

## XV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

### ESTIMACION DEL FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN COLOMBIA

Juan David Pérez Arango y Oscar José Mesa Sánchez  
Universidad Nacional De Colombia, Medellín, Colombia  
[jdpereza@yahoo.com](mailto:jdpereza@yahoo.com) – [ojmesa@perseus.unalmed.edu.co](mailto:ojmesa@perseus.unalmed.edu.co)

#### RESUMEN

Se presenta una estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia, mediante un mapa de erosividad promedio a una resolución de 5 minutos de arco, que en el trópico equivalen a una distancia de 9.3 Km entre pixeles. El cálculo del factor de erosividad de la lluvia esta basado en datos pluviográficos . Como este tipo de información es escaso en el país se utilizó una metodología denominada cascadas aleatorias, que tiene origen en la teoría de turbulencia y esta basada en la estructura fractal de la lluvia, para desagregar datos diarios de precipitación en datos con una frecuencia de 22.5 minutos, y de esta manera estimar en cada una de las estaciones el valor de erosividad. Esta metodología se validó con 6 estaciones pluviográficas en la región central y occidental de Antioquia, y se aplico a 134 estaciones pluviométricas algunas con registros horarios y otras con registros diarios. Se encontró una relación directa de tipo exponencial entre el factor de erosividad promedio en cada una de éstas estaciones y la precipitación promedio anual correspondiente que permite a partir de un mapa de precipitación a una resolución de 5 minutos de Arco obtener un mapa del factor de erosividad de la lluvia a la misma resolución.

#### ABSTRACT

A rough estimate for the rain erosivity factor is presented in this paper as a map with a 5 arcmin resolution, what means a 9.3 Km distance between pixels in the tropic. The computation of this factor is based on pluviographic data. This kind of information is too few in Colombia, so that, a random cascade method was used in order to convert daily data in data with a 22.5 minutes frequency and then use them to compute the erosivity factor. The validation of this method was made with 6 pluviographic raingauge stations in Antioquia, and it was applied to 134 pluviometric raingauge stations throughout the country. An exponential ratio between anual average rain erosivity factor and anual average precipitation has been found, allowing to obtain a 5 arcmin erosivity map having a 5 arcmin anual average precipitation map.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como objetivo estimar el factor de erosividad de la lluvia en Colombia, a partir de datos de precipitación. En este sentido, la red de medición en Colombia es deficiente, y mucho más cuando se requieren datos de precipitación continuos que son necesarios para el cálculo del factor ya mencionado. Con tal panorama, se adoptaron hipótesis referentes a las propiedades fractales de los campos de lluvia en la escala temporal, en las cuales se propone el uso de cascadas aleatorias para obtener datos a cierta escala partiendo de una escala superior, en este caso, se tienen datos diarios y se escalan para obtener datos con una frecuencia aproximada a los 30 minutos. El uso de la teoría de las cascadas aleatorias esta basado en los trabajos de Over y Gupta (1994) [2] y Gupta y Waymire (1993) [1]; y su aplicación sobre la información que se tiene es un procedimiento empírico basado en dicha teoría. El desarrollo de este procedimiento está fundado en la comparación de los resultados obtenidos para 6 estaciones pluviográficas en el departamento de Antioquia usando los datos cada 22.5 minutos obtenidos directamente del pluviograma y los obtenidos a partir del uso del método de las cascadas aleatorias. El mapa de erosividad media anual de Colombia se obtuvo a partir de un mapa de precipitación media anual, mediante una relación entre estas variables.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA EROSIVIDAD DE LA LLUVIA Y DE LA TEORÍA DE CASCADAS ALEATORIAS

### 2.1. Generalidades sobre la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

Una de las ecuaciones mas utilizadas para la predicción de pérdida de suelos es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. Su desarrollo estuvo liderado por Walter Wischmeier y Dwight Smith [10], quienes, antes de definir la expresión actual, investigaron acerca de la energía de la lluvia y su relación con la pérdida de suelo [9]. Esta energía es cinética y es aportada por las gotas de lluvia. La Ecuación Universal de Pérdida de suelo tiene la siguiente forma:

$$E=RKLSCP \quad (2.1)$$

en la cual,

E es la pérdida anual de suelo por unidad de área. [ $T m^{-2}$ ]; R es el factor de erosividad de la lluvia. [ $MJ mm (m^2 h)^{-1}$ ]; K es el factor de erodabilidad del suelo. [ $Tm^2h (m^2 MJ h)^{-1}$ ]; LS es el factor topográfico [adimensional]; C es el factor de cobertura por manejo del suelo [adimensional]; P es un factor para la práctica de conservación [adimensional].

### 2.2. Factor de Erosividad de la Lluvia, R

El término factor de erosividad de la lluvia implica una evaluación numérica de un evento de lluvia que describe su capacidad de erosionar suelo en un campo desprotegido. Las diferencias en la erosión potencial de la lluvia no están asociadas necesariamente a la cantidad de lluvia, las intensidades presentes en los eventos, los antecedentes climáticos y las condiciones de la superficie. La interacción de los efectos y otras variables, influyen de manera más relevante dentro del proceso de erosión. Wischmeier [11] y Smith [9], observaron que entre los factores de precipitación pluvial que se estudiaron, la energía cinética en combinación con la máxima intensidad de los 30 minutos explicaba la mayor parte de la pérdida de suelo en las parcelas de campo. Ellos obtuvieron una ecuación de regresión

que describe la energía cinética de una lluvia tempestuosa y que está expresada de la siguiente manera:

$$E=1.213+0.890\log_{10}I \quad (2.2)$$

donde:

E = Energía Cinética de la lluvia [Kg m/m<sup>2</sup> mm]<sup>1</sup>

I = Intensidad de la Precipitación Pluvial [mm/hora]

La energía cinética para un incremento de intensidad se obtiene multiplicando la energía cinética de la ecuación (2.2) por la cantidad de precipitación pluvial para ese incremento de intensidad. La energía total en kg m/m<sup>2</sup>, para una precipitación pluvial determinada puede calcularse acumulando la energía cinética para cada incremento distinto en intensidad del evento.

El factor de precipitación pluvial, R, se define como el producto EI dividido por 173,6. El cálculo del factor de erosividad de la precipitación pluvial, R, para una tormenta, se define de la siguiente manera:

$$R = \frac{\left[ \sum_{j=1}^n (1.213 + 0.890 \log_{10} I_j)(I_j T_j) \right] I_{30}}{173.6} \quad (2.3)$$

Donde:

R = factor de erosividad por precipitación pluvial [(Kgf . m . m<sup>-2</sup>)(mm h<sup>-1</sup>) ]<sup>2</sup>; I<sub>j</sub> = intensidad de la precipitación pluvial para un incremento específico de la intensidad [mm/h]; T<sub>j</sub> = periodo de incremento de tempestad específica [ h ]; I<sub>30</sub> = la intensidad máxima de precipitación pluvial durante 30 minutos para la tormenta [mm/h]; j = incremento de la tempestad específica; n = el número de incrementos de la tempestad.

Los factores de erosividad por precipitación pluvial pueden sumarse para cualquier periodo buscando proporcionar una medida numérica de la erosividad por precipitación pluvial durante ese periodo. El cálculo de la energía de una tormenta como componente del valor EI requiere de una definición exacta de lo que es un evento individual. El tiempo mínimo óptimo que define el quiebre entre dos tormentas es una función del cambio en las tasas de infiltración después de que deja de llover, y obviamente varia con los tipos de suelo. En general las mejores correlaciones de las cantidades de pérdida de suelo y los valores de EI se obtuvieron cuando lluvias separadas por menos de 6 horas se trataron como una sola lluvia [11].

### 2.3. Teoría de las cascadas aleatorias

Esta teoría ha sido elaborada en orden a desagregar la lluvia espacialmente pero puede usarse también para desagregarla temporalmente [5]. Las cascadas aleatorias son una

<sup>1</sup> Es necesario aclarar que estas unidades no son del SI, y por facilidad se han usado. Los resultados se mostraran en SI como se presenta la EUPS en la Ecuación 2.1

<sup>2</sup> Estas unidades serán cambiadas a unidades del SI para los resultados.

buena herramienta de análisis en cuanto a la variabilidad espacial de la lluvia y la intermitencia de flujos sobre un amplio rango de escalas espaciales.

La construcción matemática se inicia con una densidad de masa que es denominada  $W_0$ , distribuida uniformemente sobre una región de interés, por ejemplo, el cubo  $d$ -dimensional  $J = [0,1]^d$ . Supongamos que  $J$  es un cuadrado unitario, por lo tanto  $d = 2$ ; se divide entonces el cuadrado  $J$  en  $b = N^2$  subcuadrados de lado  $1/N$ , denominado el número de bifurcación. En general,  $b = N^2$ . Sea  $J(\sigma)$ , donde  $\sigma = 1, 2, \dots, b$ , la variable que denota esta partición de  $J$  en esos subcuadrados. Ahora, se distribuye la densidad de masa  $W_0$  en cada uno de esos subcuadrados como  $W_0W_1(1), W_0W_1(2), \dots, W_0W_1(b)$ , respectivamente, donde los  $W$ 's son variables aleatorias mutuamente independientes idénticamente distribuidas. Además se supone que  $E[W] = 1$ , lo que significa que en promedio la densidad de masa distribuida se conserva durante el proceso. El próximo paso es que cada uno de los subcuadrados  $J(s)$  se divide en  $b$  subcuadrados de lado  $1/N^2$ , o sea un  $J(\sigma_1, \sigma_2)$ ,  $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 1, 2, \dots, b$ . Esto es equivalente a dividir  $J$  en  $N^4$  subcuadrados cada uno de lado  $1/N^2$ . Para cada  $\sigma = 1, 2, \dots, b$ , la densidad de masa  $W_0W_1(\sigma)$  sobre  $J(\sigma)$  se redistribuye como  $W_0W_1(\sigma_1)W_2(\sigma_2)$  con  $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 1, 2, \dots, b$ , y donde los  $W_2$ 's son independientes de los  $W_1$ 's y  $W_0$  y son i.i.d como  $W$  con media igual a uno (1). Esta construcción se muestra esquemáticamente en la Fig 1. La construcción de la cascada continúa iterativamente, de modo que en la  $n$ -ésima iteración, el cuadrado unitario  $J$  es dividido en  $N^{2n} = b^n$  subcuadrados de lado  $1/N^n$ . Cada uno de estos cuadrados se denota por  $J_n = J(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ , donde cada  $\sigma_i$  toma valores desde 1 hasta  $b = N^2$ .

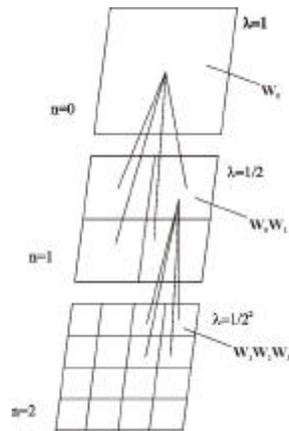


Fig 1 Esquema de la geometría de una cascada aleatoria

La densidad de masa aleatoria en  $J(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$  se denota por el producto  $W(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) = W_0W_1(\sigma_1)W_2(\sigma_2) \dots W_n(\sigma_n)$ . Nótese que la escala espacial en la  $n$ -ésima generación está dada por  $\lambda = 1/N^n$  o  $n = -\log_N \lambda$ . Ahora la masa total  $\mu_n(J_n)$  en el subcuadrado  $J_n$  está dada por :

$$\mu_n(J_n) = \int_{J_n} f_n(X) dX \quad (2.4)$$

Donde la densidad de masa  $\psi_n(\mathbf{x})$  está dada por:

$$\begin{aligned} \psi_n(X) &= \prod_{j \in J_n} W_j, \quad W_j \\ X &\in J_n, \quad E[W_j] = 1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

La distribución de la masa  $\mu_n$  converge a un límite  $\mu_c$ , el cual podría o no ser degenerado. Para una mayor comprensión de la teoría matemática acerca de las cascadas aleatorias ver [1].

En el trabajo de Over y Gupta, [2], los patrones espaciales de la lluvia están descritos por un parámetro  $p$ . Este determina la distribución espacial de las regiones lluviosas y no lluviosas a diferentes escalas espaciales. Un valor pequeño de  $p$  indica una tasa pequeña de crecimiento del promedio de las áreas no lluviosas. Un valor mayor de  $p$  indica una tasa mayor de crecimiento de los cerros. Una característica importante de la teoría de las cascadas es que puede modelar regiones de lluvia igual a cero. Esto se logra permitiendo al generador  $W$  que sea cero con probabilidad  $p$ ; esto significa que:

$$W = \begin{cases} 0, & \text{con probabilidad } p \\ W^+ & \text{con probabilidad } 1 - p \end{cases} \quad (2.6)$$

donde  $W^+$  es la parte positiva de  $W$ . Así se puede estimar el factor  $p$ . Para hacerlo se pueden usar algunas ecuaciones matemáticas que se presentan en la teoría de las cascadas aleatorias, pero como se estimará a partir de los datos, puede calcularse un  $\hat{p}$  que puede obtenerse como:

$$\hat{p} = 1 - b^{-s/d} \quad (2.7)$$

donde  $\hat{p}$  es el estimado de  $p$  que se obtiene por regresión lineal de  $\log f(I_n)$  versus  $-\log(I_n)$ .

Existen otros modelos para calcular el generador  $W$  a partir del valor de  $p$ . Estos pueden ser estudiados en [1] y [2].

### 3. INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

#### 3.1. Información Utilizada

La información utilizada para el desarrollo de una metodología que permitió la utilización de información diaria en el cálculo del factor de erosividad de la lluvia es la correspondiente a seis estaciones ubicadas en el departamento de Antioquia, de propiedad de EPM y que llamaremos estaciones base. Ver Tabla 1

El resto de información puede dividirse en dos grupos, el primero de ellos está conformado por las estaciones de CENICAFE, cuya frecuencia de registro es de 1 hora, el segundo lo conforman las estaciones del IDEAM<sup>3</sup>, cuya frecuencia de registro es diaria. En total son 140

<sup>3</sup> EPM: Empresas Públicas de Medellín; CENICAFE: Centro Nacional de Investigaciones del Café; IDEAM : Instituto de Estudios Medio Ambientales. Las tres son instituciones colombianas que tienen diferentes bases de datos.

estaciones de las cuales 32 tienen periodo de registro comprendido entre 1972 y 1999. Este será definido como periodo base para este trabajo.

**Tabla 1** Información de las estaciones utilizadas para el desarrollo de la metodología

Estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Longitud de Registro
Bizcocho	06°18'	75° 05'	1070	1972-1998
Inmarco	06°17'	72° 48'	260	1969-1991
Mandé	06° 27'	75° 08'	495	1979-1998
Peñol	06° 24'	75° 51'	1880	1961-1998
Sta Bárbara	06° 24'	75° 43'	2595	1979-1999
Sireno	06° 23'	75° 40'	1210	1979-1998

### 3.2. Evaluación de la metodología de cascadas aleatorias para el cálculo del factor de Erosividad de la lluvia

El proceso de evaluación y aplicación de la metodología de las cascadas aleatorias se compone de dos partes. La primera de ellas es la definición del parámetro  $p$ , necesario. La segunda es la evaluación en sí, que consta del proceso de desagregación de la lluvia diaria para las estaciones base (EPM), y la posterior comparación de los valores de erosividad obtenidos directamente de los datos y los valores obtenidos a partir de la desagregación para proceder a la aplicación de esta metodología en el resto de las estaciones.

Antes de proceder a la definición del parámetro  $p$ , se calculó el factor de erosividad para las estaciones base, y se definió el método de cálculo de dicho factor de acuerdo con la EUPS. De acuerdo con la teoría de cascadas aleatorias, no es posible que a partir de un dato diario se obtengan valores cada 30 minutos, siendo posible acercarnos a este valor tomando datos cada 22.5 minutos [6]. Todo el procedimiento se plantea desde la experiencia con las seis estaciones de Empresas Públicas de Medellín. La forma de calcular el factor de erosividad con estos datos se presenta a continuación:

- Se toma el mes de registro y se separa cada uno de los eventos de lluvia. La duración mínima de un evento será de 22.5 minutos.
- Se define un evento individual de acuerdo a la teoría de Wischmeier [11], ya mencionado, y adicionando la recomendación de Wischmeier y Smith [10]; que propone seleccionar eventos cuya lámina sea superior a 12.7 mm de lluvia. Con estos eventos se calcula el factor de erosividad del mes, que es la suma de cada factor asociado a un evento.
- Para cada uno de los eventos se calcula un conjunto de intensidades, que tendrá tantos como fracciones de 22.5 minutos conforman el evento. Se calcula la energía que aporta cada fracción del evento de 22.5 minutos, de acuerdo a la ecuación 2.2. Luego en cada evento se selecciona la intensidad máxima del conjunto previamente establecido, y se denomina como  $I_{30}$ . Haciendo uso de la ecuación 2.3 se calcula el valor de la erosividad para ese evento. El valor de erosividad del mes es la suma de cada valor individual, y el del año es la suma de los valores mensuales.

Para la aplicación de las cascadas aleatorias se han definido los parámetros de la siguiente manera. La fracción del tiempo a desagregar es de 24 horas, equivalente a 1440 minutos. La dimensión  $d = 1$ , el número de partición es  $b = 2$ , y  $N = 6$ . Teniendo esto se procedió a

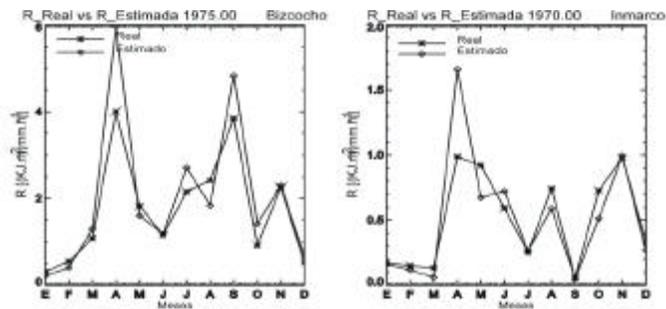
calcular el valor de  $p$  para cada uno de los días de acuerdo con la ecuación 2.7, tratando de observar cual era el comportamiento de este en el tiempo. Realmente no se pudo observar una relación clara entre la precipitación del día y el valor de  $p$  para ese día. Esto era de esperarse pues de acuerdo con la teoría,  $p$  es un parámetro que da cuenta de la tasa de crecimiento de las fracciones no lluviosas con la escala temporal, mas no de la cantidad de lluvia que cayó en esa misma fracción. Se observó que los valores de  $p$  oscilan entre 0 y 1, pero existe una banda entre 0 y 0.5, no existiendo valores intermedios entre dicha banda y el valor extremo. Un valor de 1 para  $p$  indica que el día esta totalmente seco, por lo que la presencia de fracciones secas es total y equivale al 100%. Un valor de cero para  $p$  está asociado a la presencia de lluvia durante todo el día, esto no es usual dentro del comportamiento de la lluvia en Colombia donde las dinámicas que la gobiernan distan mucho de generar eventos de lluvia continuos en un solo día. Son de interés los valores que se encuentren entre 0 y 0.5 para desagregar el resto de los días en las estaciones de precipitación diarias.. Por lo tanto se decidió tomar aleatoriamente dentro del grupo de datos para cada año, 5 de ellos y con éstos hacer 10 modelaciones mediante la teoría de las cascadas aleatorias para cada uno de los datos diarios, buscando evaluar la variación de la erosividad calculada con cada uno de los  $p$  y compararla con la erosividad calculada directamente de los registros.

Para evaluar la conveniencia del uso de la teoría de las cascadas aleatorias en la desagregación de los datos diarios de lluvia, se modeló para cada año de registro de las estaciones de Empresas Públicas, y se observó como era el comportamiento de la erosividad según el valor de  $p$ . Se define la función de distribución de probabilidad cuya expresión general esta dada por la Ecuación 2.6. En este caso se eligió una función de distribución que cumple con lo propuesto por el trabajo de Over y Gupta [2]; es decir que el valor esperado del generador  $E[W]$  sea igual a 1. La función de distribución que se definió para este trabajo es la siguiente:

$$W = \begin{cases} 0 & x < p \\ (1-p)^{-1} + y - 1/2 & x \geq p \end{cases} \quad (2.8)$$

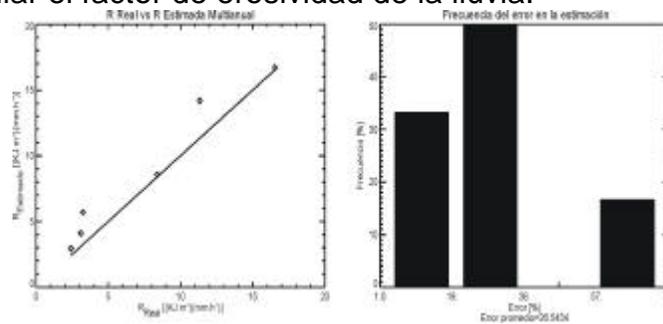
Con esta función de distribución que depende del valor de  $p$ , se hicieron las realizaciones ya mencionadas y se obtuvieron resultados con miras a observar las diferencias de la erosividad dentro de cada año, de acuerdo al valor de  $p$  con el que se está modelando y definir si existe o no una diferencia apreciable para cada modelación. Con los resultados observados se determinó que no era posible definir un valor de  $p$  para cada una de las estaciones, ni por año, ni por día. Sin embargo, al tomar el valor promedio para cada mes, de todos los valores modelados, y compararlo con el valor promedio real, se observó un acompasamiento de estos. Un ejemplo de esta observación puede verse en la Fig 2.

Se cuantificó el error a esta escala, y a escala anual, y finalmente se cuantificó el error entre el valor promedio de la erosividad estimada en cada estación con el valor real. Los resultados obtenidos fueron buenos y pueden observarse en [6]. La Fig 3 muestra la comparación de los valores en cinco de las seis estaciones, ya que la estación Peñol mostró tendencias en la media y en la varianza, ocasionando su exclusión de este cálculo.



**Fig 2** Ejemplo de la comparación del valor de erosividad promedio estimado vs. real para un año en dos de las estaciones de EPM

Como se puede observar, el error es cercano al 17% pero se presenta como un error aceptable y se admite el uso de las cascadas aleatorias para la desagregación temporal de la lluvia en orden a calcular el factor de erosividad de la lluvia.



**Fig 3** Comparación de la erosividad promedio multianual estimada con la erosividad promedio multianual real para las estaciones de EPM excepto El Peñol

### 3.3. Aspectos preliminares al desarrollo de un mapa de erosividad de la lluvia en Colombia

Este trabajo estuvo orientado al desarrollo de un mapa de erosividad a partir de la relación de esta variable con otra u otras variables climatológicas. Mikhailova et. Al., (1997), han realizado un trabajo semejante al presentado en este artículo para Honduras basados en información de 8 estaciones climáticas. Ellos encontraron que existía una relación lineal entre los promedios de la precipitación y la erosividad y entre la elevación y la erosividad. Con esta relación y la ecuación que la describe desarrollaron un mapa de erosividad, basados en un mapa de precipitación y un modelo de elevación digital del terreno. Es así como este trabajo se orientó en esta dirección sabiendo que otras experiencias han conducido a buenos resultados (Mikhailova et al., 1997). En este caso sólo se ha considerado la posible relación entre la precipitación media anual y el factor de erosividad promedio, sabiendo que se cuenta con un mapa de precipitación a una escala de 5 minutos de arco. Este mapa es el obtenido en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (Mesa O.J et al., 1999). El mapa tiene una distancia entre pixeles de 5 minutos de arco, que en el Ecuador es de aproximadamente 9.3 Km.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Valores de Erosividad Puntuales

Para el cálculo del factor en el resto de las estaciones, se creó un conjunto de valores de  $p$ , formado por los valores de este parámetro asociados a las estaciones ya estudiadas. Se realizó el mismo procedimiento tomando 5 valores aleatorios para cada año, haciendo 10 repeticiones por cada valor y tomando el valor promedio para cada año, y el promedio de todo el periodo de registro. Así se obtuvo el valor mes a mes, el valor anual y el promedio multianual en cada una de las estaciones de CENICAFE y EPM. Los valores correspondientes a EPM se presentan en la Tabla 2

Estos valores de la erosividad para estas estaciones no pueden ser comparados con valores anteriores en las mismas ya que de acuerdo con lo que pudimos conocer, no hay de ellas ningún antecedente. Sin embargo se pueden comparar con otros valores en otros lugares del país en cuanto a órdenes de magnitud. Machado y Machado, y Machado, mencionados por Rivera [7] trabajaron sobre el factor de erosividad en Colombia, con base en datos pluviográficos del observatorio meteorológico de Bogotá y de la estación climática de Cotové (Santafé de Antioquia), encontrando para Bogotá un factor de erosividad  $R$  de  $1.40 \pm 1.02$  [(KJ/m<sup>2</sup>)(mm/hr) /año] para un promedio de 21 años; para Santafé de Antioquia 3.128 y 4.17 [(KJ/m<sup>2</sup>)(mm/hr) /año] entre los años 1975-1976 y 1976-1977, respectivamente.

**Tabla 2** Erosividad promedio anual para las estaciones de EPM

Estación	R Anual [(KJ/m <sup>2</sup> ) (mm/h)]	P Media [mm/año]
Bizcocho	16.54	4327.61
Inmarco	8.38	2144.03
Mande	11.34	3368.14
Peñol	3.24	2294.96
Sireno	3.09	1670.72
Sta. Bárbara	2.42	1815.64

Los valores obtenidos directamente de los registros en las 6 estaciones básicas de este estudio están conformes en órdenes de magnitud con los datos que han sido reportados por otros autores, reconociendo que tanto unos como otros estamos tratando de cuantificar algo de manera aproximada. Se observa un valor de erosividad mayor, justo donde la precipitación media es también mayor, en comparación con las demás estaciones.

En las estaciones de CENICAFE se utilizó el método propuesto. Rivera [8], había trabajado datos más discretos de 9 de las 46 estaciones que se utilizaron en este trabajo. Su forma de calcular el factor o índice de erosividad de la lluvia, fue tomando como información básica las intensidades de lluvia evaluadas a intervalos de cinco minutos. Se tuvo en cuenta la información para el periodo de 1970 a 1984 (15 años), para 7 de las 9 estaciones climáticas estudiadas [8]. Es necesario anotar que él usó la metodología propuesta por Hudson, y no por Wischmeier y Smith. Los valores obtenidos en este trabajo tienen correspondencia con los valores encontrados por Rivera en 1990. En promedio, las estaciones de CENICAFE distribuidas en la región andina del país presentan un valor de 5.19 [(KJ/m<sup>2</sup>) (mm/h)], con una desviación estándar de 2.8 [(KJ/m<sup>2</sup>) (mm/h)], que equivale a 0.54 veces la media. La única estación cercana a la costa norte Colombiana, Pueblo Bello, tiene un valor anual promedio de 6.37 [(KJ/m<sup>2</sup>) (mm/h)], asociado a un valor relativamente alto de precipitación que puede

estar definido en gran parte por la cercanía a la Sierra Nevada de Santa Marta donde la dinámica de los vientos frente a una barrera orográfica como la Sierra produce un patrón de precipitación alta en la parte Norte y Occidental de la misma. Las demás estaciones proceden directamente del IDEAM, en total 89. Estas tienen registros diarios, y por lo tanto se ha aplicado la metodología de la misma manera que se aplicó con las estaciones de Empresas Públicas y CENICAFE.

#### 4.2. Mapa de Erosividad Media Anual para Colombia

La exploración se orientó de la misma manera en que la orientaran Mikhailova et al.[4], pero sin incluir la altura de la estación con respecto al nivel del mar. Se tomó el promedio de todas las estaciones de precipitación, 139 (ya que una de ellas fue descartada), y con su respectivo valor de precipitación y su respectivo valor de erosividad se obtuvo la regresión lineal de la Fig 4A. Esta regresión es realmente buena si observamos que el coeficiente de correlación lineal  $r$  es igual a 0.91. La gráfica muestra una forma algo cóncava hacia arriba, como si la tendencia no fuera lineal sino cuadrática de manera que se observó otra posible relación. La Fig 4B muestra tal relación asumiendo que la ecuación que la describiría es de la forma  $Y=AX^B$ . En este caso, el coeficiente de correlación es un poco menor, pero el ajuste de la línea a los puntos es mejor, al menos visualmente. La ecuación de tipo lineal que describe la erosividad en función de la precipitación media anual está dada por:

$$R = -8.831 + 0.0071263PMA \quad (4.2)$$

Donde:

$R$  = factor de erosividad de la lluvia promedio anual [(KJ/m<sup>2</sup>) (mm/h)]

$PMA$  = Precipitación media anual [mm/hora]

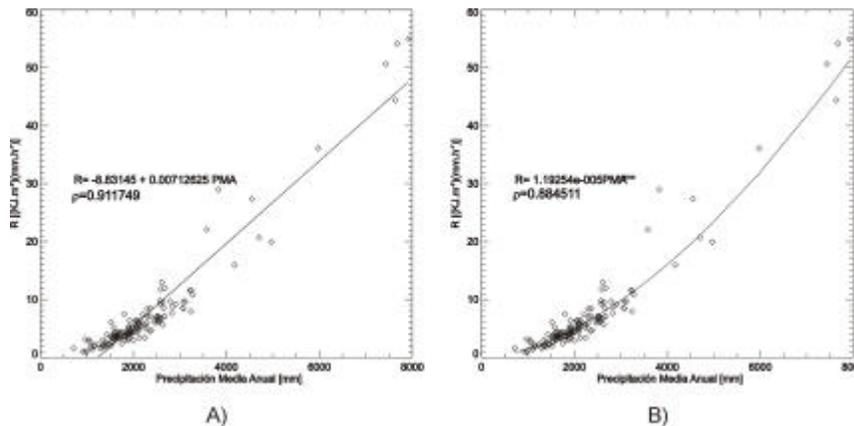


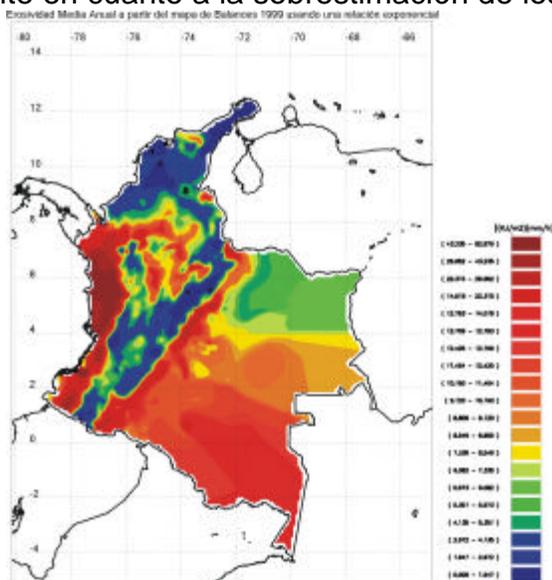
Fig 4 Precipitación Media Anual vs. Erosividad media calculada

Mientras que la ecuación de tipo exponencial que describe esta misma relación está dada por:

$$R = 0.00001193 PMA^{1.70148} \quad (4.3)$$

La ecuación lineal solo es válida cuando la precipitación media anual sea superior a 1240 mm/año; de allí a valores inferiores, esta ecuación no es válida ni representativa; mientras que la ecuación de tipo exponencial, representa adecuadamente los valores pequeños de  $R$

asociados a valores pequeños de la precipitación. Es por esto que se recomienda el mapa obtenido a partir de dicha relación. El mapa desarrollado a partir de la Ecuación 4.3, (Fig 5) muestra que para los valores pequeños de la precipitación, el valor de la erosividad no es cero, pues este valor es la asíntota de la ecuación ya mostrada. Se observan algunos valores mayores de erosividad en zonas de alta pluviosidad como Chocó o el Amazonas, lo que implica tener cuidado con el uso de esta ecuación para la estimación de R, si se considera que en el proceso de evaluación de la metodología de desagregación se encontró una característica importante en cuanto a la sobrestimación de los valores.



**Fig 5** Mapa de Erosividad Media Anual a partir de una relación exponencial de R vs. PMA

En términos generales este mapa es una buena aproximación al factor de erosividad de la lluvia en Colombia, y puede ser de muchísima utilidad en el campo de la Ingeniería y en el medio agrícola.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología aquí planteada para el cálculo de la erosividad de la lluvia en una estación a partir de registro diarios ofrece resultados que se encuentran dentro de los rangos de ordenes de magnitud de valores de erosividad previamente conocidos. En términos generales, los resultados puntuales de erosividad en Colombia están conformes con resultados publicados anteriormente y expuestos en este trabajo. Se observa una marcada relación entre el valor medio de la erosividad y la precipitación media anual. Esta relación no era tan marcada a escalas de tiempo inferiores debido posiblemente al hecho de que la erosividad de un evento está mayormente influenciada por la intensidad de éste y no por la cantidad. Sin embargo, en la escala anual esta relación es clara, y presenta dos posibles formas de darse. Sin embargo el mapa asociado a la ecuación exponencial es una buena aproximación al valor medio de la Erosividad en Colombia.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gupta, V. K and Waymire, E. C, A Statistical Analysis of Mesoscale Rainfall as a Random Cascade, Journal of Applied Meteorology., Vol 32, No 2, February, 1993.
- [2] Gupta, V. K., and Over T. M, Statistical Analysis of Mesoscale Rainfall: Dependence of a Random Cascade Generator on Large-Scale Forcing, Journal of Applied Meteorology., Vol 33, No 12, December, 1994.
- [3] Mesa, O. J et al. Balances Hidrológicos de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 1999.
- [4] Mikhailova, E. A. et al., Predicting Rainfall Erosivity in Honduras. Soil, Crop and Atmospheric Science, Vol 61, pag 273-279. 1997.
- [5] Olsson Jonas, Evaluation of a Scaling Cascade Model for Temporal Rainfall Disaggregation, Hydrology and Earth System Sciences , Vol 2, No 1, pag. 19-30, 1998.
- [6] Pérez, J.D., Estimación del factor de Erosividad de la Lluvia en Colombia, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2001
- [7] Rivera, J.H, Determinación de los Indices de Erosividad, Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindio y Risaralda). Trabajo Dirigido de Grado, Magister en Suelos y Aguas, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, 1990.
- [8] Rivera, J.H, Susceptibilidad y Predicción de la Erosión en los Suelos de la Ladera de la Zona Cafetera Central Colombiana. Trabajo Dirigido de Grado, Doctor en Ingeniería área de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Posgrado de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999.
- [9] Wischmeier, W.H and Smith, D. D, Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss, Transactions, American Geophysical Union, Vol 39, No 2, 1958.
- [10] Wischmeier, W.H and Smith, D. D., Prediction Rainfall Erosion Losses, Water Resources Publications, Agriculture Handbook, National Engineering Publications from de United States Soil Conservation Service. U.S.A. 1978.
- [11] Wischmeier, W.H., A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation, Proc. Soil.Sci. Soc. Am. 23, 246-249