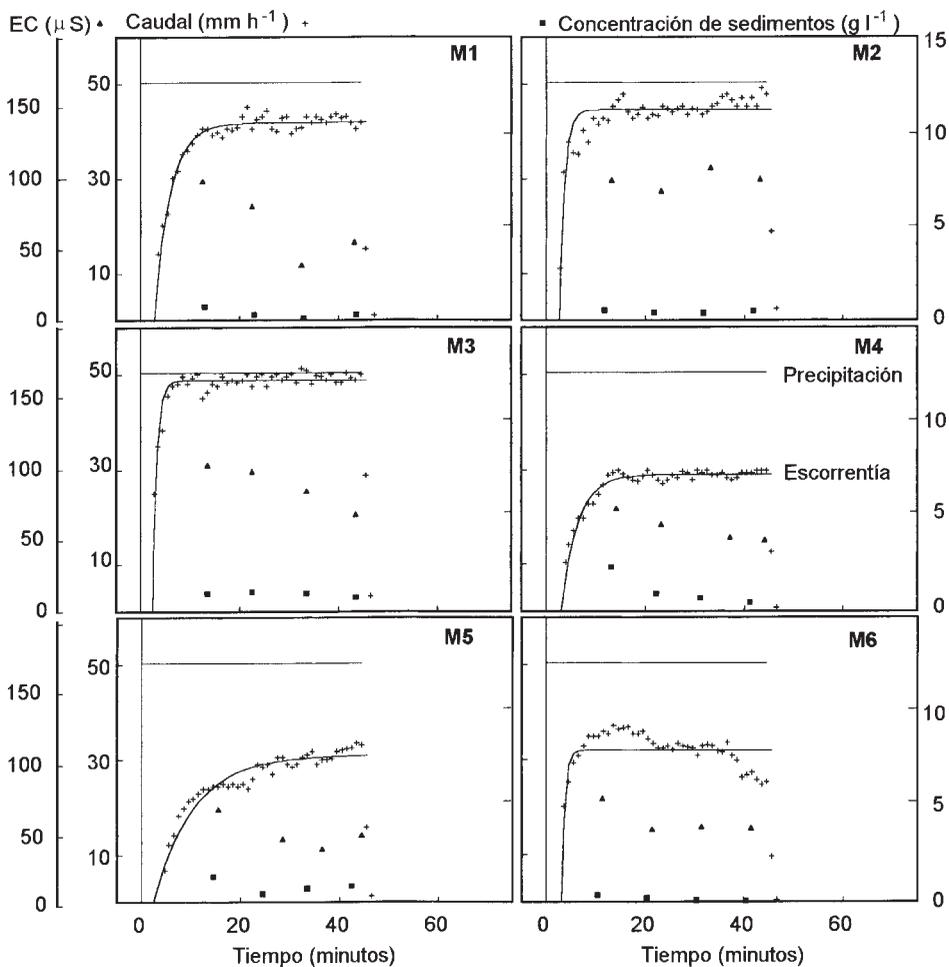
FIGURA 11.  
HIDROGRAMAS DE LOS SEIS EXPERIMENTOS REALIZADOS  
CON LLUVIA SIMULADA EN MISHOR ADUMIN.

Escorrentía y precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ), concentración de sedimentos ( $\text{g l}^{-1}$ ) y evolución de la conductividad eléctrica de la escorrentía ( $\mu\text{s}$ )



0,59  $\text{g l}^{-1}$ , en valores medios. La capacidad de estos suelos de mantenerse estables ante la lluvia es tal que, incluso con las altas tasas de escorrentía generadas, los sedimentos perdidos por arroyada durante 45 minutos de lluvia a 50  $\text{mm h}^{-1}$  de intensidad son tan sólo de 5,6 g en Kalia y de 3,46 g en Ma'ale Adumin. En concreto el peso de los sedimentos erosionados durante los experimentos nunca supera los 8 g y en un caso es inferior a 1 g.

FIGURA 12.  
 HIDROGRAMAS DE LOS SEIS EXPERIMENTOS REALIZADOS  
 CON LLUVIA SIMULADA EN MA'ALE ADUMIN.  
 Escorrentía y precipitación ( $\text{mm h}^{-1}$ ), concentración de sedimentos ( $\text{g l}^{-1}$ ) y evolución de la conductividad eléctrica de la escorrentía ( $\mu\text{s}$ )



La gran estabilidad de los suelos se debe a las costras físicas, químicas y biológicas junto a la cubierta de piedras que protegen el suelo hasta el punto de que las tasas de erosión son de  $30 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en Kalia y de  $18,6 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en Ma'ale Adumin.

Los suelos de Mishor Adumin se comporta en estos aspectos de una forma totalmente distinta. Esto se debe a que las tasas de escorrentía son mayores que en el resto

de las zonas (10-20% mayores) y sobretodo a que los suelos son mucho más erosionables. Incluso, la concentración de sedimentos en la escorrentía puede alcanzar hasta los 10 g l<sup>-1</sup>, los sedimentos totales (Sy) los 80 g y la tasa de erosión superar en una ocasión los 400 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>.

4.5. *Respuesta erosiva. Solutos y tendencias temporales de la erosión*

Además de la pérdida de suelo por la erosión de sedimentos, la arroyada transporta solutos. Los resultados demuestran que a escala de 55 cm –diámetro de la parcela– se produce una muy baja contribución a la pérdida de suelo por parte de los solutos. La conductividad eléctrica de la escorrentía varía a nivel de parcela entre 116 y 44μS. Entre zonas de estudio varía de 84 a 69μS. En concreto hay una clara tendencia descendente de la salinidad de la escorrentía desde la zona más árida a la más húmeda (ver tabla 5 y Fig. 13). Esto está claramente relacionado con la mayor acumulación de sales en la zona con menor precipitación, así como un mayor lavado en la más húmeda.

La evolución temporal de la pérdida de suelo hace referencia a los cambios en la concentración de sedimentos (TSc) y de solutos (TCs) durante el experimento. Ambos comportamientos son muy variables, tanto entre zonas de estudio como entre parcelas, pero en término medio y en cada zona de estudio el comportamiento indica tendencias de gran interés. La concentración de sedimentos es negativa en Kalia y Ma’ale Adumin. En ambos casos la reducción es de -0,02. En cambio en Mishor Adumin se produce un aumento de +0,02. Esto indica que con el paso del tiempo y el aumento y posterior estabilización del caudal se produce una

FIGURA 13.  
RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA (CE), TASAS DE EROSIÓN Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA ESCORRENTÍA EN EL DESIERTO DE JUDEA

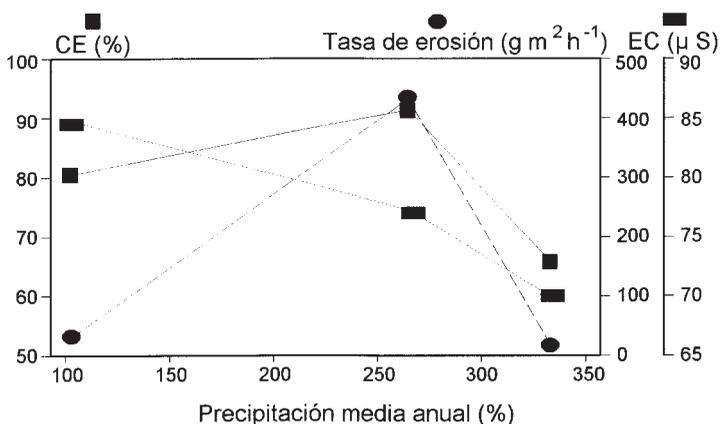


TABLA 5.  
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS.  
Escorrentía media ( $Ar$ ), Coeficiente de escorrentía ( $Rc$ ), Exponente de la ecuación de Horton ( $\alpha$ , pendiente de la curva de infiltración), tasa de infiltración final estable ( $fc$ ), volumen de lluvia infiltrada ( $Vi$ ) a diferentes escalas temporales: hasta el minuto 30 ( $Vi30$ ) y hasta el minuto 60 ( $Vi60$ ), y coeficiente de Escorrentía hasta el minuto 30 ( $Rc30$ )

PARCELAS	$Ar$ $mmh^{-1}$	$Rc$ (%)	$fc$ $min^{-1}$	$\alpha$ $mm h^{-1}$	$Vi30$ $mm$	$Vi60$ $mm$	$Rc30$ (%)
<b>Kalia</b>							
K1	42,02	87	1,02	4,96	3,74	6,22	85
K2	42,21	88	0,61	2,85	4,06	5,49	84
K3	41,63	86	0,41	2,95	4,50	5,98	82
K4	40,79	85	0,90	5,31	4,41	7,07	82
K5	33,38	69	0,42	10,53	8,91	14,18	65
K6	32,96	68	0,19	9,58	9,55	14,36	62
<b>Media</b>	<b>38,83</b>	<b>81</b>	<b>0,59</b>	<b>6,03</b>	<b>5,86</b>	<b>8,88</b>	<b>77</b>
<b>Mishor Adumin</b>							
M1	45,31	94	0,97	0,07	2,32	2,36	91
M2	43,80	91	0,54	0,84	3,36	3,79	87
M3	44,74	93	0,65	-0,14	2,75	2,68	89
M4	39,67	82	0,27	3,97	5,69	7,68	77
M5	43,09	89	1,18	3,34	3,09	4,76	88
M6	44,03	91	0,68	1,81	2,72	3,62	89
<b>Media</b>	<b>43,44</b>	<b>90</b>	<b>0,72</b>	<b>1,65</b>	<b>3,32</b>	<b>4,15</b>	<b>86,83</b>
<b>Ma'ale Adumin</b>							
A1	35,32	73	0,32	8,41	7,99	12,19	68
A2	39,64	82	0,97	5,77	5,17	8,06	79
A3	44,08	91	1,18	1,50	2,96	3,71	88
A4	24,12	50	0,31	21,41	13,50	24,21	46
A5	23,14	48	0,13	19,39	14,64	24,45	42
A6	28,70	60	1,51	18,39	10,93	20,12	57
<b>Media</b>	<b>32,50</b>	<b>67,33</b>	<b>0,74</b>	<b>12,48</b>	<b>9,20</b>	<b>15,46</b>	<b>63,33</b>

reducción de los sedimentos disponibles de ser erosionados en los dos primeros casos, mientras que en Mishor Adumin el suministro de sedimentos es lo suficientemente elevado como para mantener concentraciones de sedimentos y tasas de erosión cada vez mayores.

La salinidad de la escorrentía decrece en todas las zonas de estudio, y sólo excepcionalmente aumenta en algunas de las parcelas. Este decrecimiento es mucho más acusado en Kalia –la zona más árida– que en Ma'ale Adumin y en Mishor Adumin (ver tabla 5 y figuras 10, 11 y 12).

## 5. DISCUSIÓN

En los ecosistemas semiáridos los suelos están sometidos a estrictos controles ambientales, los cuales limitan y condicionan su desarrollo. Esencialmente, son las altas tasas de evaporación y la reducida humedad ambiental las que determinan que las tasas de

actuación de los procesos formadores de suelo sean muy reducidas. Además, las condiciones semiáridas favorecen tasas de erosión elevadas y en general sistemas morfogenéticos muy activos (COOKE, R. U. *et al.*, 1993; ABRAHAMS, A. D. y PARSONS, A. J. 1994).

Las anteriores características se han confirmado en este trabajo. Además, se ha comprobado que los suelos mantienen muy reducidos niveles de humedad en el suelo incluso en el periodo de lluvias, que el encharcamiento y las escorrentías se inician en los primeros minutos de lluvia, que las tasas de infiltración final estable son muy bajas (incluso 0 mm h<sup>-1</sup>), que las escorrentías pueden superar el 90% de la lluvia y que las tasas de erosión son elevadas. Esto último debe ser matizado ya que las costras superficiales –muchas de ellas biológicas– y la pedregosidad superficial favorecen que la erosionabilidad de estos suelos se reduzca, y que a escala de parcela las escorrentías sean relativamente límpias.

Teóricamente, en los ecosistemas áridos o semiáridos, un aumento de las precipitaciones y la reducción de las temperaturas debe dar lugar a una mejora en los suelos. Esto implicaría suelo más vegetados, más porosos y con mayor actividad biológica, y por lo tanto mayores aptitudes para la infiltración y retención de agua, menores escorrentías y pérdidas de suelo, etc. Este comportamiento teórico se ve reflejado en todos los parámetros cuando sólo se tienen en cuenta los dos extremos: la zona húmeda de Ma'ale Adumin y la zona árida de Kalia (Fig. 13). En este sentido se observa que la modificación del clima supone cambios en los suelos y por lo tanto en el ecosistema en general, lo que confirma al clima como el factor determinante de los procesos edáficos y geomorfológicos. Incluso se pueden inferir algunas implicaciones del efecto del previsto cambio climático sobre el funcionamiento de los ecosistemas (EYBERGEN, F. A. y IMESON, A. C. 1989; LAVÉE, H. *et al.*, 1991). Un aumento de la temperatura y de la aridez en la cuenca Mediterránea (WINGLEY, T.M.L., 1988) supondrá un descenso de la cubierta vegetal, cambios en la composición florística y estructura de las comunidades vegetales y, como se intuye a partir de los resultados aquí presentados, un aumento de las tasas de erosión y escorrentía, descenso de la infiltración y suelos con una mayor acumulación de sales, y menor materia orgánica que, obviamente, generaran escorrentías con mayor carga de solutos. En el caso del sudeste español –afectado por procesos de desertificación y desertización– el problema es también grave como han apuntado distintos autores (CANTÓN, 1999; CERDÀ, 1999; FERRÉ, 1997; SOLÉ *et al.*, 1997)

Cuando se analizan las tres zonas de estudio en conjunto se comprueba que no todos los parámetros mantienen comportamientos determinados por el clima. Esto es debido a que el impacto antrópico ha afectado la zona de estudio a dos escalas temporales distintas. Por una parte el ecosistema natural del desierto de Judea empezó a sufrir desde hace milenios la pérdida de su estabilidad a causa del pastoreo. Esto ha favorecido el empobrecimiento de los suelos, el aumento de las costras, la degradación de la flora y la reducción de la cubierta vegetal. En el caso del sudeste peninsular los usos han sido sin duda más protectores del suelo al haberse desarrollado, una agricultura en terrazas (FERRÉ *et al.*, 1994; RODRÍGUEZ-AIZPEOLEA *et al.*, 1991).

A una escala temporal más reducida, el pastoreo está siendo más intenso en unas zonas muy concretas del desierto de Judea. En esto influyen dos razones. La primera

es climática: la zonas más áridas como Kalia son poco afectadas por el pastoreo por su reducida productividad. La segunda es geopolítica. El desierto de Judea ha sido explotado por los beduinos durante milenios. Estos grupos de pobladores han sido nómadas y su uso de los pastos ha sido siempre *autosostenible*. Los pastores beduinos nunca agotaban los pastos en su totalidad, lo que junto a la reducida producción de biomasa explica la movilidad de estos habitantes. En la actualidad, el control israelí sobre el desierto de Judea (Territorio Ocupado) ha determinado un intento de asentar a la población y transformar la sociedad nómada beduina en una sociedad sedentaria. Además, las elevadas tasas de natalidad han generado un aumento espectacular de la población durante las últimas décadas y con ello una mayor presión sobre el medio. Ambas razones, crecimiento poblacional y cambios en las pautas migratorias, suponen una mayor presión sobre el suelo y con ello la explotación de los pastos hasta su límite en algunas zonas.

Mishor Adumin es una de las zonas afectadas negativamente por las anteriores características, mientras que Ma'ale Adumin y especialmente Kalia sólo es visitada por los beduinos esporádicamente. Esto supone que los suelos están menos alterados en superficie, ya que la densidad de pisadas es mucho menor y la presión sobre la vegetación es más reducida.

Las anteriores características explicarían que algunos de los parámetros eco-geomorfológicos presentados en este trabajo estén influidos por el clima, es decir, siguen las pautas marcadas por el gradiente climático, mientras que otros están determinados por el uso antrópico del suelo (ver tabla 6). Hay que decir que esta visión es simple, ya que en realidad los sistemas naturales tienen un funcionamiento determinado por multitud de factores que interactúan entre ellos (López Bermúdez, F. *et al.*, 1992). Además, los procesos que intervienen en los ecosistemas interactúan entre ellos por lo que las relaciones son difícilmente predecibles, tanto por la alta variabilidad como por su no linealidad (THORNES, J. B., 1985).

A pesar de lo anterior, es posible discernir que algunos procesos tienen comportamientos que responden al funcionamiento natural del sistema cuando el desierto de Judea estaba afectado de una forma sostenible por el pastoreo o ni siquiera estaba afectado por éste. Así, variables como la profundidad del suelo dependerían de los factores dominantes durante milenios, uno de ellos el clima, mientras que las características de las costras superficiales dependerían de las condiciones recientes, básicamente el sobrepastoreo.

Los resultados obtenidos con los experimentos demuestran que la mayoría de los factores y procesos responden a las condiciones actuales, de claro uso antrópico (tabla 6). Son excepciones la capacidad de retención de agua del suelo, en profundidad y en superficie, tanto antes como después de las lluvias, el tiempo en el que se inicia el encharcamiento, la profundidad del suelo y conductividad eléctrica de la escorrentía. Todos ellos influidos claramente por el clima.

Es de destacar que la cubierta total (musgos + líquenes + plantas + altura de las plantas) no muestra una clara influencia del gradiente climático. Esto seguramente debe ser consecuencia de los cambios en la cubierta vegetal y en la composición florística. En concreto se ha comprobado una reducción de las plantas y los musgos en la zona sobrepastoreada, pero en cambio la cubierta de líquenes aumenta de una forma ostensible.

**TABLA 6.**  
**RESPUESTA EROSIVA.**  
 Concentración de sedimentos (Sc), Sedimentos totales (Sy), Tasas de erosión (Er),  
 Conductividad eléctrica (Ec), Tendencia de la Concentración de sedimentos (TSc)  
 y de la Conductividad eléctrica de la escorrentía (TEc)

<i>PARCELAS</i>	<i>Sc</i> <i>g l<sup>-1</sup></i>	<i>Sy</i> <i>g</i>	<i>Er</i> <i>g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup></i>	<i>EC</i> <i>μS</i>	<i>TSc</i>	<i>TEc</i>
<b>Kalia</b>						
K1	0,76	5,89	32,02	65,07	-0,01	-3,07
K2	0,60	4,77	25,40	80,93	-0,02	-0,97
K3	1,04	7,95	43,09	115,97	-0,03	-4,77
K4	1,03	7,77	42,11	88,77	-0,02	-0,36
K5	0,63	3,90	21,04	58,28	-0,02	-1,06
K6	0,54	3,22	17,65	95,61	-0,03	-0,55
<b>Media</b>	0,77	5,58	30,22	84,11	-0,02	-1,8
<b>Mishor Adumin</b>						
M1	5,05	42,98	228,75	95,24	0,10	-0,78
M2	4,55	36,87	199,15	91,80	-0,06	1,17
M3	9,42	79,06	421,53	109,58	0,08	-0,92
M4	0,99	7,30	39,34	76,45	0,00	-1,43
M5	2,31	18,63	99,48	43,70	0,03	-0,63
M6	1,90	15,74	83,83	47,63	-0,03	-0,15
<b>Media</b>	4,04	33,43	178,68	77,4	0,02	-0,46
<b>Ma'ale Adumin</b>						
A1	0,39	2,53	13,69	68,65	-0,01	-1,69
A2	0,46	3,41	18,26	99,38	0,00	0,18
A3	0,74	6,11	32,52	86,28	-0,01	-1,17
A4	0,91	4,11	22,06	56,73	-0,06	-0,72
A5	0,85	3,64	19,66	48,48	-0,01	-0,72
A6	0,18	0,95	5,11	56,98	-0,01	-0,61
<b>Media</b>	0,59	3,46	18,55	69,42	-0,02	-0,79

La movilización de sedimentos y la producción de escorrentía está altamente determinada por el uso actual del medio, lo que es evidente para la pérdida de suelo, a pesar de que el principal factor de la erosión, la cubierta vegetal, es semejante en todas las zonas de estudio. Esto es debido a que las relaciones entre la vegetación y la erosión no son lineales, sino que responden a umbrales o bien son exponenciales (THORNES, J. B., 1985). En los ecosistemas semiáridos, donde la cubierta vegetal es muy reducida cambios ínfimos pueden significar alteraciones drásticas de la respuesta erosiva. Además, existe una alteración de las costras por el sobrepastoreo que favorece la movilización de los sedimentos con gran facilidad.

Además de las variaciones espaciales determinadas por el uso del suelo y el clima, los suelos del desierto de Judea, como en otros ambientes semiáridos, se caracterizan por el control que ejercen algunos actores particulares sobre los procesos de erosión. Destaca la importancia de las costras biológicas (ALEXANDER, R. W. y

CALVO, A., 1990), la vegetación (THORMES, J. B., 1976) y la pedregosidad (POESEN, J. e INGELMO, F., 1992) sobre los procesos de infiltración y erosión (CERDÀ, A., 1995). En general, en el desierto de Judea las tasas de infiltración son muy bajas, lo que explica que cortas pero intensas precipitaciones, típicas de los desiertos, produzcan escorrentías directas o Hortonianas (HORTON, R. E., 1933). Con lluvias de menor intensidad se pueden producir escorrentías no directas (YAIR, A. y LAVEE, H., 1985), incluso se han encontrado rasgos edáficos que confirman la existencia de flujos subsuperficiales (LAVEE, H. *et al.*, 1989).

A pesar de las abundantes escorrentías superficiales, las tasas de erosión son normalmente reducidas debido al efecto positivo de las costras y la pedregosidad, excepto donde el sobrepastoreo altera los suelos y favorece tasas de erosión elevadas.

## 6. CONCLUSIONES

Los suelos del Desierto de Judea generan abundantes y rápidas escorrentías, las cuales son fruto de rápidos encharcamientos y tasas de infiltración muy reducidas. Esto significa que las máximas tasas de escorrentía se alcanzan súbitamente.

Se ha comprobado que las zonas con mayores precipitaciones y menores temperaturas medias anuales presentan mayores tasas de infiltración. Ello supone menores escorrentías, las cuales son menos salinas, y pérdidas de suelo reducidas. Pero esta tendencia se ha visto drásticamente alterada por el sobrepastoreo en la zona intermedia del gradiente climático aquí estudiado. Allí, las costras están alteradas, los depósitos de polvo son importantes y la cubierta vegetal es reducida y su composición florística y estructura alterada. Eso produce un aumento de la concentración de sedimentos en la escorrentía, los caudales y con ello un drástico aumento de las tasas de erosión.

Si bien el clima determina los procesos geomorfológicos y edáficos, el uso antrópico genera alteraciones tales que consiguen modificar las relaciones existentes entre las variables climáticas y geomorfológicas. Por lo tanto, un mal uso del suelo puede ser más perjudicial que la modificación del clima como consecuencia del previsto cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de todos los componentes del *Laboratory for Geomorphology and Soils* de la *Bar-Ilan University*, en especial O. Ackermann, S. Pariente, H. Zhevelev, A. Fragin y T. Svorai. El soporte financiero ha sido aportado parcialmente por el proyecto ERMES (*Commission of the European Communities: Environment*, 1990-1994, EV5V-CT91-0023) y la *Conselleria de Educació i Ciència* de la *Comunitat Valenciana*. La redacción del trabajo ha sido posible por la concesión de una beca de Perfeccionamiento de Doctores y Tecnólogos en el Extranjero por el Ministerio de Educación y Ciencia al primero de los autores, y al proyecto CLI-95-1980. E. Bochet tradujo el resumen al Francés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAMS, A. D. y PARSONS, A. J. (1994): *Geomorphology of Desert environments*. Chapman and Hall, London, 674 p.
- ALEXANDER, R. W. y CALVO, A. (1990): The influence of lichens on slope processes in some Spanish Badlands. En Thornes, J.B. (Ed.): *Vegetation and Erosion: Process and Environments*, 385-398.
- CANTÓN, Y. (1999): *Efectos hidrológicos y geomorfológicos de la cubierta y propiedades del suelo en paisaje de cárcavas*. Tesis Doctoral, CSIC-EEZA, Almería, 390 p.
- CERDÀ, A. (1993a): *La Infiltración en los Suelos del País Valenciano. Factores y Variaciones Espacio-Temporales*. Tesis Doctoral Inédita, Universitat de València, 357 p + apéndices.
- , (1993b): Metodología para el estudio de la hidrología y erosión de superficies degradadas (badland) a partir de lluvia simulada. *Cuaternario y Geomorfología*, 7.
- , (1995): *Factores y Variaciones Espacio-Temporales de la Infiltración en los Ecosistemas Mediterráneos*. Editorial Geofoma, 159 p.
- CERDÀ, A. y LAVÉE, H. (1994): Respuesta a la lluvia simulada de los suelos del Desierto de Judea. Kalia. Israel. En Arnáez, J. García Ruiz, J. M. y Gómez Villar, A. (Eds.): *Geomorfología en España*, 133-142.
- CERDÀ, A. (1999): Seasonal and spatial variations in infiltration rates in badland surfaces under mediterranean climatic conditions. *Water Resources Research*, 319-328.
- COOKE, R. U., WARREN, A. y GOUDIE E. A. S. (1993): *Desert Geomorphology*. UCL Press, London.
- ERMES (1995): *Modelling and Exploring the Impact of Climatic Change on Ecosystem Degradation, Hydrology and Land Use along a Transect across the Mediterranean. Final Report*. Amsterdam, 600 ff.
- EYBERGEN, F. A. y IMESON, A. C. (1989): Geomorphological processes and climatic change. *CATENA*, 16, 307-319.
- FERRÉ, E. (1997): Estados erosivos en la cuenca media del río Andarax. *Cuadernos Geográficos*, 27, 153-169.
- FERRÉ, E., ASENSI, A., SENCIALES, J. M<sup>a</sup>. (1994): Procesos de erosión y dinámica de la vegetación en bancales abandonados en el Valle del Andarax (prov. de Almería). En GARCÍA-RUIZ, J. M., y LASANTA, T. (Eds.): *Efectos Geomorfológicos del abandono de tierras*. SEG-IPE, Geofoma Ediciones, Logroño, 31-42.
- HORTON, R. E. (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS Trans A. G. U.*, 14, 446-460.
- , (1940): An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 5, 399-417.
- IMESON, A. C. y VERSTRATEN, J. M. (1988): Rills on badland slopes: a physico-chemical controlled phenomenon. *Catena supplement* 12, 139-50.
- LAVEE, H., IMESON, A. C., PARIENTE, S. y BENYAMINI, Y. (1991): The response of soils to simulated rainfall along a climatological gradient in an arid and semiarid region. *Catena Supplement*, 19, 19-37.
- LAVEE, H., PARIENTE, S., ZHEVELEV, H., FRAGIN, A., y SVORAI, T. (1994): *Final Report ERMES ECC Research Project: Modelling and exploring the impact of climatic change on ecosystem degradation, hydrology and land use along a transect across the Mediterranean*. Bar-Ilan University, Laboratory for Geomorphology and Soils, Ramat-Gan, Israel, 38 p.
- LAVEE, H., WIEDER, M. y PARIENTE, S. (1989): Pedogenic Indicators of Subsurface Flow on Judean Desert Hillslopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 545-555.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F., RUBIO RECIO, J. M. y CUADRAT, J. M. (1992): *Geografía Física*. Editorial Cátedra, 594 p.
- POESEN, J. e INGELMO, F. (1992). Runoff and sediment yields from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena*, 19, 123-132.
- RODRÍGUEZ AIZPEOLEA, J., PÉREZ BADIA A, R. y CERDÀ BOLINCHES, A. (1991) Colonización vegetal y producción de escorrentía en bancales abandonados: Vall de Gallinera, Alicante. *Cuaternario y Geomorfología*, (1-4) 119-130. 1991.
- SHAINBERG, I., ROADES, J. D. y PRATHER, R. J. (1981): Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 273-277.
- SOLÉ, A., CALVO, A., CERDÀ, A., LÁZARO, R., PINI, R. y BARBERO, J. (1997): Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31, 23-38. 1997.

- THORNES, J. B. (1976): *Semi-arid erosion systems: case studies from Spain*. Geogr. Papers, nº 7, London School of Economics.
- , (1985): The ecology of erosion. *Geography*, 70 (3), 222-36.
- , (1994): Catchment and Channel Hydrology. En Abrahams, A. D. y Parsons, A. J. (Eds.): *Geomorphology of Desert environments*, 257-287.
- WINGLEY, T. M. L. (1988): Future climate of the Mediterranean basin with particular emphasis on changes in precipitation. Proceedings of the UNEP Workshop: *Impact of the Climatic Change in the Mediterranean*. Split.
- YAIR, A. y LAVEE, H. (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones. En Anderson y Burt, T.P. (Eds.): *Hydrological Forecasting*, 183-220.
- YAIR, A., LAVEE, H., BRYAN, R. B. y ADAR, E. (1980): Runoff and erosion processes And rates in the Zin Valley Badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 205-225.