

NUEVA FORMULACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LA LLUVIA. ANÁLISIS COMPARATIVO CON ECUACIONES EMPÍRICAS

MARGARITA ROLDÁN SORIANO¹ Y JOSÉ A. FERNÁNDEZ YUSTE¹

RESUMEN

El presente trabajo describe el estudio de la caracterización cuantitativa de una propiedad de la lluvia muy importante, la energía cinética, y es importante porque es la fuente de entrada de energía en los procesos de erosión hídrica y por tanto, de la pérdida de suelo que sufren nuestros campos.

Este trabajo presenta un estudio de la relación existente entre la energía cinética de la lluvia y la intensidad de la lluvia con datos de lluvia registrados de forma automática con el disdrómetro de JOSS y WALDVOGEL (1967). Se ha obtenido una ecuación de regresión entre la energía cinética y la intensidad pero con algunas peculiaridades, ya que es una ecuación exponencial que introduce un valor máximo de energía cinética. Esta ecuación exponencial ha proporcionado resultados muy satisfactorios, presenta errores relativos bajos y además tiene un significado práctico y físico.

Además se ha realizado un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con esta ecuación exponencial y ecuaciones empíricas tradicionales en el cálculo de la energía cinética. El criterio de selección de las ecuaciones a comparar fue en primer lugar escoger aquellas ecuaciones que fuesen habituales en los estudios de erosión y también aquellas ecuaciones que por la localización donde fueron obtenidas pudiesen ser interesante para su comparación.

Los resultados obtenidos de la comparación conducen a pensar que la relación entre la energía cinética y la intensidad no estaría influenciado por condiciones de localización. Se concluye también que el uso de la ecuación exponencial obtenida en este estudio resolvería algunos de los problemas que conlleva el uso de algunas de la ecuaciones empíricas.

Palabras clave: Erosión hídrica, Erosividad, Tamaño de gota, Intensidad, Energía cinética, Disdrómetro.

SUMMARY

The present report describes a study on the quantitative characterization of a very important property of the rainfall, kinetic energy, which is important because it is one of the source of energy in the process of the water erosion and, therefore, of the loss of soil that our fields withstand.

¹ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 MADRID. e-mail: margarita.roldan@upm.es

Recibido: 26/06/2006.
Aceptado: 10/07/2006.

This paper presents research on the relationship existing between the kinetic energy and intensity of rainfall with the data of rainfall registered with automatic instrument, Joss and Waldvogel disdrometer. It is obtained regression equation between kinetic energy and intensity but some peculiarities, since it is an exponential equation that introduces a maximum value of kinetic energy. The exponential equation has provided most satisfactory results. This equation presents lower relative errors for highest intensities of rainfall and it has got physical and practical meaning.

Moreover, a comparative analysis empirical functions and exponential function was investigated. The criteria of selection of empirical equations to compare were because of their common use in the studies of erosion and because of the site where they were obtained.

The results obtained in the comparison led us to think the exponential equation is not influenced by local conditions and its use solves the limitations of some present equations.

Key words: Water erosion, Erosivity, Drop size, Intensity, Kinetic energy; Disdrometer.

INTRODUCCIÓN

La estimación directa de la energía cinética (EC) real de una lluvia requiere información de la distribución de diámetros y de su velocidad, variables que no son recogidas en los observatorios pluviométricos. La EC, por tanto, se ha venido estimando de forma indirecta con el uso de fórmulas empíricas a partir de parámetros de lluvia conocidos, generalmente la intensidad, que es función del tamaño y de la velocidad terminal de la gota (HUDSON (1965); CARTER et al. (1974); MC GREGOR y MUTCHLER (1976); ZANCHI y TORRI (1980); ROSEWELL (1986)) y que es posible obtener con los datos de precipitación registrados en una estación.

Hay muchas ecuaciones empíricas que relacionan EC con la intensidad de la lluvia (I). Sobre estas ecuaciones pueden plantearse algunas limitaciones:

- Las diferencias entre las estimas que proporcionan las distintas ecuaciones, pueden ser debidas a la dependencia de la distribución del tamaño de las gotas con las condiciones meteorológicas y, sobre todo, con el origen de las precipitaciones y, por tanto, con la localización de los ensayos (van Dijk *et al.* 2002). Esto hace pensar que pudieran no ser aplicables fuera de las regiones en las que se obtuvieron los datos que sirvieron para estimar los parámetros de las ecuaciones.
- Aunque no están claros los límites de intensidad o cantidad de lluvia que podrían considerarse erosivos, si se sabe que hay lluvias que no poseen capacidad potencial erosiva. En estas ecuaciones no se consideran límites inferiores para la I que impliquen aceptar que por debajo de un umbral la EC no tiene significación desde el punto de vista erosivo.
- El diámetro de las gotas de lluvia no crece de forma indefinida con I y, por tanto, tampoco su EC (WISCHMEIER y SMITH (1978); HUDSON (1981); MORGAN (1997); USÓN y RAMOS (2000); JAYAWARDENA y REZAUR (2000); VAN DIJK *et al.* (2002)). Sin embargo, las ecuaciones no consideran un límite de EC máximo.
- Hay pocos datos para valores de I grandes y muchos para valores de I pequeños, por lo que la extrapolación a valores altos puede suponer cierta incertidumbre, al estar el ajuste influenciado por los valores de I más bajos. Además, el hecho de que para intensidades bajas las distribuciones de tamaños de gota no presenten un patrón estable de distribución de tamaños, hace que la incertidumbre sea aún mayor (Sempere Torres *et al.* 1994).
- En algunas expresiones su aplicación está limitada a unos intervalos de I relativamente bajos, que en algunos casos pueden no ser

prácticos desde la óptica de evaluación del potencial erosivo de una lluvia.

- La mayoría de las expresiones en uso obtienen la EC de la lluvia con relaciones del tipo $EC_{mm} - I$, en vez de $EC_{tiempo} - I$, debido principalmente a no disponer de datos obtenidos de forma automática. Sin embargo, SALLES *et al.* (2002) al analizar esas dos formas de expresar la EC, por unidad de volumen o por unidad de tiempo, demuestran que el uso de EC por unidad de tiempo es más apropiado que el uso de EC por mm de lluvia.

El objetivo del trabajo es establecer una nueva ecuación $EC_{tiempo} - I$ que palie las limitaciones señaladas y comparar sus resultados con los que proporcionan las ecuaciones recogidas en la Tabla 1.

Autores	Ecuación
WISCHMEIER y SMITH (1958)	$(11,9+8,73 * \log_{10} I)$
BRANDT, (1990)	$(8,95+8,44 * \log_{10} I)$
SEMPERE TORRES <i>et al.</i> (1992)	$34 * I - 190 (J/m^2 \text{ y h})$
PARK <i>et al.</i> (1980)	$21.1069 * I^{1.156} (J/m^2 \text{ y h})$
BOLLINNE <i>et al.</i> (1984)	$12,32+0,56 * I$
COUTINHO y TOMAS (1995)	$35,9 * (1-0,559 * e^{-0,034 * I})$
RENARD <i>et al.</i> (1997)	$29 * (1-0,72 * e^{-0,05 * I})$
UIJLENHOET y STRICKER (1999)	$7,20 * I^{1,32}$
USON y RAMOS (2001)	$23,4 * I - 18$
ZANCHI y TORRI (1980)	$(9,81+11,25 * \log_{10} I)$
CERRO <i>et al.</i> (1998)	$38,4 * (1-0,538 * e^{-0,029 * I})$
VAN DIJK <i>et al.</i> (2002)	$28,3 * (1-0,52 * e^{-0,042 * I})$
LAWS y PARSONS (1943)	$I * V^2 / 60 \text{ V} = 4,854 * D * e^{-0,195 * D}$ $D = 1,238 * I^{0,182}$
EC (J/m ² mm); I (mm/h); D (mm)	

Tabla 1. Ecuaciones empíricas seleccionadas.

Table 1. Selected empirical equations.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

El instrumento de medida es un disdrómetro JOSS-WALDVOGEL (1967), que proporciona,

minuto a minuto, el número de gotas agrupadas por tamaños en 20 clases (o canales), con diámetros comprendidos desde 0,3 mm hasta diámetros superiores a 5,145 mm. La superficie de muestreo de este disdrómetro es de 50 cm².

El disdrómetro no proporciona directamente la energía cinética de la lluvia, por lo que es necesario asignar a cada canal un valor de EC representativo. No se puede considerar como EC representativa del canal la energía cinética obtenida con el diámetro medio del intervalo, ya que la relación entre EC y diámetro es fuertemente no lineal y por tanto la energía representativa del canal no coincide con la energía del diámetro medio del intervalo en cada canal. Se ha discretizado la variable diámetro, obteniendo para cada canal, 11 diámetros comprendidos entre el límite inferior y superior. A cada diámetro se le asigna una velocidad terminal según la ecuación de UPLINGER (1981). Se considera como energía cinética representativa de una gota del canal la media de las energías cinéticas obtenidas para los 11 diámetros correspondientes a cada canal (Tabla 2).

El equipo de toma de datos se instaló en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal de Madrid (España). Se registraron las lluvias acaecidas durante dos años, registrándose minuto a minuto, día y noche. En total se registraron 3430 minutos con lluvia. El número de datos para $I > 1$ mm/h es de 2294 y la distribución según intervalos de intensidad es la siguiente: 2000 con $1 < I < 5$ mm/h; 200 con $5 < I < 10$ mm/h; 28 con $10 < I < 20$ mm/h; 13 con $I > 20$. Para este trabajo no se han tenido en cuenta los registros de $I < 1$ mm/h, aceptando que por debajo de ese valor de intensidad en un minuto la lluvia tiene una capacidad erosiva despreciable. De los 2.000 registros con $1 \text{ mm/h} < I < 5 \text{ mm/h}$ se ha estimado conveniente reducir el número de datos a emplear en 200 –igual al número de registros con $5 \text{ mm/h} < I < 10 \text{ mm/h}$ – para evitar que los resultados estuviesen sesgados por los valo-

Canal	Diámetro (mm)	Energía Cinética de una gota (J)
1	0,313-0,405	3,39E-08
2	0,405-0,505	1,05E-07
3	0,505-0,596	2,58E-07
4	0,596-0,715	5,95E-07
5	0,715-0,827	1,27E-06
6	0,827-0,999	2,82E-06
7	0,999-1,232	7,13E-06
8	1,232-1,429	1,56E-05
9	1,429-1,582	2,67E-05
10	1,582-1,748	4,15E-05
11	1,748-2,077	7,63E-05
12	2,077-2,411	1,53E-04
13	2,411-2,727	2,61E-04
14	2,727-3,011	3,54E-04
15	3,011-3,385	5,96E-04
16	3,385-3,704	8,69E-04
17	3,704-4,127	1,24E-03
18	4,127-4,573	1,77E-03
19	4,573-5,145	2,52E-03
20	>5,145	3,51E-03

Tabla 2. Energía cinética por canal.

Table 2. Kinetic energy by channel.

res bajos de la intensidad. Teniendo en cuenta el escaso número de registros con I elevadas, con un valor máximo de 47 mm/h, y la trascendencia que estas intensidades altas tienen en el potencial erosivo de la lluvia, se han incorporado a nuestros datos los obtenidos, también con disdrómetro y en condiciones similares a las manejadas en este trabajo, por SEMPERE TORRES *et al.* (1992), que utilizó precipitaciones con I mayores para la obtención de una ecuación de represión. De esta forma se incrementa el número de registros con $I > 20$ mm/h hasta los 34 datos.

Para los registros seleccionados con los criterios expuestos se obtienen sus correspondientes EC_{tiempo} :

$$EC_{\text{minuto}} = \sum_{i=1}^{20} EC_i * n_i$$

Siendo, EC_i la energía cinética (J/gota) característica de una gota del canal i (Tabla 2), n_i el número de gotas en el canal i por minuto y m^2

Tipo de función

La función general planteada, utilizada como punto de partida, es similar a la de VAN DIJK *et al.* (2002), pero del tipo EC_{tiempo}^{-I} :

$EC = EC_{\text{max}} - e^{-F(I)}$, EC y EC_{max} en (J/m² y min); I en mm/h; F(I) función por determinar.

El diámetro de las gotas de lluvia no crece de forma indefinida con la I y, por tanto, tampoco su EC. Por esa razón, la función que se plantea está acotada superiormente por un valor de EC máximo (EC_{max}). Para asignar un valor a EC_{max} se han tenido en cuenta las referencias de POESEN *et al.* (2002); WISCHMEIER y SMITH (1978); CARTER *et al.* (1974); MORGAN (1997) y VAN DIJK *et al.* (2002), seleccionando el valor de 65 J/m² y minuto, considerablemente superior al correspondiente a la máxima intensidad de los datos utilizados en este trabajo (89,3 mm/h; 47,5 J/m² y minuto).

RESULTADOS

Para establecer la función F(I) que permitiese obtener la mejor relación EC-I, se utilizó el software SPSS, versión 11.5 para Windows. La ecuación que proporcionó el mejor coeficiente de correlación fue:

$$EC = 65 - e^{-9,8679 * 10^{-3} * I - 4,987 * 10^{-3} + 4,1779} \quad (1) \quad (R^2 = 0,987),$$

EC en J/m² y minuto; $EC_{\text{max}} = 65$ J/m² y min; I en mm/h

Se obtuvieron los residuos (valor observado - valor calculado) y el % de error relativo (Residuo *100/ valor observado). En la Figura 1 se muestran los % de error, pudiéndose apreciar que no se manifiesta ninguna tendencia sistemática en su distribución. Puede pues aceptarse que la varianza no explicada con la ecuación (1) propuesta, se debe a cuestiones aleatorias y

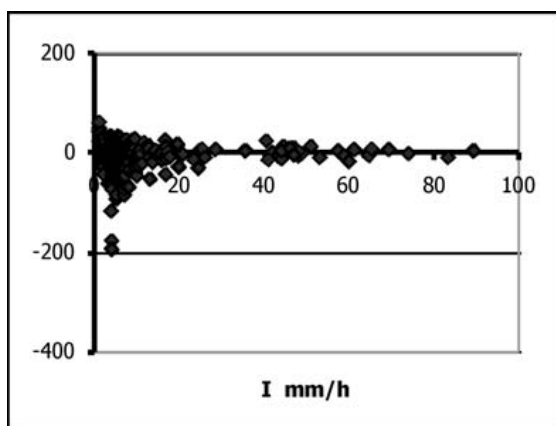


Figura 1. % error cometido con la ecuación 1.

Fig. 1. % error with application of equation 1.

no a un comportamiento subyacente en los datos y no explicado por el modelo.

Para comprobar la sensibilidad que presenta la ecuación obtenida respecto al único parámetro introducido con cierta incertidumbre, la energía cinética máxima, se estiman con los mismos datos y procedimiento dos ecuaciones del mismo tipo que la considerada, pero variando el valor de esa energía cinética máxima, 65 J/m² y minuto, en $\pm 20\%$ de dicho valor (52 y 78 J/m² y minuto).

En la Figura 2, se muestran las gráficas de las ecuaciones con EC_{max} de 52, 65 y 78 J/m² y min, pudiéndose apreciar que las diferencias se manifiestan a partir de I > 80 mm/h y que

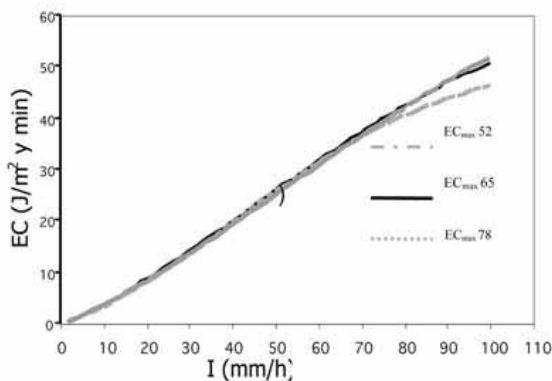


Figura 2. Robustez de la ecuación 1.

Fig. 2. Robutness of equation 1.

para I=100 mm/h, las diferencias están próximas al 8% y al 2,8% entre las ecuaciones con 65 y 52 J/m² y min, y con 65 y 78 J/m² y min, respectivamente. El modelo propuesto es pues poco sensible a variaciones en el valor de la EC_{max} utilizado. Este comportamiento muestra una cualidad muy adecuada del modelo propuesto, ya que atenúa el efecto de la incertidumbre en la definición del valor de la EC_{max}.

DISCUSIÓN

Siguiendo el trabajo de SEMPERE TORRES *et al.* (1992), se realizó un análisis comparativo de las formulaciones empíricas seleccionadas (Tabla 1) con la ecuación exponencial obtenida. Los criterios de selección de las expresiones a comparar fueron, en unos casos, por ser muy usuales en el cálculo de energía de la lluvia en los estudios de erosión y en otros casos, por el lugar donde fueron obtenidas. La mayoría de las expresiones que relacionan EC e I son en su origen del tipo EC_{mm}-I. Para poder comparar dichas ecuaciones es necesario considerar la energía cinética por unidad de tiempo. La relación EC_{tiempo}-I se puede deducir fácilmente de la relación EC_{mm}-I, multiplicando por la intensidad y en nuestro caso como la comparación va a hacerse con datos registrados cada minuto, dividiendo por 60.

La variable considerada para hacer la comparación es el error relativo en valor absoluto. Los errores relativos para todas las ecuaciones se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{Error relativo} = \text{ABS} \frac{EC \text{ observada} - EC \text{ calculado}}{EC \text{ observada}}$$

En la Figura 3 se representan los intervalos de confianza, al 95% de la probabilidad, de la media de los errores relativos obtenidos al considerar todos los datos registrados (I > 1 mm/h). En esta primera comparación de errores relativos no se incluyó la expresión de SEMPERE TORRES, ya que para su obtención manejó precipitaciones con I > 20 mm/h.

A la vista de la información recogida en la Figura 3, se consideró oportuno descartar las ecuaciones que presentan los errores relativos

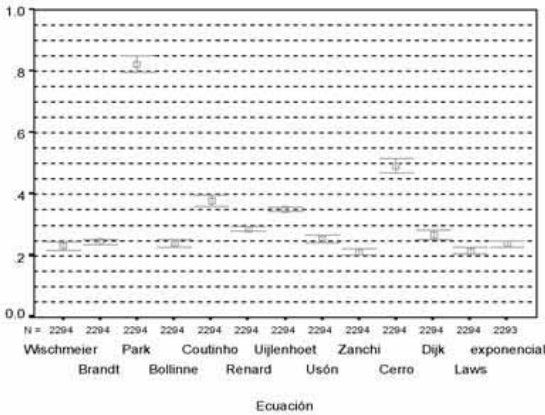


Figura 3. Intervalos de confianza de las medias de los errores relativos (95% de probabilidad).

Fig. 3. Confidence intervals of means of the relative errors (probability 95%).

($1\text{mm/h} < I < 90\text{mm/h}$), las ecuaciones de ZAN-CHI y LAWS son las más adecuadas.

Para completar la comparación se aplicó el análisis de la varianza a las seis ecuaciones seleccionadas pero considerando distintos intervalos de intensidad. En la Tabla 3 se señalan las ecuaciones que presentan errores relativos significativamente menores para cada uno de los intervalos de I considerados.

La ecuación de ZANCHI junto con la de LAWS son las que, en general, proporcionan menores errores en su aplicación. De las dos, ZANCHI daría valores de error ligeramente más pequeños. En la Figura 4 se presentan las estimas de EC con las ecuaciones de ZANCHI y la Exponencial para intensidades de hasta 250 mm/h –en España la máxima intensidad registrada ha sido de 186 mm/h (media en 5 minutos)–. Como puede apreciarse, las esti-

	W	Br	S	B	Z	L	E
1 < I < 90 mm/h							
1 < I < 5 mm/h							
5 < I < 10 mm/h							
10 < I < 20 mm/h							
20 < I < 90 mm/h							

Tabla 3. Ecuaciones que proporcionan menores errores en las estimas de EC.

Table 3. Equations provide minor relative errors in the estimate of kinetic energy.

mayores, por encima de 0,25. Con este criterio las ecuaciones descartadas son las de PARK et al.; COUTINHO y TOMAS; RENARD et al.; UIJLENHOET y STRICKER; USON y RAMOS; CERRO et al.; y VAN DIJK et al. para las restantes, WISCHMEIER et al. (W); BRANDT (BR); SEMPERE (S); BOLLINNE et al. (B); ZANCHI et al. (Z); LAWS et al. (L); y Exponencial (E), el análisis de la varianza permitió constatar que las ecuaciones de ZAN-CHI et al. y LAWS et al. presentaban errores relativos medios significativamente distintos y menores que los del resto, sin que entre ambas puedan establecerse diferencias significativas. Por tanto, puede concluirse que, para el rango global de registros utilizados en este trabajo

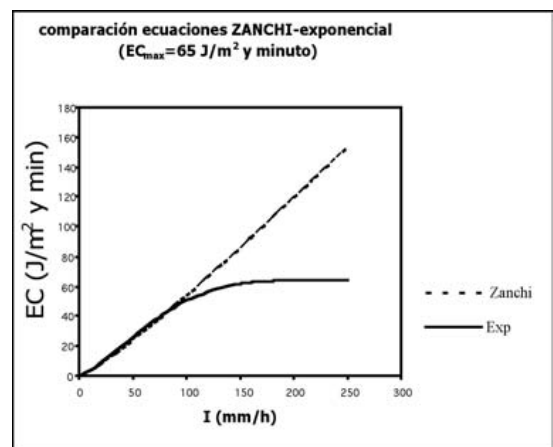


Figura 4. Comparación ecuaciones de ZANCHI y Exponencial.

Fig. 4. Comparison of ZANCHI and Exponential equations.

mas por ambas ecuaciones son muy parecidas para valores de $I < 100$ mm/h, pero a partir de ese valor las diferencias son muy notables, ya que la ecuación de ZANCHI no considera límite superior para la EC, por lo que según esa ecuación la EC crecería de forma indefinida con la intensidad.

CONCLUSIONES

- La ecuación empírica más utilizada en los trabajos de erosión en España ha sido y es actualmente la de WISCHMEIER y SMITH, obteniéndose con ella la energía cinética que interviene en el cálculo del factor pluvial (R) de la USLE. La aplicación de esta ecuación, por lo menos en el intervalo de intensidad considerado en este análisis $1 \leq I \leq 90$ mm/h, proporciona resultados muy razonables, con errores relativos bajos para todos los tramos de intensidad.

SEMPERE TORRES *et al.* (1992) concluyeron, también, que dicha ecuación de WISCHMEIER y SMITH, proporcionaba resultados más que razonables en el cálculo de EC de la precipitación a partir de la intensidad de la lluvia.

- Los resultados obtenidos en la comparación de las ecuaciones nos inducen a pensar que la relación EC-I no está muy condicionada por la localización geográfica. En el análisis comparativo de las ecuaciones seleccionadas, se aprecia que ecuaciones obtenidas y ajustadas con datos de localidades muy alejadas proporcionan estimas que se ajustan bien a los valores registrados en Madrid.

- De todas las ecuaciones seleccionadas en el estudio comparativo, se observa que con las que se obtienen menores errores relativos medios son las de ZANCHI y LAWS y de estas dos con la de ZANCHI, aunque presenta el inconveniente del crecimiento indefinido de la EC cuando lo hace la I.

- En el análisis comparativo de las ecuaciones de ZANCHI y Exponencial se concluye que, aunque la ecuación de ZANCHI proporciona con la totalidad de los datos mejores resultados que la Exponencial, ésta proporciona también muy buenos resultados, similares a los obtenidos con la ecuación de ZANCHI hasta I de 100 mm/h (Fig.4). Además, la ecuación Exponencial considera un límite de energía máximo y, por tanto, tiene significado físico y práctico.

- La ecuación Exponencial, a diferencia de algunas de las ecuaciones presentadas en el análisis comparativo, no presenta limitaciones en su aplicación, solamente la consideración que sirvió como premisa en la obtención de dicha ecuación de manejar precipitaciones con $I > 1$ mm/h, para considerar el hecho de lluvia erosiva.

- Para intensidades entre 20 y 90 mm/h los errores relativos medios no son significativamente distintos con la aplicación de cualquiera de las expresiones de WISCHMEIER *et al.*; SEMPERE TORRES; ZANCHI *et al.*; LAWS *et al.* y Exponencial, habiendo obtenido con el análisis de varianza en ese intervalo que las ecuaciones de SEMPERE y Exponencial presentan un error relativo medio menor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOLLINNE, A.; FLORINS, P.; HECQ, P.; HOMERIN, D.; RENARD, V. y WOLFS, J. L. 1984: Etude de l'énergie des pluies en climat tempéré océanique d'Europe Atlantique. Z. Geomorph. N.F., 27-35.
- BRANDT, C. J. 1990: Simulation of size distribution and erosivity raindrops and throughfall drops. Earth Surface Processes, 15: 687-698.
- CARTER, C. E.; GREER, H. J. y FLOYD, B. 1974: Raindrop characteristics in South Central United States. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 17: 1033-1037.

- CERRO, C.; BECH, J.; CODINA, B. y LORENTE, J. 1998: Modeling rain erosivity using disdrometric techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 731-735.
- COUTINHO, M.A. y TOMAS, P. P. 1985: Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Centre. *Catena*, 25: 187-197.
- HUDSON, N.W. 1965: The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion. MSc Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.
- HUDSON, N. W. (1981): *Soil Conservation*. London, Batsford.
- JAYAWARDENA, A. W. y REZAUR, R. B. 2000: Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. *Hydrological Processes*. Vol. 14: 1069-1082.
- JOSS, J. y WALDVOGEL, A., 1967: Ein spektrograph für Niederschlag atropfen mit automatischer auswertung (A spectrograph for automatic measurement of rainfalls). *Pure and Applied Geophysic*. 68: 240-246.
- LAWS, J.O. y PARSONS, D. A. 1943: The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysics Union*, 24: 452-460.
- MCGREGOR, K. C. y MUTCHLER, C. K. 1976: Status of the R factor in Northern Mississippi, soil erosion: prediction and control. *Soil Conservation Society of America*, 135-142.
- MORGAN, R. P. C. 1997: *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa, 343 pp.
- PARK, S. W., MITCHELL, J. K. y BUBENZER, G. D. 1980: An analysis of splash erosion mechanics. *Proceedings of the ASAE 1980 Winter Meeting*, paper n° 80-2502. Chicago (USA).
- RENARD, K. G., FOSTER, G. R., WEESIES, G. A., MCCOOL, D. K. y YODER, D. C. 1997: Predicting Soil erosion by water: A Guide to Conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA. Agriculture Handbook N° 703*. 404 pp.
- ROSEWELL, C. J. 1986: Rainfall Kinetic energy in eastern Australia. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 1695-1701.
- SALLES, C. y POESEN, J. 2000: Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrological Processes*. Vol. 14: 271-282.
- SALLES, C.; POESEN, J. y SEMPERE TORRES, D. 2002: Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of Hydrology*. Vol. 257: 256-260.
- SEMPERE TORRES, D.; SALLES, C.; CREUTIN, J.D. y DELRIEU, G. 1992: Quantification of soil detachment by raindrop impact: performances of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms. In: Boegen, J., Walling, D.E.,T.(Eds). *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*. IAHS publ. n°. 210: 115-124.
- SEMPERE TORRES, D.; PORRÁ, J. M. y CREUTIN, J. D., 1994. A general formulation for raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, n.º 12: 1494-1502.
- UPLINGER, C. W., 1981: A new formula for raindrop terminal velocity. 20th Conference of Radar Meteorology. *American Meteorology Society*, Boston (USA), 389-391.
- USON, A. y RAMOS, M. C. 2001: An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena*. Vol. 4: 293-305.
- VAN DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A. y ROSEWELL, C. J. 2002: Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*. Vol. 261: 1-23.
- UIJLENHOET, R. y STRICKER, J. N. M. 1999b: A consistent rainfall parametrization based on the exponential raindrop size distribution. *Journal of Hydrology*. Vol. 218: 101-127.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D. 1978: Predicting rainfall erosion. *United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook n° 537*.
- ZANCHI, C. y TORRI, D. 1980: Evaluation of rainfall energy in central Italy. In: de Boodt, M. Gabriels, D. (Eds.), *a Soil Erosion Assessment*, Wiley, Chichester, England, 133-142.