

ARTEMI CERDÀ*

CLIMA Y EROSIÓN HÍDRICA EN ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS Y DESÉRTICOS DE ISRAEL

RESUMEN

Mediante el uso de lluvia simulada se estudia la influencia del clima sobre la respuesta hidrológica y erosiva de suelos en dos ambientes semiáridos: el Desierto de Judea -entre 100 y 330 mm año⁻¹- y las Montañas de Galilea, Carmel y Jerusalén -entre 550 y 900 mm año⁻¹- en Israel. Los resultados demuestran una influencia negativa de la precipitación media anual sobre la erosión y la escorrentía. En los ecosistemas desérticos las pérdidas de suelo y agua son mayores que en los mediterráneos. Estos resultados se discuten en el marco del concepto de región morfogenética desarrollado por los geomorfólogos durante los años 40 y 50.

ABSTRACT

By means of simulated rainfall the influence of the climate on the hydrological and erosional response of soils from two semiarid environments: the Judean Desert -between 100 and 330 mm año⁻¹- and the Mountains of Galilee, Carmel and Jerusalem -between 550 and 900 mm año⁻¹- of Israel. The results show a negative influence of the mean annual precipitation on the erosion and runoff. On the desert environments, the soil and water losses are greater than on the Mediterranean areas. These results are discussed in the framework of the morphogenetic regions developed by the geomorphologist during the 40's and 50's.

INTRODUCCIÓN

Tanto los procesos edáficos como los geomorfológicos e hidrológicos están altamente determinados por el clima. No en vano, las tasas de meteorización y el desarrollo de la vegetación están directamente determinadas por la disponibilidad de agua y por la temperatura. Desde el punto de vista geomorfológico ese efecto del clima se refleja en las denominadas regiones morfogenéticas, concepto desarrollado por los geomorfólogos en

* Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE (CSIC, Universitat de València, Generalitat Valenciana).
Departament de Geografia. Universitat de Valencia.

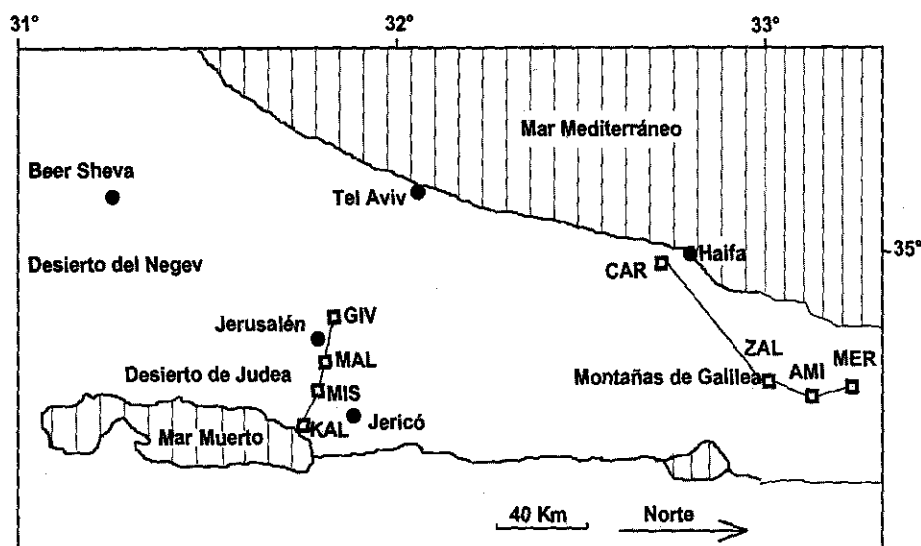


Fig. 1. Localización de las zonas de estudio.

los años 40 y 50 (PELTIER, 1950; TRICART y CAILLEUX, 1955). La definición de regiones morfogenéticas implica que diferentes procesos son dominantes en cada zona climática, y que las tasas de actuación de los procesos dependen de los respectivos tipos de clima (TRICART, 1968). Una visión de este tema desde los procesos geomorfológicos fue desarrollada más tarde por autores anglosajones (LEOPOLD *et al.*, 1964; EMBLENTON y THORNES, 1979). Esto ha hecho que por encima del concepto de región morfogenética hayan destacado los estudios de los procesos geomorfológicos y sus tasas de actuación a partir de los años 60.

El análisis de la relaciones entre el clima y los procesos de erosión fluvial han confirmado la influencia del primero en la conformación de las formas terrestres a escala de cuencas de drenaje (FOURNIER, 1960; LANGBEIN y SCHUMM, 1968; DENDY y BOLTON, 1976; DOUGLAS, 1977). Todos estos estudios fueron realizados desde una perspectiva muy amplia, a nivel de macroescala. Sin embargo, los estudios a nivel de microescala (ladera o suelo) y mesoescala (cuencas de orden 1 y 2) han sido muy pocos, y de momento presentan resultados poco concluyentes.

Esta investigación pretende aportar información acerca de la influencia del clima sobre los procesos geomorfológicos a escala de detalle (microescala, 1 m²) mediante experimentos con lluvia simulada. El objetivo de este trabajo es investigar las relaciones entre la pérdida de suelo y agua (escorrentía superficial) con el clima en el marco de dos zonas morfoclimáticas colindantes: el Desierto de Judea (zona desértica) y las montañas de Israel donde el clima es menos cálido y más húmedo (zona mediterránea) (Figura 1).

Además de la influencia del clima en los procesos de erosión, durante el desarrollo de la investigación encontramos la influencia de la acción antrópica sobre los procesos de generación de escorrentía y exportación de sedimentos.

MÉTODOS

Las zonas de estudio se encuentran a distintas alturas, lo que provoca un incremento de las precipitaciones y un descenso en las temperaturas desde el mar Muerto (-400 m.s.n.m) hasta las montañas del norte de Israel, ya en la frontera con el Líbano (> 1000 m.s.n.m) (Tabla 1).

Tabla 1. Principales características de las zonas de estudio

Zonas de estudio	Altitud	Temperatura	Precipitación	Vegetación
	(m)	(°C)	mm	(%)
TRANSECTOS				
DESIERTO DE JUDEA				
KAL	-70	23	120	10
MIS	230	20	260	15
MAL	330	19	330	50
MONTAÑAS MEDITERRÁNEAS				
CAR	115	21	550	70
GIV	650	17	620	80
ZAL	270	19	650	75
AMI	590	17	750	80
MER	1.120	15	900	90

El clima no sólo afecta a la densidad de la cubierta vegetal sino también a la composición florística. En Kalia (KAL) la asociación dominante es *Zygophyllum dumosum*-*Reaumuria hirtella*, mientras que en Ma'ale Adumin (MAL) *Sarcopoterium spinosum*, *Phlomis Brachodo* y *Filago sp.*, y en Mishor Adumin (MIS) *Anabasis articulata*, *Halogetan alopecuroides*, *Salsola vermiculata*, *Reaumuria hirtella* y *Anagalis arvensis* están presentes. En Giv'at Ye'arim (GIV), debido al clima más húmedo (Mediterráneo), las especies más abundantes son *Pistacea lentiscus*, *Rhamnus palaestinus* y *Calycotome villosa*. En Carmel (CAR) *Ceratonia siliqua*, *Pistacia lentiscus* y *Calycotome villosa*, en Zalmon (ZAL) *Ceratonia siliqua*, *Pistacia lentiscus* y *Quercus calliprinos*, en Amirim (AMI) *Quercus calliprinos* y *Pistacia palaestina*, y en Meron (MER) *Quercus calliprinos* y *Pistacia palaestina*, son las más abundantes.

Trabajos recientes demuestran la gran influencia del clima en la vegetación en las mismas zonas de estudio (KUTIEL *et al.*, 1998), con la consiguiente implicación para el cambio climático (KUTIEL *et al.*, 2000). Las parcelas se instalaron en la parte media de las laderas sur, con pendientes (10°), y roquedo (calizas) idénticos entre las distintas zonas para que los resultados sean comparables entre ellos y evitar otros factores a excepción del clima. Trabajos previos han estudiado el efecto del clima a microescala en el desierto de Judea (LAVEE *et al.*, 1991; CERDÀ y LAVEE, 1994; CERDÀ y LAVEE, 1995; LAVEE *et al.*, 1996; CERDÀ, 1998a; LAVEE *et al.*, 1998; CERDÀ y LAVEE, 1999a; CERDÀ y LAVEE, 1999b), pero los trabajos en las montañas con clima mediterráneo en Israel han sido muy pocos (CERDÀ y SARAH, 2000), como también lo han sido en otros gradientes climáticos en el Mediterráneo (BOIX *et al.*, 1995; CERDÀ *et al.*, 1996; CERDÀ, 1998b; 1998c).

Este trabajo forman parte de una amplio proyecto de investigación sobre los efectos del clima y el futuro cambio climático en la dinámica de los ecosistemas Mediterráneos

(LAVEE *et al.*, 1991; ERMES, 1995; IMESON y LAVEE, 1998). El impacto antrópico y sus consecuencias han sido tenidas en cuenta ya que con el avance de la investigación se ha mostrado como un factor relevante.

Para determinar las tasas de erosión y escorrentía en cada una de las zonas se recurrió a la lluvia simulada con el fin de que todos los chaparrones fueran de las mismas características y no tener que esperar la lluvia que por otra parte no son muy irregulares en el tiempo y en el espacio. El simulador de lluvia utilizado fue del tipo pulverizador, siendo el tamaño de las parcelas de 0,24 m², aunque el área humectada siempre fue superior a 1 m² (CERDÀ *et al.*, 1997). 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. Los experimentos consistieron en chaparrones de una intensidad de 50,36 mm h⁻¹ mantenida durante 60 minutos. El caudal se midió a intervalos de un minuto y al menos cada 10 minutos se tomaron muestras con el fin de conocer la concentración de sedimentos de la arroyada y a partir de ambos calcular las tasas de erosión. En cada parcela se ha determinado al menos cuatro veces la concentración de sedimentos a intervalos regulares. Una detallada explicación de la metodología y el tratamiento de los datos se puede encontrar en Cerdà (1993). Los 36 experimentos se realizaron durante el mes de Diciembre de 1993, y siempre fueron ejecutados después de una semana sin lluvia con el fin de evitar suelos saturados.

RESULTADOS

Los resultados demuestran que los ambientes con mayores precipitaciones generan menores escorrentías superficiales (Figura 2). En concreto, los suelos de las zonas mediterráneas tienen coeficientes de escorrentía siempre inferiores al 25 % y muchas de las parcelas nunca llegaron a producir escorrentía después de una hora de lluvia. Allí, de los 17 experimentos sólo 6 generaron escorrentía, aunque siempre retardada y con caudal reducido.

En cambio, los suelos del Desierto de Judea se caracterizan por generar abundantes escorrentías. En muchas ocasiones el 80 % de la precipitación se transforma en caudal. La escorrentía se genera muy rápidamente, después del casi instantáneo encharcamiento del suelo. Esas rápidas escorrentías son debidas a la abundancia de costras en los suelos, tanto de carácter físico, químico como biológico.

La pérdida de suelo muestra la misma respuesta (Figura 3). Altas tasas de erosión en la zona del Desierto de Judea y muy bajas, en muchos casos insignificantes, en la zona de las montañas con clima mediterráneo. En esta última, la distribución de la vegetación en un mosaico de matas de vegetación y zonas desnudas determina que las superficies con mayores tasas de erosión -también de escorrentía- sean la segundas.

Vistas cada zona por separado no parece que exista una clara relación entre el clima y la pérdida de suelo. Esta afirmación es válida tanto para la región desértica como la mediterránea. En ambos casos, las zonas de precipitaciones intermedias (MIS para el desierto de Judea, y GIV y ZAL para las montañas con clima mediterráneo) generan más escorrentía y sedimentos. El sobrepastoreo es la explicación en ambos casos de esa falta de relación entre el clima y la tasas de erosión. Por lo tanto, además del clima se tiene que tener en cuenta el efecto del hombre como alterador del ecosistema (CERDÀ, 1998c; CERDÀ y LAVEE, 1999a).

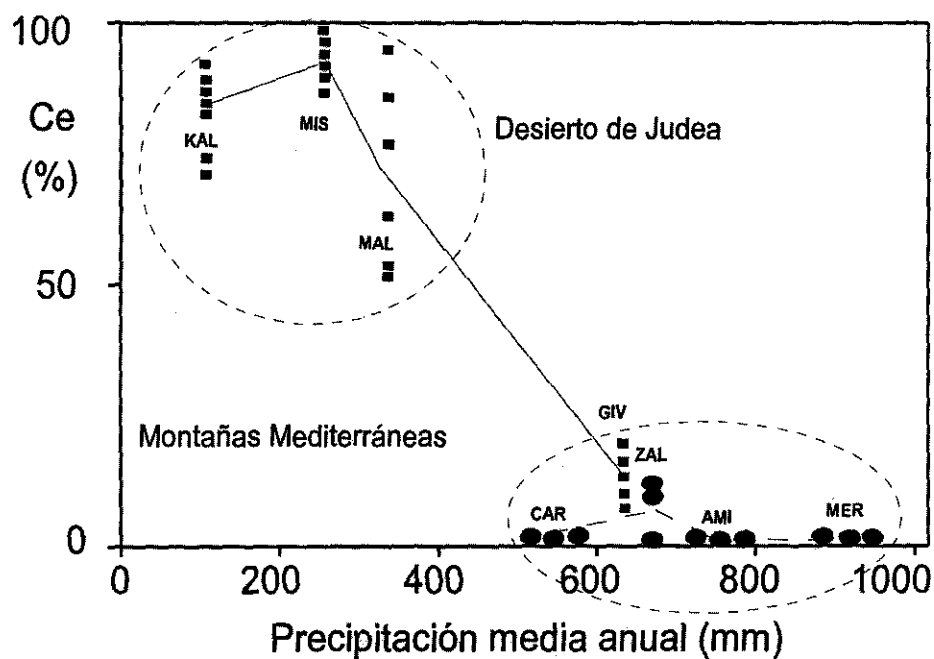


Fig. 2. Relación entre la precipitación media anual y el coeficiente de escorrentía.

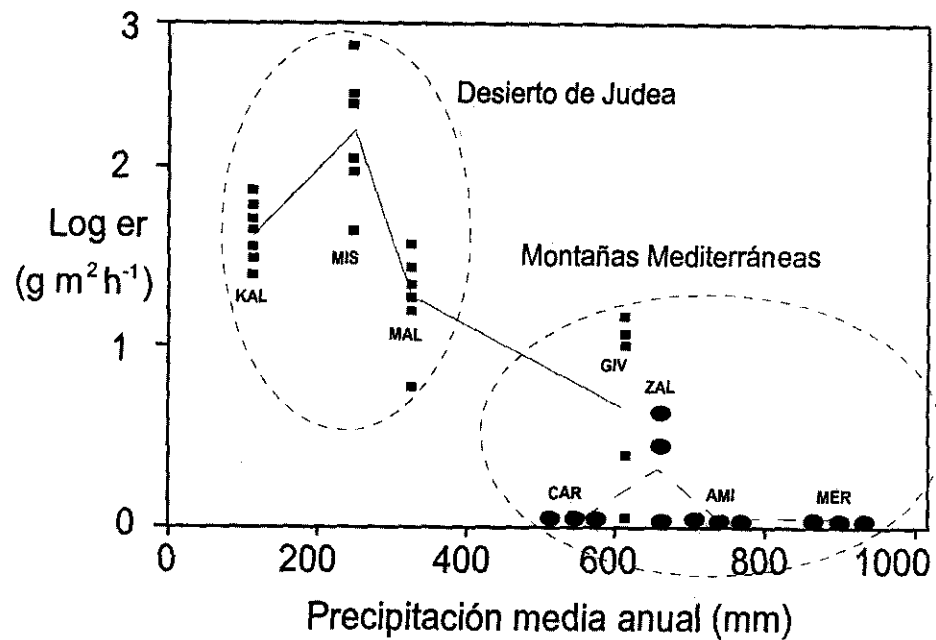


Fig. 3. Relación entre la precipitación media anual y la tasa de erosión (log).

DISCUSIÓN

Los datos aquí presentados demuestran que a escala de pedon las regiones con climas distintos sufren procesos geomorfológicos diferentes, confirmándose la validez del concepto de región morfogenética. Así, en las zonas desérticas, la escorrentía por superación de la capacidad de infiltración (HORTON, 1933) es el proceso dominante. Ello favorece altas tasas de escorrentía y erosión. En cambio, en los suelos formados bajo clima mediterráneo, la escorrentía debe generarse por saturación del suelo ya que no hay escorrentía por superación de la infiltración. Esto significa que los flujos subsuperficiales tendientes a saturar las zonas bajas y cóncavas deben ser de gran importancia en la explicación de la generación de escorrentía como se ha comprobado sobradamente en las regiones templadas (WHIPKEY, 1965; HEWLETT y HIBBERT, 1967; HEWLETT y NUTTER, 1970; RAGAN, 1968).

A pesar de la influencia del clima, dentro de cada región morfogenética, la acción del hombre puede condicionar los procesos geomorfológicos y sus tasas de actuación a microescala como se ha demostrado en los dos ecosistemas estudiados. Es de destacar la existencia de un umbral muy marcado que se ha encontrado entre 330-550 mm de precipitación, el cual separa la zona desértica de la mediterránea. En esos ambientes el comportamiento hidrológico y erosivo de los suelos y las laderas deben mostrar mecanismos de generación y escorrentía más complejos y hasta el momento han sido evaluados a partir de la influencia de la distribución de la vegetación sobre los flujos de agua y sedimentos (LAVEE *et al.*, 1998).

Este comportamiento tan dispar entre los dos ambientes estudiados confirma la presencia de distintas regiones morfogenéticas, ya que los procesos geomorfológicos son diferentes en cada uno de ellos o bien las tasas de actuación de cada proceso es distinta. Esto se verifica por la presencia de coeficientes de escorrentía elevados (80%) en la zona del Desierto de Judea; y escorrentía bajas (5%) en las zonas Mediterráneas, las de las montañas de Galilea, Carmel y Jerusalén (Figura 2). Estas bajas tasas de escorrentía y nulas tasas de erosión hacen pensar que la escorrentía superficial es inexistente mientras que sería la escorrentía subsuperficial el mecanismo básico para explicar la escorrentía durante las lluvias intensas como las aquí simuladas. Esas condiciones hacen que la erosión del suelo sea insignificante y en todo caso localizada allí donde se produce retorno de flujo, básicamente en la parte baja de las laderas.

En la zona del desierto de Judea las altas escorrentías a microescala (parcelas de 0,25 m²) hacen suponer que las escorrentías a lo largo de la ladera serán continuas en la forma que las describía HORTON (1933) con lo que el proceso de formación y producción de escorrentía es distinto en esta zona. Las tasas de erosión en la zona del Desierto de Judea son muy altas, lo que confirma un comportamiento geomorfológico totalmente distinto al encontrado en la zona mediterránea: insignificante escorrentía y nula erosión.

En la cuenca mediterránea existen extensas zonas que son transición entre una y otra región morfogenética (norte de África, sur de Italia, sureste de la Península Ibérica, Israel, etc.) en las que no está claro que mecanismos de generación de escorrentía y que mecanismos del proceso de erosión actúan. En concreto, en el País Valenciano una parte importante del territorio se encuentra en esa zona de transición entre los 300 y los 500 mm año⁻¹, por lo que la investigación sobre los mecanismos de generación de escorrentía y erosión deben potenciarse en el futuro, ya que no se conocen con exactitud el comportamiento de los suelos, las ladera y las cuencas de drenaje en la transformación de la lluvia

en caudal. Trabajos recientes como los de LAVEE *et al.*, (1998) y BOIX (2000) inciden en que en esas zonas de transición sería la distribución en manchas de vegetación las que determinarían la distribución de la arroyada como se describe en trabajos previos (SÁNCHEZ y PUIGDEFÁBREGAS, 1994; DUNKERLEY y BROWN, 1995; CERDÀ, 1997; BOCHET *et al.*, 1998).

Agradecimientos

Agradezco la colaboración de todos los componentes del *Laboratory for Geomorphology and Soils* de la *Bar-Ilan University*, en especial a H. Lavee, 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 a una beca de Perfeccionamiento de Doctores y Tecnólogos en el Extranjero por el Ministerio de Educación y Ciencia del Estado Español y un contrato de reincorporación al proyecto FEDER IFD-97-0551.

BIBLIOGRAFÍA

- BOCHET, E., RUBIO, J.L. y PØESEN, J. (1998): Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 23, 139-150.
- BOIX, C., CALVO, A., IMESON, SCHOORL, J.M., SORIANO, Y TIEMESSEN, I.R. (1995): Properties and erosional response of soils in a degraded ecosystem in Crete (Greece). *Environmental Monitoring and Assessment*, 37, 72-92.
- BOIX, C. (2000): *Procesos geomórficos en diferentes condiciones ambientales mediterráneas: el estudio de la agregación y la hidrología de los suelos*. Tesis Doctoral, Facultad de Geografía e Historia, Universitat de València, 394 pp.
- CERDÀ, A. (1993): Metodología 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. (1997): The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments* 36, 37-51.
- CERDÀ, A. (1998a): Effect of climate on surface flow along a climatological gradient in Israel. A field rainfall simulation approach. *Journal of Arid Environments*, 38, 145-159.
- CERDÀ, A. (1998b): Relationship between climate and soil hydrological and erosional characteristics along climatic gradients in Mediterranean limestone areas. *Geomorphology*, 25, 123-134.
- CERDÀ, A. (1998c): El clima y el hombre como factores de la estabilidad estructural del suelo. Un estudio a lo largo de gradientes climático-altitudinales. *Cuaternario y Geomorfología*, 12 (3-4), 3-14.
- CERDÀ, A. y LAVEE, 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. y LAVEE, H. (1999a): Dinámica hidrológica y erosiva de los suelos a lo largo de un gradiente climático en el Desierto de Judea. *Cuadernos Geográficos*, 29, 27-50.
- CERDÀ, A. y LAVEE, H. (1999b): The effect of grazing on soil and water losses under arid and mediterranean climates. Implications for desertification. *Pirineos*, 153/154, 159-174.

- CERDÀ, A. y SARAH, P. (2000): The effect of climate on overland flow. Laboratory rainfall simulation experiments. *RevQ&G.*, 14 (1/2), 65-75.
- CERDÀ, A., IBÁÑEZ, S. y CALVO, A. (1997): Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11 (2) 161-168.
- CERDÀ, A., CALVO, A., LAVÉE, H. y IMESON, A. (1996): Erosionabilidad del suelo a lo largo del gradiente climático. Coll de Rates-Benidorm. Alicante. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 21, 695-707.
- DENDY, F.E. y BOLTON, G.C. (1976): Sediment yield-runoff drainage area relationship in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31, 264-266.
- DOUGLAS, I. (1977): *Humid Landforms*. Australian National University Press, Camberra, 288 pp.
- DUNKERLY, D.L. y 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.
- EMBLENTON C. y THORNES, J.B. (1979): *Process in Geomorphology*. Londres, Ed. Arnold, 422 pp.
- 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.
- FOURNIER, F. (1960): *Climat et Erosion*. Paris, Presses Universitaires de France, 204 pp.
- HEWLETT, J.D. y HIBBERT, A.R. (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En Sopper, W.E. y Lull, H.W. (Eds.), *Proceedings of Inter. Symp. of Forest Hydrology*, 275-290.
- HEWLETT, J.D. y NUTTER, W.L. (1970): The varying source area of streamflow from upland basins. En *Proceedings of the symposium on interdisciplinary aspects of watersheds management*, Montana State Univ., Bozeman, American Soc. of Civil Engineers, 64-83.
- HORTON, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS Trans A.G.U.*, 14, 446-460.
- IMESON, A.C., LAVÉE, H., CALVO, A. y CERDÀ, A. (1998): The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in Southeast Spain. *Geomorphology*, 24, 3-16.
- IMESON, S.C. y LAVÉE, H. (1998) Soil erosion and climate change: the transect approach and the influence of scale. *Geomorphology*, 28, 219-228
- KUTIEL, P. LAVÉE, H. y ACKERMANN, O. (1998): Spatial distribution of soil surface coverage on north and south facing hillslopes along a Mediterranean to extreme arid climatic gradient. *Geomorphology*, 28, 245-256
- KUTIEL, P., KUTIEL, H. y LAVÉE, H. (2000): Vegetation response to possible scenarios of rainfall variations along a Mediterranean-extreme arid climatic transect. *Journal of Arid Environments*, 43, 277-290.
- LANGBEIN, W.B. y SCHUMM, S.A. (1958): Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions of the Amer. Geophys. Union*, 39 (6), 1076-1084.
- LAVÉE, H., SARAH, P. y IMESON, A.C. (1996): Aggregate stability dynamics as affected by soil temperature and moisture regimes. *Geografiska Annaler*, 78A, 73-82.
- LAVÉE, H., IMESON, A. C. y SARAH, P. (1998): The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean-arid transect. *Land Degradation and Development*, 9, 407-422.
- LAVÉE, 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*

- Suppl.*, 19, 19-37.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G y MILLER, J.P. (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco, 522 p.
- PELTIER, L.C. (1950): The geographical cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. *Ann. Ass. Am. Geogr.*, 40, 214-236.
- RAGAN, R.M. (1968): An experimental investigation of partial area contributions. *Proc. of the General Assembly, Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, Bern, 76, 241-249.
- SÁNCHEZ, G. y PUIGDEFABREGAS, J. (1994): Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. *Geomorphology* 9, 243-260.
- TRICART, J. (1968): *Précis de géomorphologie. Tome I. Géomorphologie structurale*. Paris, SEDES. 322 pp.
- TRICART, J. y CAILLEUX, A. (1955): *Introduction à la géomorphologie climatique*. Centre Docum. Univ. Paris, 222 pp.
- WHIPKEY, R.Z. (1965): Subsurface stormflow on forested slopes. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 10, 74-85.

