



5º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL

5º Congreso Forestal Español

Montes y sociedad: Saber qué hacer.

REF.: 5CFE01-413

Editores: S.E.C.F. - Junta de Castilla y León
Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009
ISBN: 978-84-936854-6-1
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación de la energía cinética de la lluvia a partir de la precipitación diaria. Nueva metodología para el cálculo del factor “R”. Aplicación en España.

MARGARITA ROLDÁN SORIANO¹

¹Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 28032 Madrid. España. margarita.roldan@upm.es.

Resumen

El trabajo de investigación versa sobre la caracterización cuantitativa de una propiedad de la lluvia muy importante, la energía cinética. Esta propiedad es importante por ser una de las fuentes de energía en el proceso de la erosión hídrica y por tanto, de la pérdida de suelo que sufren nuestros campos. La mayoría de las expresiones que obtienen energía cinética de la lluvia lo hacen en función de la intensidad. La obtención de la intensidad de la lluvia es en muchos casos difícil porque requiere de la información suministrada por el pluviógrafo, instrumento de medida que no siempre está ampliamente distribuido.

Para intentar soslayar los problemas que conlleva la obtención de la energía cinética a partir de la intensidad, en este trabajo se ha obtenido una ecuación que relaciona la energía cinética y precipitación diaria, parámetro de lluvia de más fácil disponibilidad, ya que es posible obtenerlo en estaciones que dispongan solo de pluviómetro.

De los resultados obtenidos en este trabajo, a nuestro juicio, se deduce que la relación que mejor recogería la correspondencia entre la energía cinética y la precipitación diaria es una ecuación potencial en la que aparecen unos límites superior e inferior de dicha energía. Dichos límites se han determinado al aceptar que la energía cinética no crece de forma ilimitada, y presenta un valor máximo para la lluvia que se presentase en una determinada latitud, así como un valor mínimo, por debajo del cual su efecto sobre el suelo sería insignificante desde el punto de vista erosivo.

En cuanto al empleo de dicha ecuación potencial podría ser implementada en modelos para cálculo de la erosión hídrica, tanto del tipo distribuidos como agregados. En este trabajo se presenta su aplicación en el cálculo de factor “R”, presentando una nueva metodología sencilla y práctica.

Palabras clave

Erosividad de la lluvia, Energía cinética de la lluvia, Precipitación diaria, Disdrómetro.

1. Introducción

El principal agente disgregador del suelo es el impacto de las gotas de lluvia sobre él, y la energía del agua que precipita es de uno a dos órdenes de magnitud superior a la capacidad disgregadora de la escorrentía (Sempere Torres, 1994). La cantidad de suelo disgregado y desplazado por la acción del impacto de la gota será mayor a medida que aumenta su energía, y por tanto, será mayor a medida que aumenta el diámetro y la velocidad de la gota.

La capacidad potencial erosiva de la lluvia se ha venido expresando, tradicionalmente, a través de la energía cinética, bien directamente o a través de índices derivados de ella (Sempere Torres, 1994). Si se conociese la distribución diamétrica y de velocidades de las gotas de lluvia, se podría calcular la energía cinética de esa precipitación. Pero el no disponer

de esa caracterización diamétrica de la lluvia, ha hecho que la energía cinética (EC) se haya venido evaluando de forma indirecta en función de alguna característica de la lluvia más fácilmente medible que los diámetros de las gotas, y relacionada con ellos, normalmente la intensidad (I).

En los estudios de erosión, la energía cinética de la lluvia necesaria para calcular la erosividad, se ha venido calculando por tanto, con relaciones empíricas del tipo $EC=f(I)$, pero en la aplicación de dichas relaciones es necesario conocer como se distribuye la lluvia en función del tiempo, es decir, disponer de datos de lluvia registrados en estaciones con pluviógrafos, y que por tanto, faciliten pluviogramas que permitan analizar la lluvia y calcular para intervalos de tiempo de intensidad constante, las energías cinéticas y con la suma de estas, la energía cinética total de la lluvia analizada. El deseo de relacionar la energía cinética con la cantidad total de lluvia más que con la intensidad se debe, principalmente, a que la precipitación total es más fácil de obtener en estaciones meteorológicas normales, que dispongan sólo de pluviómetro. En el ámbito de las relaciones existentes entre $EC=f(P)$ existen muchas limitaciones, las principales son las siguientes:

1. La primera limitación es la escasez de expresiones que relacionen la energía cinética y la cantidad total de lluvia.

2. La mayoría de las expresiones existentes entre cantidad de lluvia y algún factor relacionado con la energía de la lluvia, lo que buscan es obtener erosividad de lluvia, no energía cinética, considerando aquella como el efecto combinado del impacto y de la escorrentía. Algunas de esas expresiones vienen recogidas en Morgan (1997).

3. En algunas de las expresiones existentes se considera que las posibles diferencias en los coeficientes en la relación EC-P, (Jayawardena y Rezaur, 2000 a y b; Lal, 1998), se deben a la variabilidad de los parámetros de la lluvia dentro de una misma tormenta o bien, de una tormenta a otra.

4. Las expresiones existentes se obtuvieron en localizaciones geográficas o latitudes muy diferentes y no hay seguridad de que esta circunstancia no influya en las características de las precipitaciones que intervienen en la energía total de una determinada precipitación.

5. Parece lógico pensar que la EC asociada a una lluvia en un intervalo de tiempo concreto, presente un límite máximo para una determinada latitud, y no crezca de forma indefinida.

2. Objetivos

El objetivo en este trabajo es poder calcular la energía cinética con algún parámetro de lluvia más fácil de obtener que la intensidad, como es la lluvia diaria registrada en un observatorio pluviométrico normal. La obtención de una expresión que relacionase energía cinética con precipitación diaria resolvería los problemas que se plantean en el cálculo de la energía cinética en función de la intensidad

3. Metodología

3.1. Instrumento de medida. Se ha utilizado un disdrómetro (Joss y Waldvogel, 1967), aparato de medida automático que permite obtener directamente información ligada a la lluvia y caracterizar directamente, a tiempo real, la población de tamaños de gotas de esa lluvia. El disdrómetro registra el número de impactos de gota por minuto, agrupados en 20 clases (o canales), por intervalos de diámetros, con diámetros comprendidos entre 0.313mm hasta >5.145mm. Transforma la cantidad de movimiento en un pulso eléctrico que se corresponde biunívocamente con la energía cinética de la gota y por tanto, con su diámetro.

3.2. Área de estudio. El transductor del disdrómetro se instaló en la terraza de la Escuela de Ingeniería Técnica Forestal de Madrid, donde no existía ningún obstáculo que pudiese alterar el régimen de caída de las gotas sobre la superficie de muestreo. Se registraron las lluvias acaecidas durante dos años consecutivos, de forma continuada, minuto a minuto, día y noche.

3.3. Asignación de una energía cinética representativa para cada canal. La energía cinética de la lluvia es la suma de las energías cinéticas de cada una de las gotas que individualmente golpean el suelo.

$$EC_{gota} = \frac{\Pi}{12 * 10^3} D^3 \rho v^2, \text{ que sería la energía cinética en Julios de una gota de lluvia de}$$

diámetro equivalente “D” en cm, “v” velocidad terminal en m/s y “ρ” densidad en g/cm³

$$EC = \frac{\Pi * \rho}{12 * 10^3} \sum_i^n D_i^3 v_i^2, \text{ que sería la energía cinética de una lluvia en Julios, suma de las}$$

energías cinéticas de todas las gotas de esa lluvia con diámetros equivalentes D_i y velocidades terminales v_i . Para evaluar la energía cinética de una lluvia con la información obtenida con el disdrómetro, es decir nº de gotas por intervalo de diámetro, es necesario conocer la masa de la gota, función del diámetro, y velocidad. La energía cinética representativa de un canal se obtuvo como el valor medio de las energías cinéticas calculadas en un rango de diámetros comprendidos entre el diámetro superior e inferior del intervalo. Para seleccionar la ecuación de velocidad terminal para un determinado diámetro se hizo un estudio comparativo de las fórmulas de cálculo más habituales (Roldán, 2005). Esta comparación permitió seleccionar la expresión exponencial de Uplinger (1981) para asignar dicha velocidad, $v = 48.54 D^{-1.95D}$ siendo “v” velocidad terminal en m/s y “D” diámetro equivalente en cm. Los valores de energías cinéticas representativos por canal se recogen en la tabla 1

3.4. Obtención de datos de P_{24h} y EC_{24h} . La precipitación en 24 horas (P_{24h}) se obtuvo como suma de las cantidades registradas, digitalmente con el disdrómetro, minuto a minuto durante 24 horas. Los datos de precipitación empleados son para $P_{24h} > 1mm$, por considerar que precipitaciones menores de 1mm distribuidas durante 24 horas supondrían una carga de energía muy pequeña. El número de datos de P diaria registrados con esta condición es de 39 y el máximo valor registrado en Madrid durante esos dos años, en 24 horas, fue de 25.6mm. . La energía cinética de la lluvia de 24 horas (EC_{24h}), se obtiene como suma de las energías cinéticas calculadas minuto a minuto, en los “n” minutos de lluvia del día, y sabiendo que la superficie de muestreo es 50 cm². El máximo valor de EC diaria correspondiente a la máxima

P_{24h} fue de 435 J/m² y día. $EC_{minuto} = \sum_{i=1}^{i=20} EC_i * n_i / 0.005$, EC_i es energía cinética representativa

del canal i en J/gota; n_i es número de impactos en canal i en 1 minuto; EC_{minuto} es energía cinética registrada en J/m^2 y minuto.

$EC_{24h} = \sum_{j=1}^{j=n} EC_j$, EC_{24h} , energía cinética de la lluvia diaria en J/m^2 y día; EC_j , es energía cinética en el minuto j , en J/m^2 ; n , número de minutos con lluvia en el día.

Tabla1. Energía cinética por canal.

Canal	$D_{\text{inf}}(\text{mm})$	$D_{\text{sup}}(\text{mm})$	Energía Cinética (J/gota)
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

3.5. Formulación del modelo. Se buscó una ecuación de regresión de tipo potencial $EC_{24h} = EC_{\text{max}}(1 - a^{f(P_{24h})})$, que relacionase la EC_{24h} y P_{24h} siendo, EC_{24h} , la energía cinética en J/m^2 y día, P_{24h} precipitación diaria en mm, y que considerase una energía cinética mínima (EC_{min}) y una máxima (EC_{max}), siendo “a” el parámetro que recoge la influencia de EC_{min} . La EC_{max} es la energía cinética que se considera como límite máximo asociada a una precipitación diaria en una latitud, lo que supone aceptar que la energía cinética no tendrá un crecimiento ilimitado, ya que tampoco lo hace P_{24h} , presentando un valor máximo probable para una determinada latitud. Desde el punto de vista erosivo se considera una energía cinética mínima, haciendo la reflexión de que la energía cinética diaria debería también estar acotada inferiormente, por lo menos desde ese punto de vista erosivo.

3.6. Asignación de una energía cinética máxima. El desconocimiento de un valor de energía cinética máxima, asociado a una precipitación máxima probable, y dado que los valores de precipitación y energía registrados en Madrid no fueron elevados, hizo que con dicha información no fuese posible asignar un valor de energía cinética máxima asociado a una determinada lluvia. Tampoco existen datos recogidos en bibliografía de energías cinéticas diarias asociadas a precipitaciones diarias elevadas, que nos ayuden a tener una opinión o un juicio claro, de los valores que pudieran alcanzar dichas energías. La necesidad de establecer

un máximo umbral de energía cinética y la falta de referencias al respecto, llevó a plantear el siguiente procedimiento de cálculo:

1. Se buscaron referencias de las mayores precipitaciones registradas en España. En la publicación “Riesgos Climáticos en la Península Ibérica” (Olcina, 1994) se hace referencia a una precipitación de 871mm, registrada en la localidad de Jávea (Alicante) en 24 horas, el día 02-10-1957. La energía cinética total asociada a esa precipitación es de suponer que tuvo que ser muy elevada.

2. Se asignó a esa precipitación (871mm) una energía cinética. Dicha asignación se hizo de la siguiente manera:

a) Se calcularon para esa precipitación las intensidades horarias, asumiendo la ley Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F), disponible en España (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (1993)). La máxima intensidad horaria estimada para ese aguacero fue de 350 mm/h, considerándose constante la intensidad en los 60 minutos.

b) Se obtuvieron para esas intensidades horarias (mm/h) las energías cinéticas parciales (tabla 2) con la expresión exponencial EC-I siguiente (Roldán, 2005):

$$EC = 65 - e^{(-9.8679 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 - 4.987 \cdot 10^{-3} \cdot I + 4.1779)} \quad [1] \text{ I, intensidad mm/h; EC energía cinética J/m}^2 \text{ y minuto.}$$

c) La energía cinética total de la lluvia en las 24 horas EC_{24h} será el sumatorio de las energías cinéticas horarias. $EC_{1h} = EC_{\min} \cdot 60$, siendo EC_{\min} las energías cinéticas, en J/m^2 y minuto, obtenidas para una intensidad I supuesta constante durante los 60 minutos de cada hora. La energía cinética total de esa precipitación fue de $17882 J/m^2$.

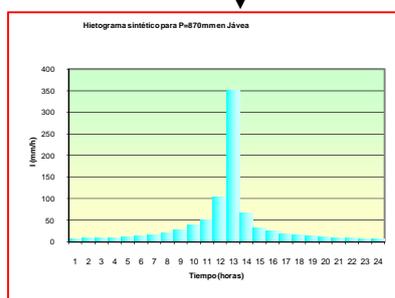
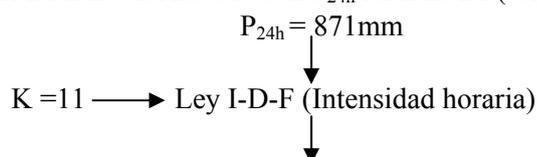
$$EC_{24h} = \sum_{i=1}^{i=24} EC_{1h} = 17882 J/m^2$$

Tabla 2. EC (J/m^2 y minuto)-I (mm/h) para $P=870mm$

I (mm/h)	EC (J/m^2 y min)
350.85	64.99
103.21	51.37
66.41	34.69
49.03	24.70
38.88	18.71
31.99	14.73
27.10	12.00
23.42	10.02
20.56	8.53
18.26	7.37
16.37	6.45
14.80	5.71
13.47	5.09
12.33	4.57
11.35	4.14
10.49	3.76

9.73	3.43
9.05	3.15
8.45	2.90
7.91	2.68
7.43	2.48
6.99	2.30
6.58	2.14
6.22	2.00

ESQUEMA DE OBTENCIÓN EC_{24h} MÁXIMA (JÁVEA, 02-10-57)



EC-I → $EC = 65 - e^{(-9.8679 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 - 4.987 \cdot 10^{-3} \cdot I + 4.1779)}$ (Ecuación n°1)

↓

EC_{minuto}

↓

$EC_{1\text{hora}} = EC_{\text{minuto}} (\text{J/m}^2 \text{ y minuto}) \cdot 60 \rightarrow EC_{24h} = \sum_1^{24} EC_{1h} = 17882 \text{ J/m}^2$

3.7. Generación de datos de energía cinética para precipitaciones elevadas. Procedimiento de cálculo. El propósito era obtener una ecuación de regresión entre EC_{24h} - P_{24h} que pudiese aplicarse a rangos de precipitación y energía cinética mayores a los registrados. El mayor valor registrado de EC_{24h} - P_{24h} en Madrid fue 435 (J/m^2 y día)-25.6(mm). El problema, por tanto, era la falta de datos observados de energías cinéticas para valores de precipitación altos. Para intentar paliar este problema de falta de valores de EC_{24h} de $P_{24h} > 25\text{mm}$ se estimaron energías cinéticas diarias. El procedimiento de estimación es similar al empleado en la obtención de la energía cinética máxima.

a. Se obtuvieron los datos de precipitaciones extremas registrados en España (Olcina, 1994), distribuidos por todo el ámbito peninsular y por tanto, correspondientes a estaciones de características muy diferentes desde el punto de vista pluviométrico.

b. Se obtuvieron precipitaciones comprendidas entre 25 y 871 mm. La selección de dichos valores P_{24h} se hizo con una proporción logarítmica (Roldán, 2005) aceptando que la distribución de P_{max} sigue una LOG normal. La proporción de datos correspondientes al intervalo de $1\text{mm} < P_{24h} \leq 25\text{mm}$, según la proporción logarítmica, es del 50%. En nuestro caso,

para no perder ningún dato observado, se hace corresponder el total de los datos observados con el 50% de la población que servirá para buscar la ecuación de regresión (Roldán, 2005). Según lo anterior, la proporción de datos según el rango de precipitación desde 25mm hasta 870mm, sería del otro 50%, distribuido por intervalos de precipitación, y teniendo en cuenta la proporción logarítmica. El número de datos empleados en la búsqueda de la ecuación, por intervalos de P se recoge en la tabla inferior (nº3). En Roldán (2005) se recoge la metodología de selección y los datos empleados.

El total de datos de EC_{24h} (para $P_{24h} > 25mm$) estimados fue de 39, en igual número que el número de valores EC_{24h} ($1mm < P_{24h} \leq 25mm$) registrados.

Tabla 3. Datos empleados por intervalos de precipitación.

Precipitación (mm)	Nº de datos empleados
1-25	39
25-100	16
100-200	8
200-300	5
300-400	3
400-500	2
500-600	2
600-700	1
700-800	1
800-870	1

c. Se obtuvieron para las $P_{24h} > 25mm$ seleccionadas sus EC_{24h} siguiendo un procedimiento análogo al descrito en la estimación de la EC_{max} asociada al aguacero registrado en Jávea

3.8. Asignación de Energía cinética mínima. La consideración de una energía cinética mínima para la lluvia, se hizo con la reflexión de que el valor de energía cinética de una lluvia diaria debería también, estar acotado inferiormente, por lo menos desde el punto de vista erosivo. La asignación de un valor de energía cinética mínima se basó en los datos de precipitación registrados en Madrid con $P_{24h} > 1mm$. El menor valor registrado fue de $EC_{24h} = 15.7 J/m^2$ correspondiente a la precipitación diaria de 1.03mm.

4. Resultados y Discusión

Antes de presentar los resultados es conveniente hacer una breve recapitulación. Se trata de obtener una ecuación de regresión de tipo potencial $EC_{24h} = EC_{max} (1 - a^{f(P_{24h})}) (*)$.

-El valor de EC_{max} se ha estimado aplicando la ecuación [1] ya disponible, del tipo $EC=f(I)$ (Roldán, 2005), a la máxima precipitación diaria registrada en España (871mm; $EC_{24h} = 17882 J/m^2$)

-Para estimar los coeficientes de la ecuación (*) se dispone de pares de valores de EC_{24h} y P_{24h} registrados con el disdrómetro, de los que únicamente se tienen en cuenta las $P_{24h} > 1mm$ y además, todos inferiores a 25.6mm. Hay pues una limitación importante de pares de valores $EC_{24h}-P_{24h}$ medidos para precipitaciones altas. Usar sólo los registros disponibles, limitaría considerablemente el campo de validez de la ecuación (*).

-Era pues necesario obtener pares de valores EC_{24h} - P_{24h} correspondientes a $P_{24h} > 25.6\text{mm}$, sabiendo que había disponibles 39 pares EC_{24h} - P_{24h} con $1 \leq P_{24h} \leq 25.6\text{mm}$ y asumiendo que la frecuencia de valores de P_{24h} sigue una distribución LOG normal, se seleccionaron otros 39 valores de P_{24h} comprendidos en el rango $25.6 \leq P_{24h} \leq 871\text{mm}$. Para cada una de esas precipitaciones se estimó su EC_{24h} utilizando la ley IDF (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993) para estimar el hietograma asociado con intensidades constantes de 1 hora y aplicando la ecuación [1] $EC=f(I)$ (Roldán, 2005).

-Por tanto, para estimar la ecuación (*) se dispone de 78 pares de valores EC_{24h} - P_{24h} de los que 39 se registraron con el disdrómetro para $1 \leq P_{24h} \leq 25.6\text{mm}$, y los restantes se corresponden a P_{24h} extremas anuales, registradas con pluviómetro en el resto del territorio español, cuya EC_{24h} se ha estimado con la ecuación [1].

La estima de los parámetros de (*) se hizo utilizando el programa estadístico SPSS v.11.5 para Windows y considerando, para la $f(P_{24h})$, funciones polinómicas. De los resultados obtenidos con las posibles combinaciones planteadas tanto en el valor de "a", como en la función a la que se eleva, se obtuvo en el proceso de búsqueda, que la ecuación que mejor ajustaba los datos y proporcionaba el mejor coeficiente de correlación, era una ecuación potencial cuyo valor de "a" fue de 3.5.

La ecuación fue: $EC_{24h} = 17882(1 - 3.5^{(-1.8392 \cdot 10^{-6} \cdot P_{24h}^2 - 8.322 \cdot 10^{-4} \cdot P_{24h})})$ [2] $R^2 = 0.99758$. Se representaron sobre unos ejes coordenados los residuos ($Residuos = Valor observado - Valor calculado$) y el error relativo ($Error = \frac{Valor observado - Valor calculado}{Valor observado} \cdot 100$), cometidos con la aplicación de [2] y se

observó que se sobrevaloraban los valores de energía cinética para precipitaciones menores de 100mm. En la figura nº2 se representan los errores relativos, con detalle a los correspondientes a $P_{24h} \leq 100\text{mm}$.

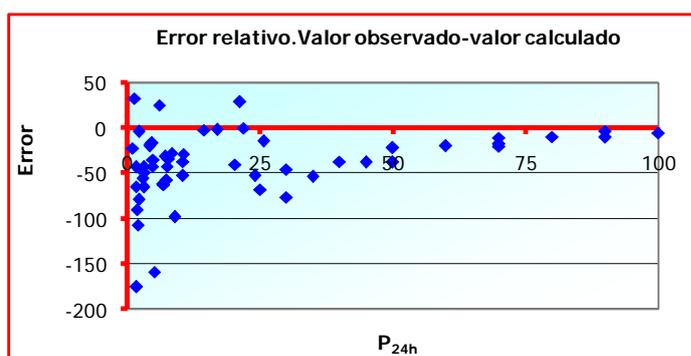


Figura 2- Error relativo con aplicación de ecuación 2

Aunque el resultado de la regresión es satisfactorio $R^2 = 0.99758$, la diferencia entre los valores de EC_{24h} correspondientes a las P_{24h} pequeñas y a las P_{24h} grandes, hace que la minimización de los errores de las estimas de EC_{24h} correspondientes a P_{24h} grandes, sean los que en mayor medida condicionen los valores de los parámetros estimados, imponiendo así un mejor ajuste para esos valores altos de P_{24h} que para los bajos. Esta circunstancia se aprecia inequívocamente al representar los errores (figura nº2). La ecuación [2] es pues satisfactoria para valores de P_{24h} grandes, pero mejorable para los valores más pequeños. Con objeto de

mejorar esta estima se planteó otra regresión con el mismo tipo de función, pero reduciendo el número de pares de valores EC_{24h} - P_{24h} correspondientes a valores altos. Dicha búsqueda se justifica por dos motivos principalmente. En primer lugar, los valores de EC_{24h} que se están sobrestimando son los correspondientes a los valores observados. Y por otro lado, porque los valores de EC_{24h} que se están sobrestimando se corresponden a las P_{24h} que aparecen con mayor frecuencia. Se mantuvieron los 39 pares de valores registrados con el disdrómetro y de los 39 restantes solo se dejaron 4 con valores de P_{24h} comprendidos entre 25 y 200 mm. Los criterios que sirvieron para esta selección fueron los siguientes:

Se solicitaron al Instituto Nacional de Meteorología los datos de 20 años de las P_{24h} en 8 estaciones, distribuidas por todo el ámbito nacional, y por tanto con características pluviométricas muy diversas. De dichas estaciones se analizaron las frecuencias con las que aparecían las $P_{24h} > 1\text{mm}$, en ninguna de las estaciones hubo en ese período de 20 años precipitaciones superiores a 200mm. El 90% de las precipitaciones registradas se encontraban en el intervalo 1-25mm, el 8% entre 25-100mm y el resto entre 100-200mm. Para no perder ningún valor observado se hizo corresponder el número de datos observados (39) con el 90% de la frecuencia. De tal manera que el número de datos empleados en la nueva regresión fue de 39 datos EC_{24h} - P_{24h} observados, y 4 datos de EC_{24h} estimados para $P_{24h} > 25\text{mm}$. Con estos pares de valores la ecuación obtenida fue: $EC_{24h} = 17882(1 - 3.5^{(-3.279*10^{-6} * P_{24h}^2 - 6.2967*10^{-4} * P_{24h})})$ [3] $R^2 = 0.9944$. En la figura 3 se representan los errores relativos cometidos con su aplicación y puede observarse la mejora sustancial respecto a la situación descrita en la figura 2.

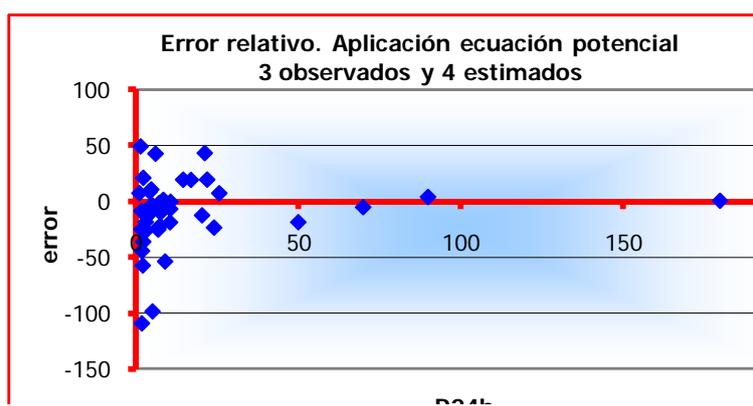


Figura 3. Erro relativo con aplicación de ecuación 3

La ecuación [2] sobrestima para valores bajos de P_{24h} mientras ajusta mejor para P_{24h} altos, mientras que [3] ajusta mejor para valores bajos de P_{24h} sobrestimando para los altos. Ambas funciones daban el mismo valor de EC_{24h} para $P_{24h} = 140\text{mm}$ que se corresponde con EC_{24h} de 3108.34 J/m^2 . En la figura nº4 se han representado las dos ecuaciones acopladas en dicho punto (140; 3108.34), situándose sobre dicha representación los 39 valores de EC_{24h} registrados con el disdrómetro y los 39 estimados con la ecuación [1]. Por tanto, se recomienda el uso combinado de las ecuaciones [2] y [3] para estimar EC_{24h} con datos de P_{24h} :

$$* EC_{24h} = 17882(1 - 3.5^{(-3.279*10^{-6} * P_{24h}^2 - 6.2967*10^{-4} * P_{24h})}) [3] \quad 1 < P_{24h} \leq 140\text{mm}$$

$$* EC_{24h} = 17882(1 - 3.5^{(-1.8392*10^{-6} * P_{24h}^2 - 8.322*10^{-4} * P_{24h})}) [2] \quad P_{24h} \geq 140\text{mm}$$

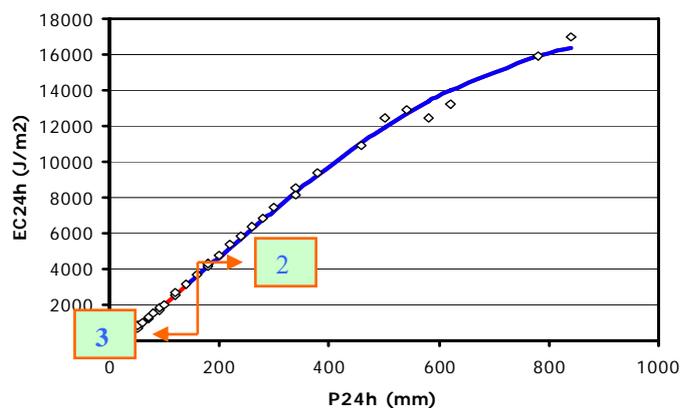


Figura 4. Representación de ecuaciones de regresión potenciales 2 y 3

Estas ecuaciones además de presentar coeficientes de correlación elevados, presentan otras ventajas:

*Buena explicación del fenómeno al distribuirse sus residuos y % de errores relativos, de forma sensiblemente aleatoria.

*Desde el punto de vista físico y erosivo parece más razonable, considerar un valor de energía máximo y otro mínimo.

*Facilidad en la obtención de datos, pues se obtiene la EC_{24h} con la precipitación diaria. No es necesario disponer de bandas de pluviógrafo.

*Sencillez y rapidez de cálculo, ya que no es necesario analizar las bandas de los pluviógrafos. Se obtiene EC_{24h} con una sencilla hoja de cálculo (EXCEL) a partir de la precipitación diaria suministrada por el Instituto de Meteorología.

*Un límite de aplicación muy amplio, ya que su rango de validez está en $1\text{mm} \leq P_{24h} \leq 870\text{mm}$.

*La ecuación potencial podría ser implementada en modelos para cálculo de la erosión hídrica, tanto del tipo distribuidos como agregados. Y en estos estudios de erosión se facilitaría el cálculo de la erosividad de la lluvia, tanto en la facilidad de obtención de datos, como en economía de tiempo y dinero.

4.1. Validación de la ecuación potencial

Se han hecho dos tipos de validación o contraste de la ecuación combinada [2] y [3]:

1ª Validación. Mediante comparación de las EC_{24h} obtenidas, por un lado con análisis de bandas de pluviógrafo y aplicación de una ecuación del tipo $EC=f(I)$, y por otro, las obtenidas con la aplicación de la(s) ecuación(es) potenciales. Las bandas de pluviógrafo seleccionadas lo fueron de dos zonas con precipitaciones bien distintas, Grazalema (Cádiz), donde se registran las máximas precipitaciones en España, y Málaga donde las precipitaciones

son escasas y en general pequeñas, pudiéndose presentar en algunas ocasiones precipitaciones extraordinarias de gran intensidad. En concreto, se seleccionaron para el análisis de comparación 27 bandas de pluviógrafo con precipitaciones comprendidas entre $10\text{mm} < P_{24h} < 254\text{mm}$, es decir, con valores de precipitación dentro del rango de las observadas y precipitaciones superiores al valor máximo observado. En la figura nº 5 se recoge una de las bandas de pluviógrafo analizada y correspondiente a la localidad de Grazalema. Para obtener la energía mediante el análisis de bandas de pluviógrafo, se descompuso la lluvia registrada en intervalos de intensidad constante, calculando la EC_{24h} total como suma de las energías cinéticas parciales, obtenidas con la relación exponencial EC-I [1]. En la tabla nº4 se recogen los valores obtenidos por los dos métodos. Y en la figura nº 6 se representa la ecuación potencial, y sobre ella los puntos EC_{24h} - P_{24h} correspondientes al análisis de las bandas.

2ª Validación. En esta segunda validación se han querido comparar los valores de EC_{24h} correspondientes por un lado, a P_{24h} registradas en Madrid y obtenidas con el disdrómetro, y por otro, las EC_{24h} obtenidas con la aplicación de la(s) ecuación(es) potenciales para esas P_{24h} registradas. En la tabla inferior (nº4) se recogen los valores de dicha comparación de energías, donde se aprecian las pequeñas diferencias en los valores calculados y observados.

En ambas validaciones los valores de EC_{24h} comparados con las EC_{24h} calculadas son de lluvias naturales en un caso recogidas con pluviógrafo, y en el otro con el disdrómetro. Y en ambos casos, como se ha observado, los errores son más que asumibles, ya que en la mayoría de los casos son menores del 10%.

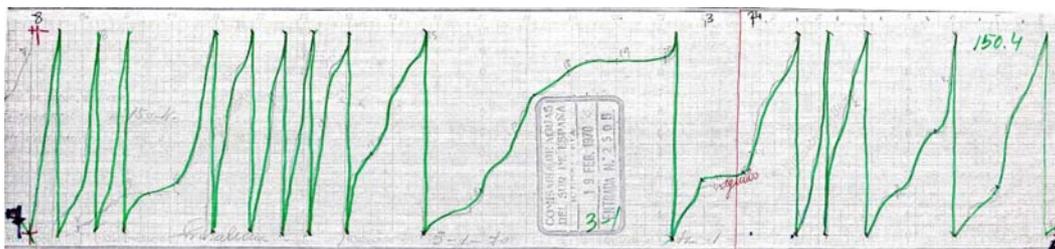


Figura 5. Banda de pluviógrafo analizada en Grazalema*(3/1/70-4/1/70)

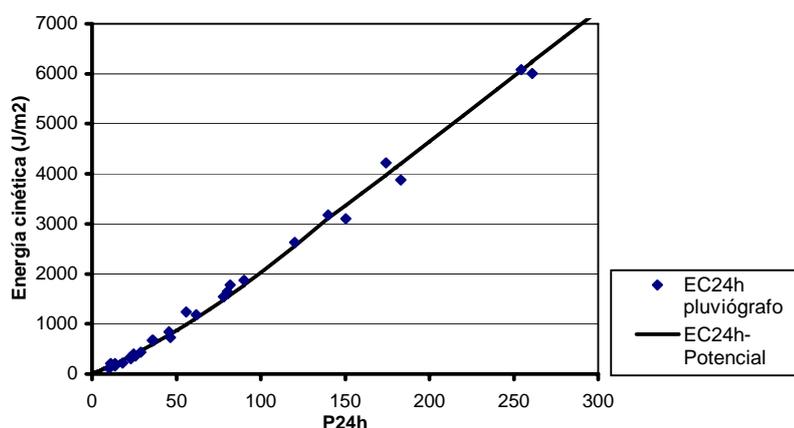


Figura 6. Representación de comparación de valores de EC_{24h}

Tabla 4. Comparación de valores de EC_{24h}

ESTACIÓN	FECHA	P_{24h} (mm)	EC Exponencial ($EC_{min}-I$)(J/m^2 y día)	EC Potencial ($EC_{24h}-P_{24h}$) (J/m^2 y día)
Grazalema	30/12/70;31/12/70	46.4	724.6	794
Grazalema	14/04/68;15/04/68	13.6	206.5	204
Grazalema	02/01/70;03/01/70	80.2	1646,5	1534
Grazalema	05/01/70;06/01/70	183	3869.9	4203
Grazalema*	03/01/70;04/01/70	150.4	3103.5	3371
Grazalema	06/01/70;07/01/70	23	304.2	359
Grazalema	10/01/70;11/01/70	77.8	1540.8	1477
Grazalema	11/01/70;12/01/70	120	2726.4	2549
Grazalema	12/01/70;13/01/70	90.6	1871.2	1785
Grazalema	14/04/68;15/04/68	13.6	206.48	204
Grazalema	14/01/70;15/01/70	36.2	676.9	598
Grazalema	15/01/69;16/01/69	261	6008.5	6238
Grazalema	17/12/68;18/12/68	254.3	6083.7	6063
Grazalema	18/02/68;19/02/68	10.1	113.3	149
Grazalema	20/11/70;21/11/70	61.8	1179.2	1116
Grazalema	22/01/66;23/01/66	174.2	4216.5	3977
Grazalema	24/01/70;25/01/70	13.7	173.1	205
Grazalema	25/01/70;26/01/70	13.5	163.2	203
Grazalema	30/12/70;31/12/70	46.4	724.6	794
Grazalema	08/01/70;09/01/70	24.6	402.2	387
Grazalema	09/01/70;10/01/70	29.8	431.3	463
Málaga	10/02/67;11/02/67	22.6	329.8	352
Málaga	12/02/67;13/02/67	25.8	359.3	408
Málaga	15/11/67;16/11/67	45.6	842.7	778.5
Málaga	04/10/59;05/10/59	82	1762.2	1576
Málaga	06/06/60;07/06/60	11	212.8	163.3
Málaga	06/11/66;07/11/66	21.5	279	334
Málaga	09/01/67;10/01/67	18.2	216.54	279
Málaga	12/01/64;13/01/64	55.7	1235.5	985
Málaga	21/12/64; 22/12/64	35.8	676.7	589



Tabla 5. Comparación de valores de EC_{24h}

P_{24h} registrada (mm)	EC_{24h} Observada (J/m^2 y día)	EC_{24h} calculada (J/m^2 y día)
2.58	34.8	36,8
5.58	82.4	80,8
8.89	106,1	130,7
13.94	205,7	209,7
1.81	23,5	25,7
23.26	417, 5	364,1
2.58	34,9	36,8
7.78	125,6	113,8

4.2. Aplicación de la ecuación potencial

Una vez validada la ecuación potencial $EC_{24h}-P_{24h}$, se hizo una aplicación al cálculo del factor R erosividad de la lluvia de USLE. Se hizo lo siguiente:

*Se hizo una primera selección de estaciones que estuviesen distribuidas por todo el ámbito español y con distintos valores del factor regional K (ley I-D-F). Las estaciones seleccionadas fueron: Grazalema (nº 5911); Cáceres (nº 3469); Huelva (nº 4605); Gijón (nº 1208); Pantano de Porma (nº 2633); Valencia (nº 8416); Ciudad Real (nº 4121); La Coruña (nº 1387); Barcelona “Montaña Pelada” (nº 200S); Murcia C.H. Segura (nº 7182B); Granada Base Aérea (nº 5514); Zaragoza (nº 9499); Madrid “Retiro” (nº 3195); Lanzarote (nº C0290). Los valores de K correspondientes a las localizaciones elegidas se obtuvieron, en principio, del mapa de iso-K que recoge la publicación del Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente (1993). Dichos valores de K fueron contrastados con la información suministrada por de Salas (2006) donde se ha hecho una evaluación de dicho factor. Algunos de ellos varían mucho su valor con respecto al original, por ejemplo, Grazalema y Pantano de Porma, otros, presentan ligeras discrepancias, dando por correctos los facilitados por de Salas Regalado, por disponer para su evaluación de una mayor información que en el estudio original de obtención de dichos parámetros.

*Se solicitaron los datos de precipitaciones diarias de las estaciones seleccionadas en el periodo 1975-2000 al Instituto Nacional de Meteorología. En la mayoría de las estaciones seleccionadas se obtuvieron los datos solicitados. En las estaciones donde no se disponía de todos los datos de precipitación solicitados, el número de años suministrados fue suficiente para poder hacer la evaluación del factor R (>10 años).

*En una hoja “EXCEL” se dispusieron los datos de precipitación diaria de las estaciones, de tal forma que fuese fácil manipularlas. Se obtuvo el “R” de la siguiente manera:

1. Se obtuvieron las energías cinéticas diarias aplicando las ecuaciones de regresión potenciales (nº 2 y nº 3), a las precipitaciones diarias registradas, sabiendo que:

$$EC_{24h} = \begin{cases} 17882(1 - 3.5^{(-3.279*10^{-6}*P_{24h}^2 - 6.2967*10^{-4}*P_{24h})}), & \text{cuando } 1 < P \leq 140 \text{ mm} \\ 17882(1 - 3.5^{(-1.8392*10^{-6}*P_{24h}^2 - 8.322*10^{-4}*P_{24h})}), & \text{cuando } 140 \leq P < 870 \text{ mm.} \end{cases}$$

2. Se obtuvo la intensidad máxima en 30 minutos, para todas las precipitaciones diarias, considerando que: $I_{30} = \frac{P_{24h}}{24} * K \frac{28^{0.1} - 0.5^{0.1}}{28^{0.1} - 1}$ siendo, K, el factor regional; P, la precipitación diaria (mm); I_{30} , es la intensidad máxima en 30 minutos, en cm/h.

*Se obtuvieron los valores de R diarios, de la siguiente manera: $R_{diario} = EC_{24h} * I_{30}$, EC_{24h} , en J/m^2 ; I_{30} , es la intensidad máxima en 30 minutos en cm/h; R_{diario} , en $(J/m^2)*(cm/h)$.

*Se obtuvieron los R mensuales como suma de los R_{diario} del mes considerado, $R_{mensual} = \sum R_{diario}$

*Se obtuvieron los valores de R anual como suma de los R mensuales registrados en el año considerado, $R_{anual} = \sum R_{mensual}$

Se obtuvo el valor R medio anual correspondiente a cada estación como media de los valores R anuales del periodo considerado, $R_{medioanual} = \sum \frac{R_{anual}}{n}$, siendo n, número de años considerados. Las unidades de R en la ecuación del modelo USLE son $(hJ/m^2)(cm/h)$, por lo que el valor de $R_{medioanual}$ habría que dividirlo por 100.

*Se representaron también gráficamente las curvas de distribución mensual del factor R, necesarias en el cálculo del factor "C" agrícola (Roldán, 2005; Roldán, 2006).

*Se hizo una comparación de los valores del factor R obtenidos en las estaciones seleccionadas y con la aplicación de las ecuaciones potenciales, que se van a designar con R_T y los valores R obtenidos en las mismas estaciones y recogidos en la publicación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1988) y que se van a designar como R_{W-S} , en los que la energía cinética de la lluvia se obtuvo mediante análisis de bandas de pluviógrafo aplicando la ecuación de la energía (del tipo EC-I), ya clásica, de Wischmeier y Smith. En la tabla nº6 aparecen los valores de R obtenidos con los procedimientos mencionados y en las estaciones seleccionadas.

*Los valores R_{W-S} de las estaciones de Barcelona (200S) y Zaragoza (9499) no aparecen en el documento de la publicación citada, pero sí en el plano de Iso-R, que si se incluye y se observa que Barcelona se encuentra en la isolínea de valor de $R=200$ y Zaragoza en el entorno de la isolínea de valor de $R=75$.



Tabla 6. Comparación de valores de R obtenidos aplicando la ecuación Potencial (R_T) y la de Wischmeier-Smith(R_{W-S}).

ESTACIÓN	R_T	R_{W-S}
Grazalema (5911)	495	540
Cáceres (3469)	68	75
Huelva (4605)	121	150
Gijón (1208)	116	115
Pantano de Porma (2633)	168	150
Valencia (8416)	118	175
Ciudad Real (4121)	49	52
La Coruña (1387)	118	125
Barcelona "Montaña Pelada"(200S)	181	*
Murcia C.H. Segura (7182B)	74	80
Granada "Base Aérea"(5514)	43	43
Zaragoza (9499)	71	*
Madrid (3195)	53	65
Lanzarote(CO290)	13	12

5. Conclusiones

1. Con la ecuación potencial es posible obtener la energía cinética para precipitaciones elevadas ya que esta ecuación se obtuvo con el máximo de precipitación registrado en España y su energía cinética generada.

2. Los valores de K asignados a las estaciones seleccionadas no se leyeron del mapa de Iso-K de la publicación del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (1993). Los valores de K asignados se corresponden con los obtenidos en el estudio realizado por de Salas y Fernández Yuste (2006). Algunos de los valores son muy similares pero otros difieren mucho de los recogidos en la publicación reseñada. Se hizo una comprobación para ver las posibles diferencias que en el cálculo de la R habría supuesto el considerar los valores originales del factor regional K, en las dos estaciones donde las diferencias entre los dos valores de K son mayores, en Grazalema y en Porma.

Así por ejemplo, el valor de R que se obtuvo en Grazalema considerando el antiguo valor de K ($K=8$) fue superior a $1000 \text{ (hJ/m}^2\text{)} \cdot \text{(cm/h)}$ muy superior al obtenido considerando el nuevo valor de K ($K=4$), que fue de $495 \text{ (hJ/m}^2\text{)} \cdot \text{(cm/h)}$. Lo mismo ocurrió en la estación del pantano de Porma cuyo valor de R considerando el K recogido en la publicación citada ($K=9$) fue superior a $300 \text{ (hJ/m}^2\text{)} \cdot \text{(cm/h)}$, mientras que el valor de R obtenido con el nuevo valor de K ($K=5.5$) fue de $168 \text{ (hJ/m}^2\text{)} \cdot \text{(cm/h)}$. Otros valores de K en otras estaciones también fueron modificados con respecto a los originales pero sus diferencias no son tan llamativas como en estas dos estaciones.

3. Como se observa en la tabla de comparación entre R_T y R_{W-S} las diferencias obtenidas entre los valores de R son muy pequeñas, aunque los procedimientos seguidos para su cálculo han sido muy distintos, tanto en el cálculo de la energía cinética como en el valor de la intensidad máxima en 30 minutos. Este hecho da cierta tranquilidad ya que la USLE y su correspondiente factor R ha sido y es el modelo que se viene utilizando en el territorio español en el cálculo de la erosión.

5. En cuanto a las curvas de distribución mensual del factor R en las estaciones seleccionadas (Roldán, 2006) difieren muy poco de las distribuciones mensuales recogidas en la publicación del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1988) y que representan la distribución mensual de un área más amplia que incluiría las estaciones elegidas. Las pequeñas diferencias existentes entre las curvas de distribución mensual de R podrían deberse quizás a las diferencias existentes en el método de cálculo de los valores de R mensuales o a la representatividad de las curvas de áreas más amplias.

Se concluye que la metodología presentada en este trabajo para estimación de “R” simplifica mucho los cálculos y podría aplicarse en cualquier lugar con la información suministrada por estaciones pluviométricas normales,

6. Bibliografía

JOSS, J.; WALDVOGEL, A. ;1967. “Ein spektrograph für niederschlag atropfen mit automatischer auswertung.” *Pure and Applied Geophysic.* 68: 240-246.

JAYAWARDENA, A.W.; REZAUR, R.B.; 2000a. “Measuring drop size distribution and kinetic energy of rainfall using a force transducer.” *Hydrological Processes.* vol. 14: 37-49

JAYAWARDENA, A.W., REZAUR, R.B. ;2000b. “Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong”. *Hydrological Processes.* VOL.14: 1069-1082.

LAL, R.; 1998. “Drop size distribution and energy load of rain storms at Ibadan, western Nigeria”. *Journal of Hydrology* vol.48: 103-114.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE. DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS; 1993. Drenaje Superficial. Instrucción 5.2-ic.

MORGAN, R.P.C.; 1997. Erosión y Conservación del suelo. Ediciones Mundi-Prensa.

OLCINA, J.; 1994; Riesgos climáticos en la Península Ibérica. Libros Penthálón.

ROLDÁN, M.; 2005. “Características de la precipitación y erosividad”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

ROLDÁN, M; 2006. El poder de la lluvia. Características de la precipitación y erosividad. Nueva formulación para la estimación de la erosividad. Aplicación al cálculo del factor “R”. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General para la Biodiversidad.

De SALAS, L.; FERNÁNDEZ YUSTE, J.A.; 2006. Nueva metodología para el análisis de la variable intensidad máxima anual de precipitación. *Ecología.* 435-444

SEMPERE TORRES, D.; 1994. “La lluvia como agente erosivo: formación, distribución, erosividad e intercepción”. *Ingeniería Hidráulica en México.* vol.IX, nº2: 5-18.

UPLINGER C.W.; 1981. “A new formula for raindrop terminal velocity”. 20th Conference of Radar Meteorology. *American Meteorology Society,* Boston (USA), 389-391.