

CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA ESTUDIOS DE DEGRADACIÓN DEL SUELO

R. PÉREZ, L. JIMÉNEZ, P. GARCÍA-ESTRÍNGANA, M.J. MARQUÉS, M. CHICHARRO, S. GONZÁLEZ, J. ALEGRE, R. BIENES

Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria. Finca El Encín. Cra N-II Km 38.2. Alcalá de Henares. 28800. Madrid. e.mail: raquel.perez.rodriguez@madrid.org

Abstract. Rainfall simulators are being more and more used for hydrological and erosive studies, so it is necessary that they are well characterized for a good interpretation of the results. It is desirable that simulated rainfall were similar to intense natural rain. It has been studied the size and velocity of the drop, as well as the kinetic energy. The 3/8 HHMFP 115 14 is the nozzle that presents an acceptable uniformity coefficient (80,7 a 92,4 %), for all the tested pressures. For this same nozzle, at a pressure of 1,3 kg cm⁻², the drop diameter has been of 1,4 mm and the kinetic energy has been 20,3 J mm⁻¹ m⁻².

Key words: Rainfall simulated, drops size, drops velocity, kinetic energy.

Resumen: Los simuladores de lluvia están siendo cada vez más utilizados para estudios hidrológicos y erosivos, por lo que es necesario que estén bien caracterizados para una buena interpretación de los resultados. Para estudios erosivos es deseable que la precipitación simulada sea similar a la lluvia natural. Se ha estudiado el tamaño y la velocidad de la gota, así como la energía cinética. De las boquillas ensayadas, es la 3/8 HHMFP 115 14 la que presenta un coeficiente de uniformidad aceptable (80,7 a 92,4 %) para las diferentes presiones ensayadas. Para esta misma boquilla y una presión de 1,3 Kg cm⁻², el diámetro de gota ha sido de 1,4 mm y la energía cinética de 20,3 J mm⁻¹ m⁻².

Palabras clave: Simulación de lluvia, tamaño de la gota, velocidad de la gota, energía cinética.

INTRODUCCIÓN

El simulador de lluvia se emplea para estudiar tanto procesos hidrológicos (infiltración y escorrentía) como erosivos. Son nume-

rosos los investigadores que han hecho uso del mismo para sus experimentos (Shelton *et al.*, 1985; Jonson y Gordon, 1988; Cerdà, 1997a; Carsemeiro *et al.*, 2003; Dunjó *et al.*, 2004).

Algunas de las características más deseables de un simulador de lluvia según Meyer y McCune (1958), Bertrand y Parr (1961) y Meyer (1979) son las siguientes:

- Uniformidad de la distribución de la lluvia.
- Distribución del tamaño de gota y velocidad de caída similar a la lluvia natural.
- Que el simulador de lluvia sea ligero y transportable.
- Poder reproducir distintas intensidades y duraciones de tormentas, siendo posible su replicabilidad.

La técnica más simple de medición del tamaño de las gotas se basa en la medida del tamaño que dejan éstas al impactar sobre una superficie. Wiesner (1895) fue uno de los primeros en estudiar el tamaño de las gotas, para ello usó papel de filtro, relacionando el tamaño de la mancha en el papel con el tamaño de la gota de agua que lo causó, otros autores lo han perfeccionado (Brandt, 1989; Hall, 1970).

También se ha utilizado la fotografía como método de medición del tamaño de la gota de lluvia (Rogers *et al.*, 1967; Mutchler *et al.*, 1967). Además de los métodos aquí citados, el tamaño de gota de lluvia ha sido también medido por otras técnicas descritas por varios autores y utilizadas bajo condiciones experimentales concretas (Bentley, 1904; Laws y Parsons, 1943; Carter *et al.*, 1974; Hudson, 1964; Ahmad, 1970).

La energía cinética se puede calcular indirectamente a partir de datos de la distribución de los tamaños y velocidades de las gotas. También se puede realizar de una manera más directa midiendo la fuerza del impacto sobre una balanza de alta sensibilidad (De Wulf y Gabriels, 1978).

Los factores que controlan la fuerza erosiva de la precipitación son la distribución del tamaño, la velocidad, así como la duración de la tormenta y la velocidad del viento (Kirby y Morgan, 1980). A medida que las gotas

aumentan en tamaño su velocidad terminal también aumenta (Gunn y Kinzer, 1949).

El objetivo de este trabajo es calibrar y poner a punto un simulador de lluvia mediante la determinación del tamaño de gota, velocidad de la misma y energía cinética. El simulador se utilizará para realizar estudios sobre procesos hidrológicos y erosivos.

MATERIAL Y MÉTODOS

El simulador de lluvia portátil empleado ha sido diseñado por los departamentos de Desarrollo Rural e Investigación Agraria del Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA). Este simulador consta de un bastidor de 0,5 x 2 m² que porta una tubería de PVC con acople para una boquilla y un manómetro. Este bastidor está soportado por cuatro patas de altura regulable. El conjunto se conecta a una bomba eléctrica accionada por una batería de 12 voltios. El simulador lleva un regulador de caudal para estabilizar la presión durante toda la experiencia. La bomba toma el agua de un depósito de 120 litros situado sobre una plataforma con ruedas. El soporte del simulador tiene unas lonas protectoras que evitan que las gotas de lluvia sean desplazadas por el viento fuera de la parcela de experimentación.

Las boquillas utilizadas, todas ellas de cono lleno, son la D4DC33 (D4), la 3/8 HHMFP 90 14 (90) y la 3/8 HHMFP 115 14 (115), fabricadas por Spraying Systems Co.®, también se ha utilizado la boquilla Hardi-1553-10.

Todos los ensayos se realizaron a cubierto, con el fin de garantizar la ausencia de viento.

Se realizaron 18 ensayos con cada boquilla y para diferentes presiones de trabajo.

Para poder estimar la uniformidad de la distribución de la lluvia en una parcela circular de 1 m de diámetro, se utilizaron 37 pluviómetros distribuidos en cuatro coronas: A,

B, C, D. Cada corona se sitúa a 15 cm de distancia de la anterior.

Se ha utilizado el coeficiente de Christiansen (CU) (1942). Un evento se considera adecuado cuando tiene un CU mayor del 80 %.(Grierson y Oades, 1977; Moore *et al.*, 1983; Keller y Bliesner, 1990).

Para determinar si hay diferencias significativas entre los diferentes ensayos se utilizó el test de Kruskal-Wallis, estableciendo como nivel de significación una p menor que 0,01.

Para caracterizar el tamaño de las gotas de agua se ha utilizado un papel hidrosensible (Water sensitive paper, Spraying System Co®) con una superficie amarilla que al impactar las gotas se tiñe de azul oscuro. El sistema del papel hidrosensible ha sido desarrollado para su uso en campo por Ciba-Geigy corporation.

Entre el diámetro de las manchas y el diámetro de la gota que produce la mancha existe esta relación:

$$\frac{\text{Diámetro de la mancha}}{\text{Factor de conversión}} = \text{Diámetro de la gota}$$

La ecuación que relaciona el diámetro de la mancha (dm) con el factor de conversión (fc) es la siguiente :

$$fc = 0,8943 \text{ dm}^{0,1344} \text{ (R}^2 = 0,9854 \text{)}.$$

Los factores de conversión han sido evaluados en el trabajo de May (1947) por el método del óxido de magnesio.

Para caracterizar el tamaño de gota se utilizó una parcela circular de 1 metro de diámetro, en la que se distribuyeron 17 papeles hidrosensibles de 6 x 2,6 cm², realizándose 5 repeticiones.

Se diseñó una plataforma móvil (Fig. 1) constituida por dos tableros con una abertura central de 20 cm. Con el fin de que los papeles estuvieran expuestos un corto periodo de tiempo a la lluvia y así conseguir una baja densidad de gotas para un mejor análisis, se hizo pasar la plataforma sobre la parcela durante un segundo.



FIGURA 1. Plataforma móvil empleada en ensayos de tamaño de gota. Al fondo el simulador de lluvia con las lonas recogidas.

El diámetro de las manchas de los papeles hidrosensibles se ha determinado mediante el analizador de imagen Delta-T Devices Ltd con el software WindDIAS.

Según Benito *et al* (1986), la velocidad de caída de las gotas puede ser calculada usando la velocidad inicial V_0 (m/s), la altura de caída x (m) y el coeficiente de rozamiento g (m) basándose en los datos experimentales de Laws (1941) a 2 m de altura. La ecuación utilizada para calcular la velocidad final de las gotas es la siguiente:

$$V = \sqrt{[g/\gamma - (g/\gamma - V_0^2) \cdot e^{-2\gamma x}]}$$

La velocidad inicial de las gotas V_0 (m/s) ha sido calculada utilizando esta ecuación (Benito *et al.*, 1986), que también ha sido usada por Navas *et al.* (1990):

$$V_0 = \sqrt{[(g/\gamma) \cdot (e^{2\gamma h} - 1)]}$$

donde :

g es la aceleración gravitatoria (m s⁻²)

h es la altura máxima de ascenso alcanzada por las gotas cuando la boquilla esta orientada hacia arriba 90°.

γ es el coeficiente de fricción. Se ha utilizado el perteneciente a una gota de tamaño 1,5 mm (Benito *et al.*, 1986).

La energía cinética de la precipitación pluvial se calcula a partir de la distribución del tamaño de las gotas para una intensidad dada (Kirby y Morgan, 1980).

El método físico más común para calcular la energía cinética de una lluvia está basado en las propiedades de las gotas de la lluvia (Eigel y Moore, 1983). Es necesario conocer la velocidad de caída (v_i), diámetro de la gota (d_i) y la distribución de las gotas (n_i).

La energía cinética por unidad de volumen de la lluvia es:

$$E = \frac{1}{2} \rho \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3 v_i^2 n_i}{\sum_{i=1}^N d_i^3 n_i}$$

donde:

E : energía cinética por unidad de volumen (J m⁻² mm⁻¹)

ρ : densidad de la gota de lluvia (g cm⁻³)

n_i : número de fracción de gotas en el intervalo de diámetro de gota

d_i : diámetro de gota efectivo (mm)

v_i : velocidad de la gota de lluvia en el impacto (m s⁻¹)

N : número de intervalos de diámetros de gota.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La lluvia que produce tanto la boquilla Hardi-1553-10 como la D4 poseen una uniformidad inferior al 80%, por lo que no las hace aconsejables para ser utilizadas en estudios con simulación de lluvia. En cambio el coeficiente de uniformidad para la boquilla 90, a presiones 1 y 1,5 kg cm⁻², es aceptable con valores de 80,2 a 83,6%, respectivamente (Tabla 1). Por último con la boquilla 115, para el rango de presiones ensayadas (0,5 a 1,5 kg cm⁻²) presenta un incremento de los coeficientes de uniformidad conforme aumenta la presión para 1,5 metros de altura, alcanzándose un valor del CU de 92,4%. A 2 metros de altura también presenta coeficientes de uniformidad superiores a 80%. En consecuencia esta boquilla se presenta como idónea para todas las presiones y alturas ensayadas.

Se ha caracterizado el tamaño de gota para la boquilla 115 a 2 metros de altura y a una presión de 1,3 kg cm⁻². Se ha seleccionado esta altura ya que en experimentos posteriores se va a trabajar con arbustos de hasta 1,6 m. Se elige la presión de 1,3 kg cm⁻² por-

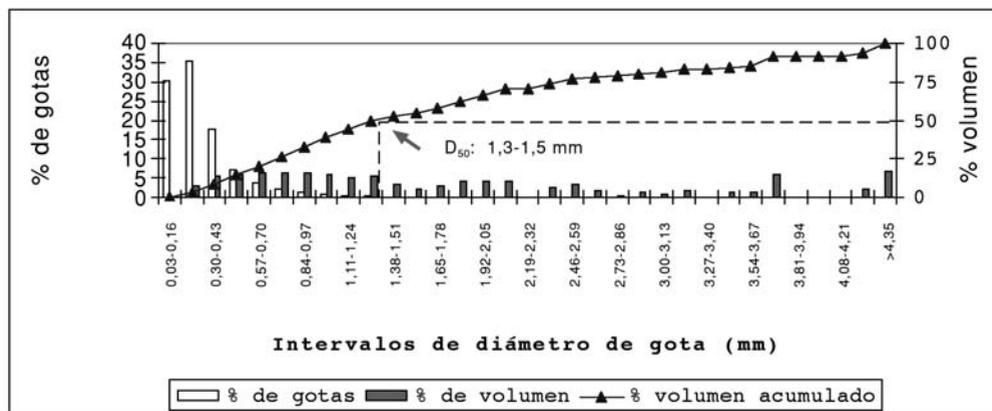


FIGURA 2. La fracción (%) de gotas, el % de volumen y el % de volumen acumulado para cada intervalo de diámetro de gota. D₅₀: Diámetro obtenido a partir del 50 % del volumen.

que tiene el coeficiente de uniformidad mayor para esa altura.

La mediana de los valores del diámetro de gota para los casi 38.000 datos es 0,235 mm. La distribución del tamaño de gotas (Fig. 2) incluye una mayor proporción (95%) de gotas

pequeñas, por debajo de 1 mm. Resultados parecidos han sido obtenidos por Hall (1970), quien determina un tamaño de gota máximo de 1,25 mm para una presión de 0,6 kg cm⁻², siendo el tamaño medio aproximado de 0,3 mm, para la boquilla de Hall (1969).

TABLA 1. Coeficientes de uniformidad de Christiansen (1942) de los distintos ensayos para las boquillas Hardi, D4, 90 y 115 a diferentes presiones y alturas.

Boquillas	Altura (m)	Presión (kg cm ⁻²)	Nº de ensayos	Intensidad (mm h ⁻¹)	P<0,01*	Coefficiente de Uniformidad (%)
Hardi	1,5	1	3	79,2	ns	0
		1,3	6	75	ns	53,26
		1,5	8	73,5	ns	21,38
		1,8	6	80,4	ns	43,98
D4	1,5	1,5	7	74,1	ns	38
		2,5	7	89,6	ns	40,2
90	1,5	0,5	7	138,1	ns	64,1
		0,7	7	159,3	ns	69,6
		1	3	157,2	ns	83,6
		1,5	3	175,6	ns	80,2
115	1,5	0,5	4	119,6	ns	80,7
		0,7	6	122,5	ns	81,5
		1,1	3	120,3	ns	90,6
		1,5	3	100,3	ns	92,4
	2	1,3	6	108	ns	85,2
		1,5	3	111	ns	84,6

* test de Kruskal-Wallis para p<0,01, ns: no significativo

TABLA 2. Energía cinética calculada para el simulador de lluvia y para lluvias naturales de las estaciones donde se emplea el simulador.

		Imax30 (mm h ⁻¹)	ECd (J mm ⁻¹ m ⁻²)	ECw (J mm ⁻¹ m ⁻²)	ECzt (J mm ⁻¹ m ⁻²)
<i>Lluvia simulada</i>	Simulador IMIA	54,2	20,33	27,03	29,31
	El Encin	53,8	-	27,00	29,28
<i>Lluvia natural</i>	Aranjuez	47,8	-	26,56	28,70
	Marchamalo	30,4	-	24,85	26,49

Imax30: Intensidad máxima en 30 minutos, ECd; Energía cinética calculada a partir del tamaño de gota, ECw: Energía cinética según Wischmeier y Smith (1978) y ECzt: Energía cinética según Zanchi y Torri (1980)

El diámetro máximo que hemos registrado es de 5,5 mm. Debido a que las gotas grandes conforme aumenta la presión tienen tendencia a romperse en gotas más pequeñas, es raro encontrar gotas que superen los 4 mm (von Bernuth y Gilley, 1984; Cerdà *et al.*, 1997).

Según Brandt (1989), el diámetro que se obtiene a partir del 50 % del volumen (D_{50}) de la muestra es el mejor parámetro para determinar el tamaño de gota. En nuestro caso el D_{50} está comprendido entre 1,3 y 1,5 mm (Fig. 2) para una presión de 1,3 kg cm⁻² y una intensidad de 108 mm h⁻¹ para la boquilla 115. Wilcox *et al.* (1986) encuentran una D_{50} de 1,2 mm a 102 mm h⁻¹. Diámetros de gota mayores (2,53 mm) han sido hallados por Cerdà (1997b) para condiciones de lluvias simuladas a una intensidad de 53,6 mm h⁻¹. Siguiendo a este autor, el diámetro de gota esperado en lluvias naturales para la intensidad ensayada (108 mm h⁻¹) sería de 2,17 mm, valor superior al obtenido experimentalmente por nosotros.

La velocidad final de la gota es 6,82 m s⁻¹ este valor se encuentra en torno a la velocidad terminal calculada para ese tamaño de gota (Epema y Riezebos, 1983). Empleando este dato, la energía cinética es 20,33 J mm⁻¹ m⁻². Otros autores han observado valores de energía cinética muy parecidos de 23,1 J mm⁻¹

m⁻² para una D_{50} de 2,25 mm según Miller (1987) con una intensidad variable entre 12,7 y 86,4 mm h⁻¹. Aplicando las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1978) y de Zanchi y Torri (1980) que relacionan la intensidad con la energía cinética se obtienen para el simulador valores entre 27,03 y 29,31 J mm⁻¹ m⁻² (Tabla 2).

Los valores de energía cinética obtenidos (en el proyecto SC93-022-C3-1) para lluvias naturales en las estaciones de El Encín, Aranjuez y Marchamalo (Tabla 2), para una intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) similar a la de nuestro simulador están entre 24,85 y 29,31 J mm⁻¹ m⁻². Siendo por lo tanto energías cinéticas muy similares a las obtenidas con el simulador de lluvia.

CONCLUSIONES

La boquilla 3/8 HHMFP 115 14 presenta para todas las presiones y alturas ensayadas un coeficiente de uniformidad mayor del 80%, por eso se ha seleccionado como la boquilla más idónea. Para la presión de 1,3 kg cm⁻² y a 2 metros de altura la pluviometría presenta un CU del 85,2%, con un diámetro de la gota de 1,4 mm y una energía cinética de 20,33 J mm⁻¹ m⁻².

REFERENCIAS

- Ahmad, N.S. (1970): A method of direct measurement of spray droplets in an oil bath. *J. agric. Engng Res.* 15, 182-184.
- Benito, E., Gómez-Ulla, A., Diaz-Fierros, F. (1986): Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erosibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua. *An. Edafol. Agrobiol.* 9-10, 1115-1126.
- Bentley, W.A. (1904): Studies of raindrops and raindrop phenomena. *Monthly Weather Review* 32, 450-456.
- Bertrand, A.R. y Parr, J.F. (1961): Design and operation of the Purdue sprinkling infiltrometer. *Purdue University Research Bulletin* 723.
- Brandt, C.J. (1989): The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena* 16, 507-524.
- Carter, C.E., Greer, J.D., Braud, H.J., Floyd, J.M. (1974): Raindrop characteristics in south central United States. *Transactions of the ASAE* 7, 1033-1037.
- Casermeyro, M.A., Molina, J.A., de la Cruz de Caravaca, M.T., Hernando Costa, J.; Hernando Massanet, M.I., Moreno, P.S. (2004): Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soil of Mediterranean climate. *Catena* 57, 91-107.
- Cerdà, A. (1997a): Soil erosion after land abandonment in a semiarid environment of southeastern Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 11, 163-176.
- Cerdà, A. (1997b): Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, València, Spain. *Catena* 30, 169-182.
- Cerda, A., Ibáñez, S. Calvo, A. (1997): Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* 11, 163-170.
- Christensen, J.E. (1942): Irrigation by sprinkling. University of California Agric. Exp. Sta. Bulletin 670- Experiment Station, 124p.
- De Wulf, F. y Gabriles, D. (1978): A device for analysing the energy load of rainstorms. "Assessment of erosion", 165-168.
- Dunjó, G., Pardini, G., Gispert, M. (2004): The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a micro-plot scale, in a small Mediterranean catchment. *Journal of Arid Environments* 57 (2), 239-256.
- Eigel, J.D. y Moore, I.D. (1983): A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Transactions of ASAE* 24, 1079-1083.
- Epema, G.F y Riezebos, H.Th. (1983): Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. En: J. De Ploey (Editor), *Rainfall Simulation, Runoff and Soil Erosion. Catena Suppl.* 4, 1-17.
- Grierson, I.T.; Oades, J.M. (1977): A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Agricultural Engineering Res.* 22, 37-44.
- Gunn, R.D. y Kinzer, G.D. (1949): Terminal velocity of water droplets in stagnant air. *J. Meteorology* 6, 243-248.
- Hall, M.J. (1969): The design of nozzle networks for the simulation of rainfall. *J. Hydraul. Res.* 7, 449-483.
- Hall, M.J. (1970): Use of the stain method in determining the drop-size distribution of coarse liquid sprays. *Transactions of the ASAE* 33-37, 41.
- Hudson, N.M. (1964): The flour pellet method for measuring the size of raindrops. *Research Bulletin* 4, Department of Conservation, Salisbury, Zimbabwe.
- Johnson, C.W. y Gordon, N.D. (1988): Runoff and erosion from rainfall simulator plots on Sagebrush rangeland. *Soil and Water Division of ASAE* 31 (2), 421-427.
- Keller, J. y Bliesner, R.D. (1990): Sprinkle and trickle irrigation. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York.

- Kirby, M.J. y Morgan, R.C. (1980): Soil erosion. John Wiley and Sons, 375 pp.
- Kohl, R. A. (1974). Drop size distribution for medium-sized agricultural sprinklers. *Transactions of the ASAE* 15, 690-693.
- Laws, J.O., y Parsons, D.A. (1943): The relation of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysical Union* 24, 452-459.
- May, K.R. (1947): The measurement of airborne droplets by the magnesium oxide method. *Journal of Scientific Instruments* 24, 128-130.
- Meyer, L.D. y McCune, D.L. (1958) : Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural engineering* 39 (10), 644-648.
- Meyer, L.D. (1979): Method for attaining desired rainfall characteristics. *Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop ARM-W-10*, 35-45.
- Miller, W.P. (1987): A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil. Sci. Am. J.* 51, 832-834.
- Moore, I.D.; Hirschi, M.C.; Barfield, B.J. (1983): Kentucky rainfall simulator. *Transactions of the ASAE.* 26(4), 1085-1089.
- Multchler, C.K. (1967): Parameters for describing raindrop splash. *Journal of Soil and Water Conservation* 22 (3), 91-94.
- Navas, A., Alberto, F., Machín, J., Galan, A. (1990): Design an operation of rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology* 3, 385-397.
- Rogers, J.S., Johnson, L.C., Jones, D.M.A., Jones, B.A. (1967): Sources of error in calculating the kinetic energy of rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation* 22 (4), 140-143.
- Shelton, C.H., Bernuth, R.D.; Rajbhandari, S.P. (1985): A continuous-Application rainfall simulator. *Soil and Water Division of ASAE* 28, 1115-1119.
- Von Bernuth, R.D. y Gilley, J.R. (1984): Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. *Transactions of the ASAE* 27, 1435-1441.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion soil losses- A guide to conservation planning. *Agric. Handbook n° 537*. USDA, Washington, D.C., 58 p.
- Wiesner, J. (1895): *Bietraege zur Kenntniss, des tropi Regens*, K. Akad. Will. Math.-Naturw. Klesse, SitzBer. 104, 1397-1434. Revisado por Laws y Parsons, 1943.
- Wilcox, P., Wood, M., Tromble, T., Ward, J. (1986): A hand-portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management* 39, 375-377.
- Zanchi, C. y Torri, D. (1980): Evaluation of rainfall energy in central Italy. In M De Boodt and D Gabriels (eds), *Assessment of erosion*. London, Willey, 133-142.