

INFLUENCIAS DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS EN EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y EROSIVO DE LOS SUELOS EN LOS CORDONES DUNARES DE NIZZANA, DESIERTO DEL NEGEV, ISRAEL

Artemi Cerdà

Departament de Geografia. Universitat de València. 22060, 46080 València
Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE (CSIC, Universitat de València,
Generalitat Valenciana). Camí Real, s/n, 46470 Albal, València

Resumen: También en las dunas es relevante la erosión hídrica al determinar la remoción y la redistribución de los sedimentos en los cordones dunares. En esto ejerce un papel clave las costras biológicas y la vegetación, ya que determinan las tasas de infiltración, escorrentía y erosión. Mediante el uso de lluvia simulada se ha comprobado como los suelos arenosos desnudos tienen altas tasas de infiltración que evitan pérdidas de agua y sedimentos por escorrentía. Los suelos con costra biológica generan grandes escorrentías, que aunque bastante limpias de sedimentos contribuyen en total con mayores tasas de erosión. Las costras maduras (macroporos) favorecen mayores infiltraciones y por lo tanto una reducción de las escorrentías y de la producción de sedimentos. Finalmente, la cubierta de plantas impide la formación de escorrentía y con ello de erosión por arroyadas superficiales. Las costras biológicas y su evolución son la clave en la explicación de la variabilidad espacio-temporal de las tasas de escorrentía y erosión en las zonas dunares como es el caso de las de Nizzana en el oeste del Desierto del Negev en Israel.

Palabras clave: Hidrología, Erosión, Dunas, Costra, Desierto de Negev.

Abstract. The fluvial erosion is also outstanding in the dunes where it determines the remotion and redistribution of sediment in the sandy ridge. The biologic crust and the vegetation are the key factors of the infiltration, runoff and erosion rates of soils. By means of the simulated rainfall was found that the sandy bare soils reach very high infiltration rates

which avoid water and sediment losses. The soils with biologic crust results in very high runoff rates, which were clean of sediments but resulted in the greater erosion rates. The mature crust (macropores) develops greater infiltration rates, and as a consequence a reduction of the sediment and runoff production. Finally, the plant cover prevents the runoff production and the erosion by surface wash. The biologic crusts and his evolution are the key in the explanation of the spatial and temporal variability of the runoff and erosion in the dune areas such as the Nizzana in the western Negev Desert.

Key words: Hydrology, erosion, dunes, crust, Negev Desert.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas áridos y semiáridos vienen definidos por las escasas precipitaciones, la rala cubierta vegetal y el reducido desarrollo de los suelos. Esto, junto a regímenes de precipitación caracterizados por elevadas intensidades y por su irregularidad da lugar a la formación de costras, las cuales determinan el flujo hídrico en los suelos y en las laderas durante las lluvias. En general se asume que en medios semiáridos la escorrentía se genera según el modelo Hortoniano, es decir por exceso de infiltración (Horton, 1933), lo que supone que la escorrentía superficial es el agente geomorfológico más importante. Esto ha sido puesto en duda por distintos autores por las altas tasas de infiltración de gran parte de los suelos mediterráneos (Cerdà, 1995), por la existencia de zonas de reinfiltración en las zonas coluviales (Yair & Lavee, 1985), o en las matas de vegetación más densa (Dunkerly & Brown, 1995; Cerdà, En prensa a), y por las reducidas precipitaciones que impiden la saturación de los suelos (Yair & Lavee, 1981).

En las zonas arenosas como las dunas o en los suelos desarrollados sobre areniscas, donde la conductividad hidráulica es muy alta (Dunne & Dietrich, 1980; Luk *et al.*, 1986; Romero, 1986; Cerdà, 1994), las dudas sobre la existencia de la escorrentía superficial directa como la explicó Horton (1933) son más que justificadas. En cambio, las superficies encostradas favorecen la rápida y abundante producción de escorrentías superficiales como consecuencia de la reducción de la conductividad hidráulica de la capa superficial del suelo (Ellison, 1947; Morin *et al.*, 1981).

En otro sentido, la disminución de la capacidad de infiltración de los suelos por las costras da como resultado la reducción de la recarga del acuífero, el cual es esencial para la supervivencia de las poblaciones en zonas desérticas, ya que los flujos superficiales perennes son insignificantes. Los procesos de recarga de los acuíferos están directamente relacionados con la cantidad de agua infiltrada en el suelo y las zonas arenosas son las más propicias para ello debido a su elevada conductividad hidráulica. Sólo las

costras superficiales impiden la infiltración y posterior percolación del agua. Esto, junto a la hidrofobia propia de las arenas da lugar a la formación de escorrentías superficiales que impiden la infiltración profunda del agua (Bond & Harris, 1964; DeBano, 1971).

La relación entre la lluvia y la escorrentía muestra las interacciones básicas entre la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera. Conocer estas relaciones bajo condiciones controladas artificialmente (lluvia simulada) permite prever los procesos de escorrentía y erosión, y también el agua disponible para la percolación al acuífero. Normalmente, en suelos arenosos vegetados o no encostrados la escorrentía superficial es insignificante debido a las altas tasas de infiltración (Abrahams *et al.*, 1988; Lauren *et al.*, 1988; Cerdà, 1994), pero cuando las costras –químicas, físicas o biológicas– aparecen la relación lluvia-escorrentía es modificada drásticamente (Farres, 1978; Bradford *et al.*, 1987).

En las zonas dunares se produce –en el espacio, y también en el tiempo– una alternancia entre zonas desnudas y zonas cubiertas por una lámina de algas y líquenes, la cual reduce la capacidad de infiltración de los suelos, por lo que es considerada una costra biológica (Jungerius & van der Meulen, 1988; Morin *et al.*, 1989). En general estas zonas son bastante estables, pero en ocasiones se produce la destrucción o degradación de la costra y el suelo queda desprovisto de esta capa protectora. En este trabajo, y tras un estudio de las distintas superficies existentes en la zona, se han seleccionado cuatro unidades de suelo: suelo desnudo, suelo recientemente encostrado, suelo cubierto por una costra madura en la que los macroporos desarrollados por los animales son muy abundantes y suelo vegetado con plantas superiores. Estos cuatro tipos de zonas a su vez corresponden a cuatro estadios en la evolución de una superficie dunar al pasar el suelo arenoso a ser colonizado por líquenes, algas, etc., y desarrollarse una costra superficial que con el tiempo es degradada por la presencia de animales como las arañas o las hormigas. Un último estadio en la evolución de estas superficies es la colonización por la vegetación. La degradación de forma natural o antrópica de cualquiera de las anteriores situaciones supondría la vuelta a la situación inicial: la superficie dunar desnuda.

El objetivo de esta investigación es determinar como distintas costras superficiales afectan la hidrología de los suelos del complejo dunar de Nizzana en el Desierto de Negev. Para ello se seleccionaron nueve parcelas que corresponden a los tres tipos de superficies mencionados: suelo desnudo (dos parcelas), suelo encostrado recientemente (tres parcelas), suelo con costra madura (dos parcelas) y suelo vegetado (dos parcelas). Aunque en las zonas dunares la erosión eólica es el agente geomorfológico más importante, también es destacable la erosión hídrica en la redistribución de los sedimentos

a lo largo de los cordones dunares en zonas áridas y semiáridas (Abrahams & Parsons, 1994).

2. MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El campo de dunas de Nizzana, situado al sur de Israel, en la frontera con Egipto, forma parte de una gran superficie dunar que ocupa el norte de la Península del Sinaí (fig. 1). Esta zona arenosa situada al norte del Desierto

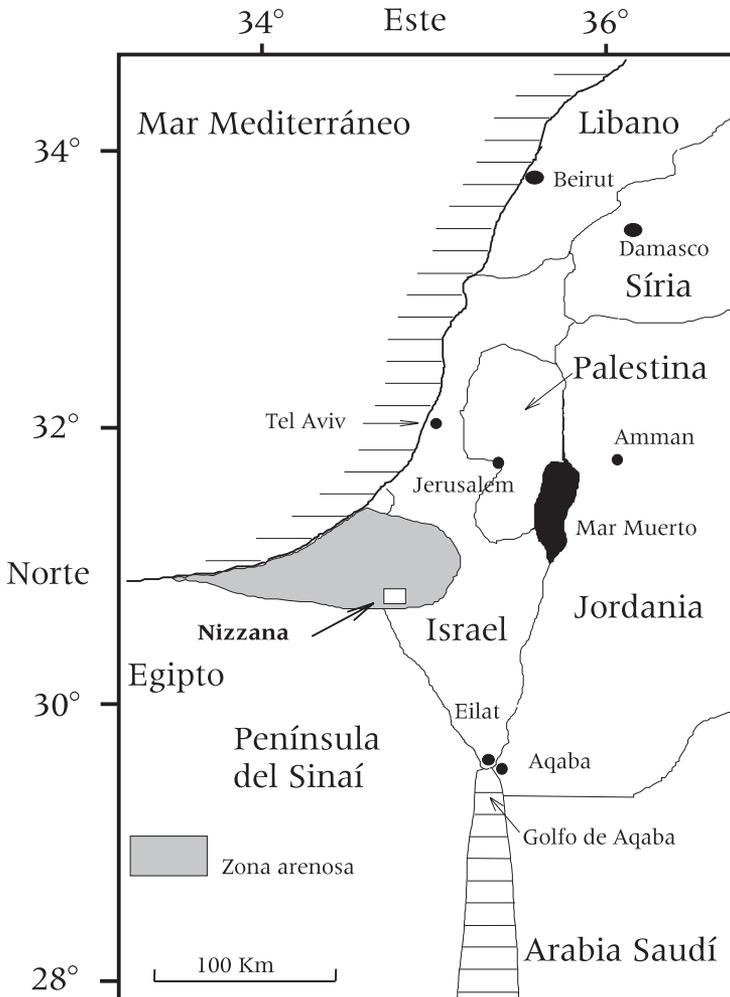


Figura 1: Localización de la zona de estudio.

del Negev presenta largas dunas lineales de oeste a este separadas por amplios cordones interdunares (Yair *et al.*, 1997). Las dunas no presentan signos de movilización lateral, por lo que han sido consideradas como estabilizadas (Tsoar & Moller, 1986) (fig. 2).

La zona de Nizzana recibe una media de 95 mm de precipitación anual concentrada entre octubre y mayo, aunque la tormentas más significativas se producen entre enero y marzo (Rosenan & Gilad, 1985). La tasa de evapotranspiración potencial es de 2.200 mm (Zangvill & Druyan, 1983). Desde el punto de vista geomorfológico, Yair (1990) distinguió dos grandes zonas: el cordón arenoso y la zona entre dunas. De esta última resaltó la presencia de varios tipos de superficies: las acumulaciones de arena, y las *playas* (zonas llanas, ricas en limos y sin vegetación), que en ocasiones aparecían disectadas marcando antiguos niveles de regularización.

El cordón arenoso dunar, sobre el cual se ha realizado el presente estudio, se compone de dos unidades: la zona activa y la inactiva o basal. La primera ocupa el 25% del área y se encuentra en la parte superior de las dunas y tiene una pendiente media de 32°. Los suelos de esta zona están básicamente constituidos por arena, ya que las arcillas y los limos no superan nunca el 5%,



Figura 2: Vista de la zona de estudio.

y la materia orgánica es insignificante ($< 0,1\%$). La vegetación es escasa y allí se produce la mayor parte de la erosión eólica del área (Yair, 1990).

La zona inactiva o basal presenta pendientes menores ($< 15^\circ$), y ocupa el 75% del cordón dunar. La vegetación en esta zona ocupa más del 50%, y es muy densa en la ladera norte. Allí se desarrollan costras, principalmente de carácter biológico, lo que explica contenidos en materia orgánica que pueden alcanzar el 2%. Esta costra superficial es muy rica en limos ($< 50\%$), lo que junto a la presencia de algas y musgos le confiere una gran consistencia en comparación con los suelos desprovistos de vegetación. En esta zona no existen evidencias de erosión eólica, aunque sí parece evidente la deposición de materiales finos procedentes de otros ambientes menos vegetados. Este es el subambiente en el que se ha llevado a cabo la investigación.

2.2. Experimentos con lluvia simulada

En este trabajo se investiga el problema de la conversión lluvia-escorrentía en zonas dunares mediante el uso de lluvia simulada bajo condiciones controladas, y se profundiza en el comportamiento hidrológico y erosivo de los suelos del cordón dunar haciendo especial hincapié en el control que ejerce la costra. El uso de lluvia simulada ha permitido una más rápida y eficiente investigación (Meyer, 1994).

El simulador de lluvia utilizado es del tipo pulverizador, y el tamaño de las parcelas de $0,24 \text{ m}^2$, aunque el área humectada es superior a 1 m^2 (ver figs. 3 y 4). La lluvia simulada siempre se ha producido con agua desionizada debido a la importancia de las sales en la generación de la escorrentía en los suelos encostrados (Shainberg *et al.*, 1981).

Los experimentos consistieron en chaparrones de una intensidad de $50,36 \text{ mm h}^{-1}$ mantenida durante el tiempo necesario para conseguir la estabilidad de la escorrentía y con ello conocer el hidrograma completo y la tasa de infiltración final estable. Los experimentos duraron como mínimo treinta minutos (entre treinta y treinta y cinco minutos), y en cuatro casos (suelos vegetados y desnudos) se alcanzaron los cincuenta minutos.

Chaparrones de estas intensidades son poco frecuentes (Yair, 1990), pero sin duda son los que realizan el trabajo geomorfológico más importante. El caudal se midió a intervalos de un minuto y se tomaron muestras cada cinco minutos (entre cinco y siete muestras en total) con el fin de conocer la concentración de sedimentos de la escorrentía, la salinidad y las tasas de erosión. En cada parcela se ha medido al menos cuatro veces estas variables a intervalos regulares con el fin de conocer sus variaciones temporales. La conductividad eléctrica de la escorrentía se midió directamente en el campo



Figura 3: Vista del simulador de lluvia durante uno de los experimentos sobre un suelo vegetado, VGI.

tras el filtrado de ésta (Navas, 1990). 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 una ecuación del tipo $y = a + b(x)$, mostrando el parámetro *b* la tendencia positiva (+) o negativa (-) de estas variables a lo largo del experimento. Una detallada explicación de la metodología y el tratamiento de los datos se puede encontrar en Cerdà (1993a; 1993b; 1995; 1996).

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 su humedad 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, aunque en los diez días previos a la realización de los experimentos no se había producido ninguna precipitación.

Se realizaron nueve experimentos en distintas superficies representativas de las zonas desnudas del cordón dunar, donde la clave de la estabilización de las superficies está en el desarrollo de las costras. En primer lugar se

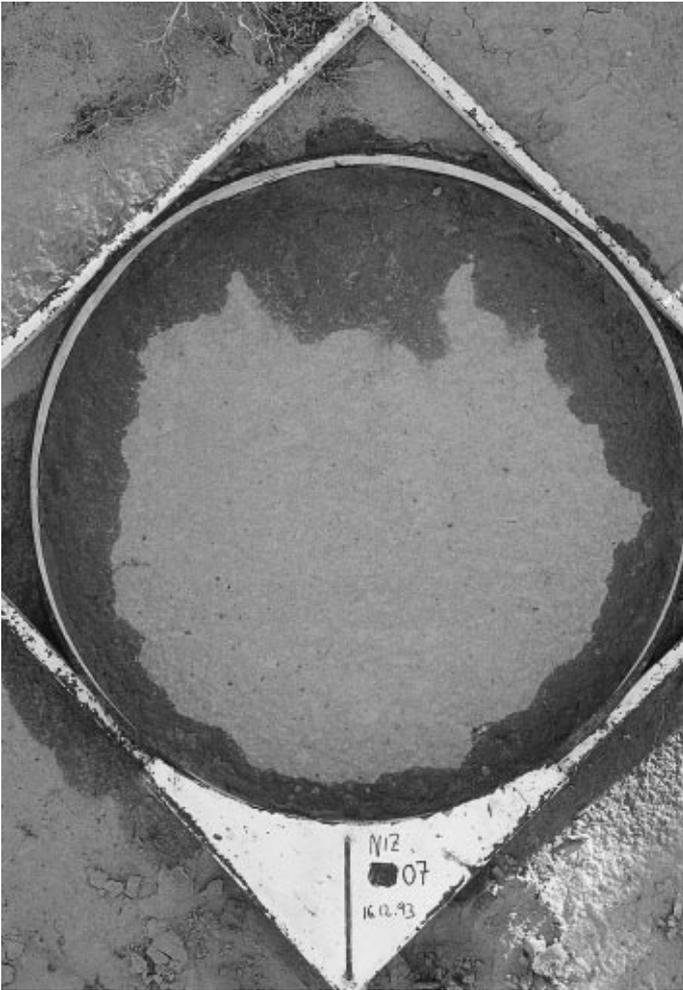


Figura 4: Vista de la parcela DD1. Suelo Desnudo. La zona cercana al borde de la parcela era humectada previamente para evitar la destrucción de la costra durante la instalación de la parcela.

seleccionaron dos parcelas representativas de la zona sin costra biológica o desnuda (DD1 y DD2) en las que menos de un 20% de la superficie sufría un proceso de encostramiento, ya fuera biológico, físico o químico (fig. 4). Las parcelas CJ1, CJ2 y CJ3 (Costra Joven) corresponden a suelos afectados por el encostramiento biológico en más de un 70% de su superficie, pero que es relativamente reciente e incipiente (fig. 5). Las parcelas CM1 y CM2 (Costra Madura) son ejemplo de los suelos donde la costra superficial está muy desarrollada y en los que destaca la presencia de macroporos producto de la actividad de la fauna (hormigas y arañas principalmente) y la presencia, aunque reducida (< 5%), de hierbas y matas de bajo porte (fig. 6). Y finalmente, las parcelas VG1 y VG2 (suelo Vegetado) representan las superficies cubiertas con plantas superiores, que en este caso son matorrales (fig. 3). Hay

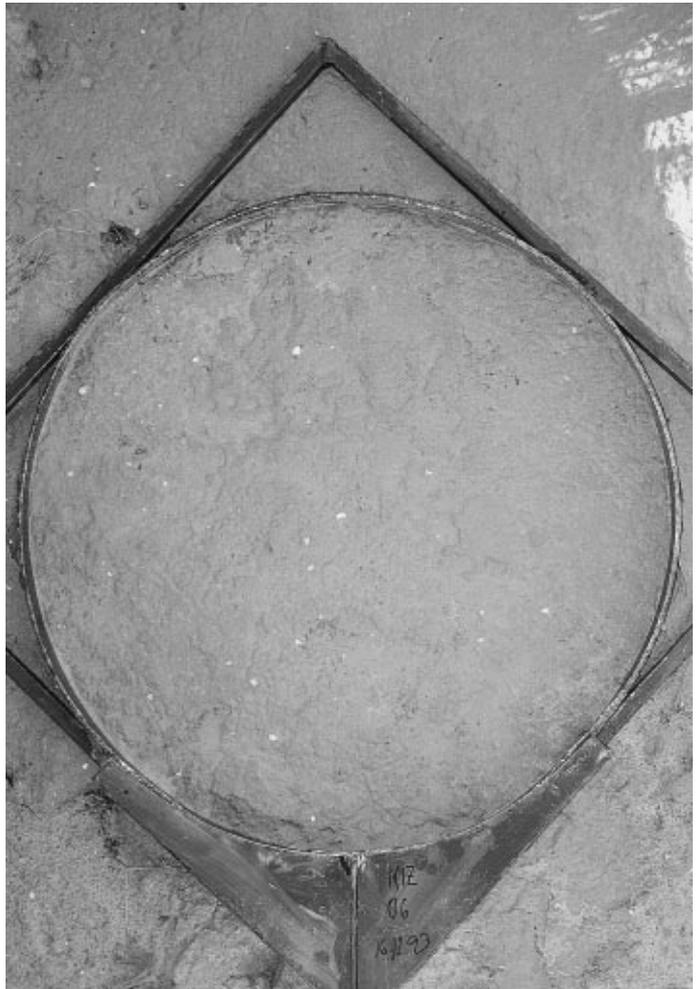


Figura 5: Vista de la parcela CJ1. Suelo con Costra Joven. En algunas zonas de la parcela, como en la parte superior izquierda, la costra aparecen cubierta por arenas.

que resaltar que dentro de las parcelas existen distintos tipos de superficies. Así en el suelo encostrado también se aprecia la presencia de zonas no encostradas y al revés, lo que puede alterar o modificar ligeramente la respuesta hidrológica-erosiva de las costras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunas características de las parcelas experimentales y de la respuesta hidrológica de los suelos se muestran en las tablas 1, 2, 3 y 4. Los hidrogramas, la evolución de la concentración de sedimentos y de la conductividad eléctrica durante los experimentos se muestran en la figura 7 y los cambios en la humedad del suelo en la figura 8.



Figura 6: Vista de la parcela CM1. Suelo con Costra Madura. En las zonas con costra más madura además de la presencia de macroporos existe una incipiente colonización de herbáceas y pequeñas matas.

3.1. Encharcamiento e inicio de la escorrentía

El tiempo de encharcamiento (tp) indica el momento en el que la capa superficial del suelo ha alcanzado la saturación. En las nueve parcelas medidas tp oscila entre 50'' y 20' 45''. El valor medio de tp es de 5' 39'' para los suelos sin costra, de 1' 03'' en los suelos con costra joven, de 1' 16'' en los de costra madura y de 16' en los suelos vegetados con plantas superiores.

El tiempo de inicio de la escorrentía superficial (ts) y el de su medición en el colector (tr) se produce de forma muy retrasada en los suelos desnudos, mientras que en los suelos encostrados la transformación de los charcos en escorrentía es mucho más rápida. En término medio, tr se produce después de 2' 07'' en los suelos con costra joven, de 3' 22'' en aquellos con costra

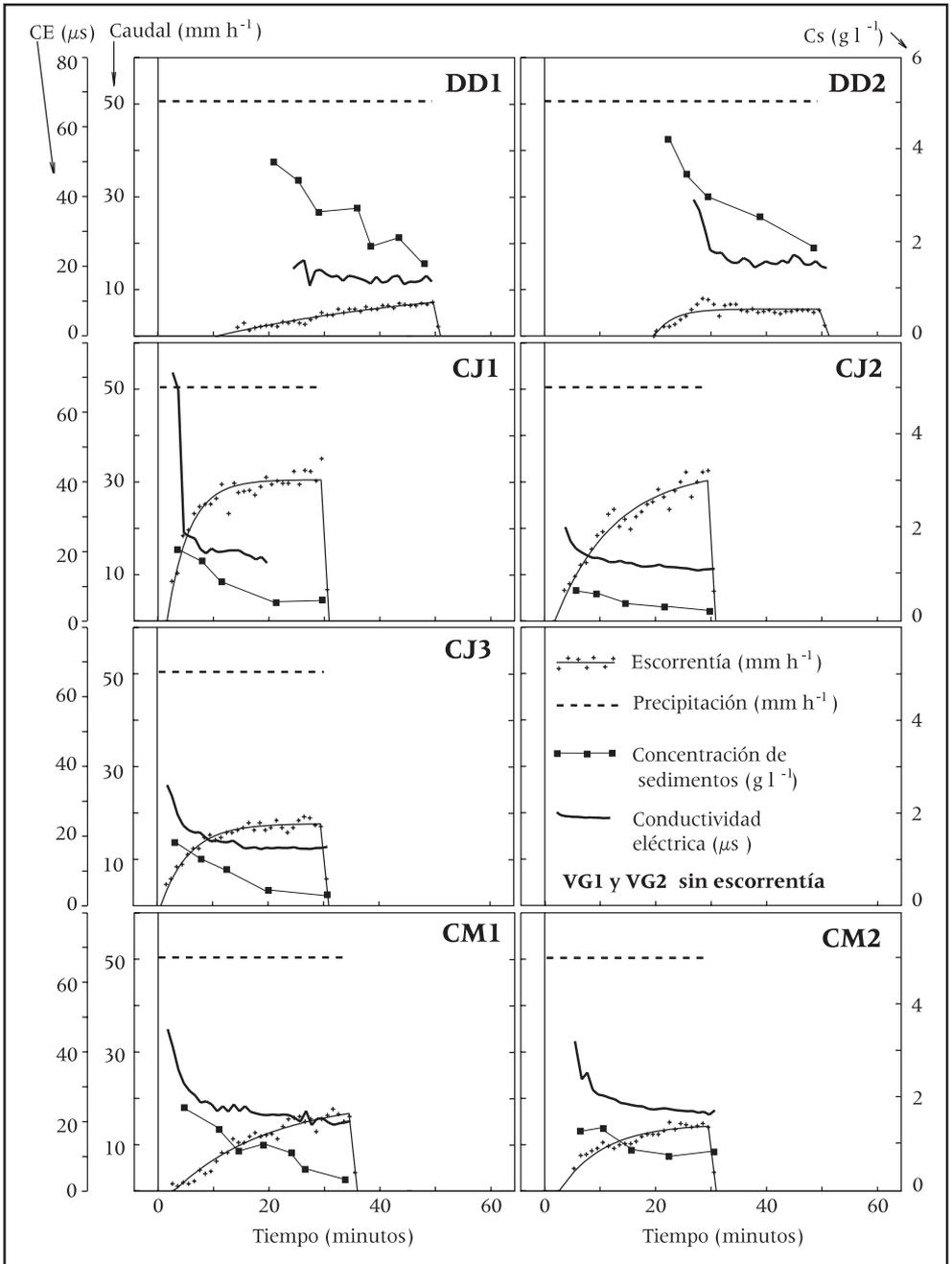


Figura 7: Hidrogramas, hietogramas, concentración de sedimentos y conductividad eléctrica de la escorrentía en las parcelas estudiadas en Nizzana. Las dos parcelas vegetadas no generaron escorrentía.



Figura 8: Vista del frente de humedad del suelo de la parcela CJ1.

madura, 16' 33'' en los suelos desnudos y no se produce o es muy retrasada en los suelos vegetados (tabla 1).

Tabla 1. Tiempo de inicio del encharcamiento (*tp*), tiempo de inicio de la escorrentía superficial (*ts*) y tiempo de la medición de la escorrentía en el colector (*tr*). se, sin escorrentía.

Parcelas	DD1	DD2	CJ1	CJ2	CJ3	CM1	CM2	VG01	VG2
<i>tp</i> (min)	3' 37''	7' 40''	0' 50''	1' 20''	0' 54''	1' 41''	1' 10''	20' 45''	11' 15''
<i>ts</i> (min)	9' 40''	18' 00''	1' 20''	1' 40''	1' 10''	1' 50''	1' 30''	se	25' 35''
<i>tr</i> (min)	13' 40''	19' 25''	2' 00''	3' 07''	1' 16''	2' 10''	4' 35''	se	se

3.2. Infiltración, escorrentía y humedad del suelo

Los volúmenes de escorrentía generados por las distintas parcelas han sido también muy dispares. Los coeficiente de escorrentía (*Ce*) oscilan entre 0 y 50% para el total del experimento. Para los intervalos 0-15 minutos (*Ce*₁₅) y 15-30 minutos (*Ce*₃₀) los valores oscilan entre 0 y 41% y entre 0 y 50% respectivamente. En valores medios, las superficies desnudas gene-

ran escorrentías del 6,5%, las costras jóvenes del 43%, las costras maduras del 19,5% y finalmente los suelos vegetados del 0% de la precipitación. Cabe destacar que para los primeros quince minutos de lluvia la escorrentía no se produjo en los suelos desnudos ni en los vegetados, mientras que en los encostrados se produjo de forma muy rápida y abundante (24-41%) y en menor magnitud en los suelos con costra madura (10-13%). Esta diferencia en la escorrentía entre tipos de superficies y parcelas se muestra en la figura 7 por medio de los hidrogramas e hietogramas de cada experimento.

La tasa de infiltración final estable (f_c) oscila entre 18 y 50,36 mm h⁻¹. Por tipos de superficies y en valores medios, los suelos desnudos superan los 41 mm h⁻¹, los encostrados no alcanzan los 44 mm h⁻¹ y aquellos con costras maduras están en 33 mm h⁻¹. En los vegetados se infiltró el 100% de la precipitación (50,36 mm h⁻¹). El volumen de lluvia infiltrado en los intervalos 0-15 y 0-30 minutos ($Vi15$ y $Vi30$ respectivamente) muestra que en los suelos desnudos se infiltra toda la lluvia en el primer caso y es muy reducida en el segundo. En los suelos encostrados la infiltración es más reducida, especialmente en aquellos con una costra reciente, donde el volumen de lluvia infiltrado es un 30% mayor.

Tabla 2. *Parámetros hidrológicos más significativos. Coeficiente de escorrentía (Ce), coeficiente de escorrentía durante los primeros quince minutos (Rc15), coeficiente de escorrentía durante el intervalo 15-30 minutos (Rc30), tasa de infiltración final estable (fc), volumen infiltrado durante los primeros quince minutos (Vi15), volumen infiltrado durante el intervalo 15-30 minutos (Vi30), y profundidad del frente de humedad.*

Parcela	DD1	DD2	CJ1	CJ2	CJ3	CM1	CM2	VG1	VG2
Ce (%)	7	6	50	40	29	20	19	0	0
Rc15 (%)	0	0	41	26	24	10	13	0	0
Rc30 (%)	3	3	50	41	29	18	19	0	0
f_c (mm h ⁻¹)	38	45	20	18	23	30	36	> 50,36	> 50,36
$Vi15$ (mm)	12,52	12,58	7,45	9,32	9,62	11,35	11,00	12,59	12,59
$Vi30$ (mm)	24,35	24,42	12,47	14,94	17,84	20,55	20,27	25,18	25,18
Frente de humedad (cm)	22	20	14	12	12	12	12,5	21	24

En cuanto a los frentes de humedad, alcanzan profundidades de hasta 24 cm. En el suelo desnudo (DD1), su elevada capacidad de infiltración y la mayor duración del experimento (cincuenta minutos) explica la profundidad media de 22 cm. También ocurre lo mismo en el otro suelo desnudo (DD2) con 20 cm de profundidad del frente de humedad y 45 mm h⁻¹ de tasa de infiltración final estable. En los suelos encostrados la penetración del frente de humedad oscila entre 12 y 14 cm, y no se aprecia ninguna diferencia entre los suelos con costra joven (CJ) y con costra madura (CM). Los suelos vegetados también muestran frentes de humedad profundos debido a las altas tasas de infiltración y a la duración del experimento (cincuenta minutos) (ver tabla 2).

En todos los casos los frentes de humedad fueron muy uniformes y homogéneos a lo largo del perfil del suelo (ver ejemplo de la fig. 8). También en las siete parcelas los frentes de humedad fueron simples y no mostraron la influencia de la presencia de macroporos, especialmente abundantes en las parcelas con costra madura. En este último caso se observó como parte de la escorrentía se reinfiltraba en los macroporos, pero una vez finalizado el ex-

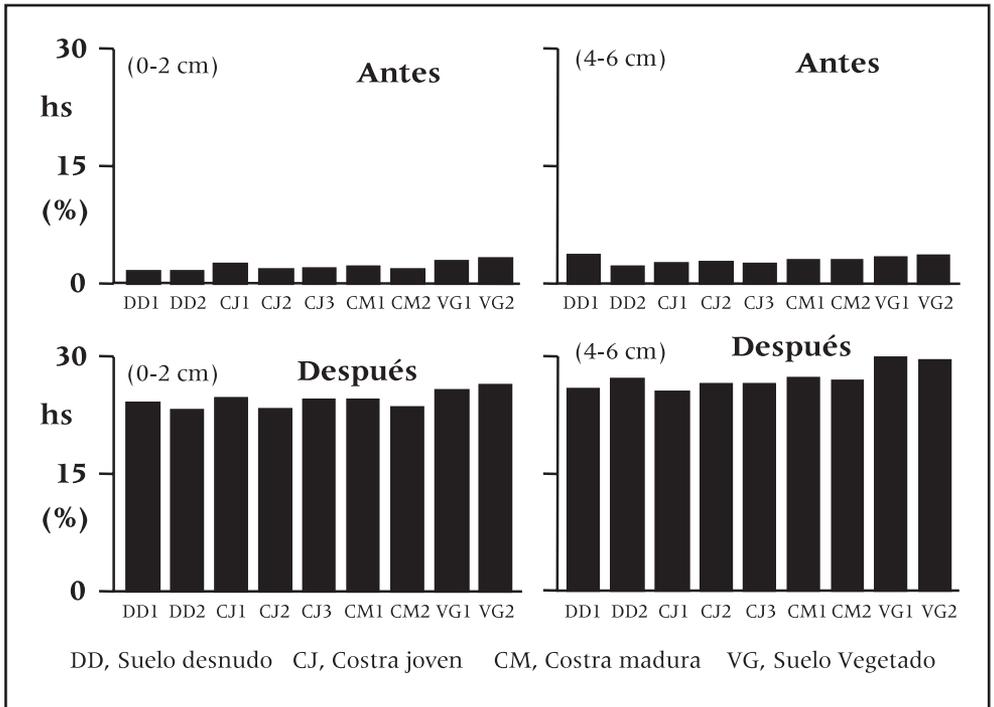


Figura 9: Distribución de frecuencias de la humedad del suelos antes y después de los experimentos y a 0-2 y 4-6 cm de profundidad para todas las parcelas estudiadas.

perimento no se apreció su efecto en el frente de humedad. En otros suelos donde si se ha observado el flujo concentrado en los macroporos los frentes de humedad han mostrado formas irregulares y frentes múltiples (Cerdà, 1995). Posiblemente, durante los primeros minutos del experimento si se produjo la infiltración a través de los macroporos, pero una vez saturada la capa superficial del suelo la infiltración pasó a ser dominada por el flujo a través de la matriz, como lo demuestra el frente de humedad homogéneo y único.

La humedad del suelo sufrió cambios drásticos durante el experimento (fig. 9). Los valores oscilaron entre 0,56 y 1,98% en superficie (0-2 cm) y 1,34 y 3,32% entre 4 y 6 cm. Después del experimento los valores de la humedad del suelo alcanzaron 17,54-23,21% en superficie y 18,22 y 27,20% en el horizonte inferior (2-4 cm). Las diferencias entre parcelas fueron poco significativas, y no se encontró un patrón claro que distinguiera unas de otras. Sólo es de destacar la mayor humedad del suelo después del experimento y que los suelos vegetados tengan una ligera mayor capacidad de retención hídrica.

3.3. Concentración de sedimentos y erosión

La concentración de sedimentos media (C_s) en la escorrentía osciló entre 0,69 y 3,21 g l⁻¹. En los suelos desnudos la concentración de sedimentos fue de 2,1 g l⁻¹, mientras que en los suelos con costra joven fue de 0,8 g l⁻¹ y en aquellos donde la costra es madura fue ligeramente mayor: 1 g l⁻¹. Los suelos vegetados no generaron escorrentía, y por lo tanto la concentración de sedimentos y las tasas de erosión fueron nulas.

La concentración de sedimentos en la escorrentía decrece rápidamente desde el inicio de la lluvia. Hay una clara tendencia negativa como lo demuestran los valores del parámetro TC_s , el cual oscila entre -0,63 y -0,05. La pérdida de carga sedimentaria de la escorrentía se debe al lavado de los suelos por la escorrentía, lo que demuestra que el proceso de erosión está controlado por la cantidad de sedimentos susceptibles de ser erosionados los cuales se van agotando con el tiempo (Morgan, 1986). Aquellos suelos con escorrentías más cargadas de sedimentos, los desnudos, son los que presentan una mayor reducción de la concentración de sedimentos (-0,59), lo que sin duda se debe a la mayor disponibilidad de sedimentos al inicio de la lluvia. Tras 50 minutos de lluvia se ha comprobado como en los suelos desnudos se había producido el desarrollo de una costra de origen mecánico (impacto de gotas) que explicaría la reducción de la erodibilidad del suelo. Los suelos con costras jóvenes tienen escorrentías más limpias y en las que la reducción de la concentración de sedimentos es reducida (-0,07), mientras que cuando las costras son maduras hay un ligero aumento del valor de este parámetro (-0,17).

La tasa de erosión media oscila entre 9,24 y 23,75 g m² h⁻¹. La tasa de erosión media por unidades de suelo es de 10,3 g m² h⁻¹ en los suelos desnudos, de 16,6 g m² h⁻¹ en los suelos con costra joven y de 9,8 g m² h⁻¹ en aquellos con una cubierta de costra madura. Las diferencias entre los suelos desnudos –por su alta capacidad de infiltración– y la de los suelos encostrados –por su menor erodibilidad– es reducida. Sólo los suelos con costras jóvenes presentan tasas de erosión ligeramente más elevadas, lo que es debido a la mayor escorrentía ya que la concentración de sedimentos es la más baja de los tres tipos de suelos que generaron escorrentía.

Tabla 3. *Parámetros erosivos más significativos. Concentración de sedimentos (Cs), tasa de erosión media (Ter) y tendencia de la concentración de sedimentos a lo largo de experimento (TCs).*

Parcela	DD1	DD2	CJ1	CJ2	CJ3	CM1	CM2	VG1	VG2
Cs (g l ⁻¹)	3,21	3,08	0,95	0,69	0,85	0,98	1,03	0	0
Ter (g m ² h ⁻¹)	11,24	9,24	23,75	13,87	12,32	9,88	9,78	0	0
TCs	-0,46	-0,62	-0,10	-0,05	-0,07	-0,12	-0,22	-	-

3.4. Salinidad

La conductividad eléctrica de la escorrentía (CE) es indicativa de la salinidad de los suelos y de los solutos exportados por la arroyada. En los casos estudiados en Nizzana la conductividad eléctrica es muy reducida, siempre inferior a 26 µS. No hay diferencias significativas entre las tres unidades de suelos con escorrentía. La tendencia de la concentración de sedimentos ha decrecido en todos los casos y las diferencias entre zonas son poco aclaratorias. En general, la salinidad es insignificante lo que explica la inexistencia de patrones claros entre tipos de suelos. En otras zonas con clima semiárido la conductividad eléctrica es mucho mayor, lo que está directamente relacionado con el tipo de roquedo (Cerdà, 1995).

En los sedimentos, pero especialmente en la salinidad de la escorrentía, se aprecia una reducción drástica en el tiempo que se debe al lavado del polvo atmosférico depositado sobre las superficies de las dunas. Una vez eliminado éste, tanto la salinidad como la concentración de sedimentos alcanzan valores muy reducidos (fig. 7).

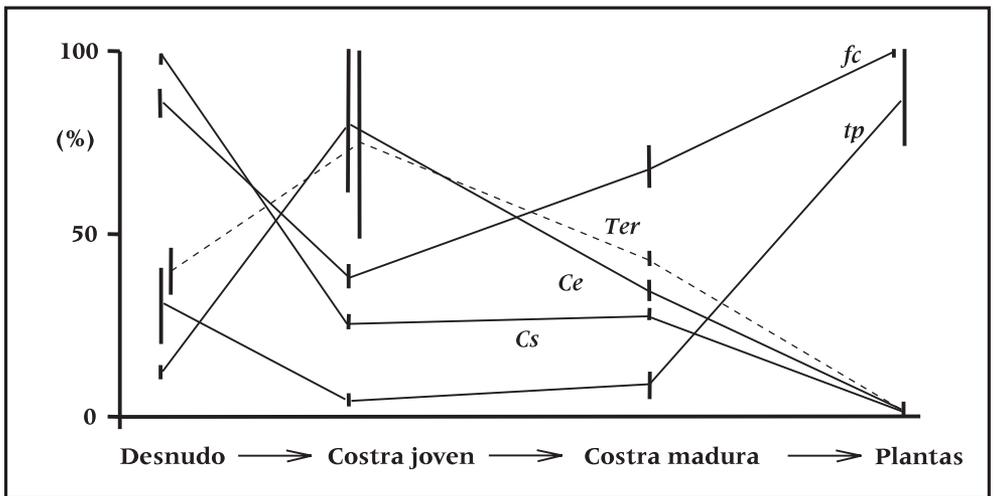
4. LA COSTRA COMO GESTOR DE LOS SEDIMENTOS Y LA ESCORRENTÍA EN MEDIOS ARENOSOS ÁRIDOS

Los suelos del conjunto dunar de Nizzana muestran un comportamiento diferenciado dependiendo del estado de la costra biológica superficial. Los

Tabla 4. Conductividad eléctrica de la escorrentía (CE) y tendencia de conductividad eléctrica a lo largo de experimento (TCe).

Parcela	D1	D2	C1	C2	C3	M1	M2	VG1	VG2
CE (μ S)	17,94	25,36	23,84	17,49	17,60	22,65	24,10	-	-
TCe	-0,15	-0,19	-1,90	-0,28	-0,38	-0,47	-0,46	-	-

suelos desnudos necesitan volúmenes de precipitación elevados para generar charcos y escorrentía superficial. Esto es debido a las altas tasas de infiltración que da lugar a escorrentías muy reducidas, pero la falta de una costra superficial hace que la erodibilidad de los suelos sea elevada. El desarrollo de una costra biológica da lugar a la reducción de la capacidad de infiltración, el aumento de las tasas de escorrentía y el aumento de las tasas de erosión, a pesar de que la erodibilidad de los suelos decrece por la protección de la costra. Los suelos con costra madura favorecen tasas de escorrentía menores por el aumento de la infiltración, reduciéndose las tasas de erosión. Estos cambios en la respuesta hidrológica y erosiva de los suelos como consecuencia de la evolución de la costra biológica finalizan con el desarrollo de una cubierta de matorral que favorece tasas de infiltración muy altas que hacen que las tasas de escorrentía y erosión sean insignificantes como midieron otros autores (Yair, 1990). En la figura 10 se muestra la evolución del tiempo de encharcamiento, tasas de infiltración final estable, escorrentía, concentración de sedimentos y erosión de los suelos en relación a la evolución de la

**Figura 10:** Evolución de los principales parámetros hidrológicos y erosivos (% sobre el máximo valor medio) dependiendo del estado de las costras.

costra superficial desde el suelo desnudo al vegetado con plantas pasando por una costra joven muy impermeable que evoluciona a una costra madura.

El estado de las costras biológicas es el factor esencial en la distribución espacial de la escorrentía en los cordones dunares de Nizzana. Allí donde estén más desarrolladas las costras, las escorrentías superficiales serán mayores, lo que a su vez favorecerá mayores tasas de erosión. La dinámica hidrológica de la zona (Yair, 1990; Yair *et al.*, 1997) indica que la escorrentía generada en el cordón dunar fluye hacia la zona entre dunas. La presencia de *playas* (sedimentos más finos) en la zona entre dunas ratifica la infiltración de la escorrentía procedente del cordón dunar. Por lo tanto, la recarga del acuífero se puede realizar bien por la infiltración directa en la zona vegetada o en la desnuda, o bien por la infiltración de la escorrentía generada en la zona encostrada en la zona entre dunas. Cual de las dos es más efectiva para la recarga del acuífero está aún por determinar, aunque se entiende que la segunda favorecerá *a priori* un flujo localizado de gran magnitud y la primera un frente de humedad amplio pero de poca profundidad que difícilmente alcanzará la zona vadosa.

En general, las tasas de infiltración de los suelos en Nizzana son mayores a las de los suelos con similares cubiertas vegetales. Suelos desnudos como los badlands (Yair *et al.*, 1980; Cerdà & García-Fayos, 1997), con una reducida cubierta vegetal (Scoging, 1982) o degradados por la acción antrópica (Cerdà, 1997), presentan tasas de escorrentía mayores. Las tasas de erosión también son menores a las medidas en otros ambientes áridos y semiáridos (Yair *et al.*, 1985; Cerdà & Lavee, 1994) lo que es debido a la textura arenosa de los suelos y a la nula acción antrópica en la zona.

Desde el punto de vista de la generación de la escorrentía se comprueba por una parte la posibilidad de que las zonas encostradas produzcan escorrentía directa, mientras que las zonas desnudas y vegetadas pueden hacerlo por movilización lateral del agua infiltrada (Yair *et al.*, 1997). En general el primer mecanismo (Hortoniano) se producirá ante lluvias de intensidades medias y altas en las zonas encostradas, mientras que las segundas sólo se producirá después de lluvias de elevados volúmenes y en los suelos vegetados y desnudos. Un aspecto a estudiar en el futuro es el efecto de la alternancia de zonas desnudas, vegetadas y encostradas. En otros ambientes esto favorece la infiltración de gran parte de la escorrentía lo que evita la formación de la escorrentía superficial a lo largo de toda la ladera, lo que parece ser una característica de los ambientes áridos y semiáridos en los que la vegetación se distribuye en manchas (Cerdà, En prensa a, b). Sólo las zonas cercanas a la base de las laderas pueden ser las que aporten directamente escorrentía superficial, que será reinfiltrada en las *playas*.

5. CONCLUSIONES

Los suelos del cordón dunar de Nizzana muestran una importante diversidad en su respuesta hidrológica y erosiva debido a la distribución de las superficies encostradas, vegetadas y desnudas. Las costras biológicas son los responsables de las mayores pérdidas de suelos y de agua, mientras que los suelos desnudos y los vegetados presentan altas tasas de infiltración. La textura arenosa de los suelos y la nula acción antrópica en la zona explica las reducidas tasas de escorrentía, con la excepción de los suelos encostrados. Un suelo desnudo reducirá drásticamente su infiltración al desarrollarse una costra biológica, mientras que cuando se formen macroporos en esta aumenta la infiltración, la cual alcanza sus máximas tasas tras la implantación de una cubierta de plantas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en colaboración con los profesores Aaron Yair de la Universidad Hebrea en Jerusalén y Hanoch Lavee de la Universidad de Bar-Ilan en Ramat-Gan (Tel-Aviv). Quiero agradecer a los miembros de este último departamento, y en especial a los componentes del Laboratorio de Geomorfología y Suelos la ayuda prestada durante mis estancias en Israel. La *Conselleria d'Educació i Ciència* y el Ministerio de Educación y Ciencia financiaron parte de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahams, A.D. & Parsons, A.J.** (1994): *Geomorphology of Desert environments*. Chapman and Hall, Cambridge, 674 pp.
- Abrahams, A.D., Parsons, A.J. & Luk, S.H.** (1988): Hydrologic and sediment response to simulated rainfall on desert hillslopes in southern Arizona. *Catena*, 15, 103-117.
- Bond, R.D. & Harris, J.R.** (1964): The influence of the microflora on physical properties of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 2, 111-122.
- Bradford, J.M., Ferris, J.E. & Remley, P.A.** (1987): Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and splash detachment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 1566-1571.
- Cerdà, A.** (1993a): *La infiltración en los suelos del País Valenciano. Factores y variaciones espacio-temporales*. Ph. D. Thesis, Universitat de València, 357 pp.
- Cerdà, A.** (1993b): Metodologías para el estudio de la hidrología y erosión de superficies degradadas (Badland) a partir de lluvia simulada. *Cuaternario y Geomorfología*, 7, 35-48.
- Cerdà, A.** (1994): Comportamiento hidrológico de los suelos sobre arenisca. Serra de la Calderona, València. *Cuaternario y Geomorfología*, 8, 69-85.
- Cerdà, A.** (1995): *Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Geofoma ediciones, Logroño, 159 pp.
- Cerdà, A.** (1996): Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in Southeast Spain. *Geoderma*, 69, 217-232.

- Cerdà, A.** (1997): The effect of land abandonment on soil erosion and hydrology in a semiarid environment of Southeastern Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11, 163-176.
- Cerdà, A.** (En prensa a): Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestones. *Journal of Hydrology*.
- Cerdà, A.** (En prensa b): The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments*.
- Cerdà, A. & Lavee, H.** (1994): Respuesta a la lluvia simulada de los suelos del Desierto de Judea, Israel. En: J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar (eds.). *Geomorfología en España*, 133-142.
- Cerdà, A. & García-Fayos, P.** (1997): The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. *Geomorphology*, 18, 77-90.
- Cooke, R.U. & Reeves, R.W.** (1972): *Geomorphology in Deserts*. London, Batsford.
- Debano, L.F.** (1971): The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 340-343.
- Dunkerly, D.L. & Brown, K.L.** (1995): Runoff and runoff areas in a patterned chenopod shrubland, arid Western New South Wales, Australia: characteristic and origin. *Journal of Arid Environments*, 20: 41-55.
- Dunne, T. & Dietrich, W.E.** (1980): Experimental study of Horton overland flow on tropical hillslopes. 1. Soil conditions, infiltration and frequency of runoff. *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.*, 35, 40-59.
- Ellison, W.D.** (1947): Soil erosion studies. II. Soil detachment hazard by raindrop splash. *Agric. Engng.*, 28, 197-201.
- Farres, P.** (1978): The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 3, 243-54.
- Horton, R.E.** (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS Trans A.G.U.*, 14, 446-460.
- Horton, R.E.** (1940): An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 5, 399-417.
- Jungerius, P.D. & van der Meulen, F.** (1988): Erosion processes in a dune landscape along the Ducht coast. *Catena*, 15, 217-288.
- Lauren, J.G., Wagenet, R.J., Bouma, J. & Wosten, J.H.M.** (1988): Variability of saturated hydraulic conductivity in a glossoquic hapludalf with macropores. *Soil Science*, 145 (1), 20-28.
- Luk, S.H., Abrahams, A.D. & Parsons, A.J.** (1986): A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphological experiments. *Physical Geography*, 7, 344-356.
- McGhie, D.A. & Posner, A.M.** (1980): Water repellence of a heavy-textured Western Australian surface soil. *Aust. J. Soil Res.*, 18, 309-323.
- Meyer, L.D.** (1994): Rainfall simulators for soil erosion research. En: Lal R. (ed.): *Soil Erosion Research Methods*, 83-103. Soil and Water Conservation Society (Ankeny), 3th edition. St. Lucie press, Delray Beach, 340 pp.
- Morgan, R.P.C.** (1986): *Soil Erosion and Conservation*. Longman, New York, 298 pp.
- Morin, J., Keren, R., Benjamini, Y., Ben-Hur, M. & Shainberg, I.** (1989): Water infiltration as affected by soil crust and moisture profile. *Soil Science*, 148 (1), 53-59.
- Morin, J., Benyamini, Y. & Michaeli, A.** (1981): The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology*, 52, 321-335.
- Navas, A.** (1990): The effect of simulated runoff on the erosion of gypsiferous soil. *Land Degradation and Rehabilitation*, 2, 117-126.

- Romero Díaz, M.A.** (1986): Variaciones espaciales de infiltración y su relación con la textura de los suelos en el NE de la Provincia de Granada. *Estudios sobre Geomorfología del Sur de España*, 121-125.
- Rosenan, N. & Gilad, M.** (1985): Atlas of Israel. Meteorological Data. Sheet No. IV/2.
- Scoging, H.** (1982): Spatial variations in infiltration runoff and erosion on hillslopes in semi-arid Spain. En: Bryan, R. y Yair, A. (eds.): *Badland geomorphology and piping*, 89-112.
- Shainberg, I., Roades, J.D. & 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.
- Tsoar, H. & Moller, J.T.** (1986): The role of vegetation in the formation of linear sand dunes. En: Nickling, W.C. (De.): *Aeolian Geomorphology*, Allen and Unwin, Boston, 75-95.
- Yair, A.** (1990): Runoff generation in a sandy area – the Nizzana Sands, western Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 597-609.
- Yair, A. & Lavee, H.** (1981): An investigation of source areas of sediment and sediment transport by overland flow along arid hillslopes. Proceedings of the Symposium on *Erosion and Sediment Transport Measurements*, IAHS Publication, 133, 433-446.
- Yair, A. & Lavee, H.** (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones. En: Anderson and Burt, T.P. (eds.). *Hydrological Forecasting*, 183-220.
- Yair, A., Lavee, H. & Greitser, N.** (1997): Spatial and temporal variability of water percolation and movement in a system of longitudinal dunes, western Negev, Israel. *Hydrological Processes*, 11, 43-58.
- Yair, A., Lavee, H., Bryan, R.B. & 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.
- Zangvill, A & Druyan, P.** (1993): Meteorological data for Sede Boqer. Desert Meteorol. Ser. A. Núm. 8, Blaustein Institute for Desert Research, Israel, 25 pp.