

Determinación y mapificación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse La Copa, Boyacá

Determination and mapping of rainfall erosivity in the la copa reservoir watershed in the department of Boyacá

Para citar este artículo / To reference this article
/ Para citar este artigo: Guio Martínez, V.H.,
Cely Reyes, G. y Moreno Pérez, D. F. (2015).
Determinación y mapificación de la erosividad
de la lluvia en la cuenca del embalse de La Copa,
Boyacá. *Ingenio Magno*, 6, pp. 34-46.

Víctor Hugo Guio-Martínez

Biólogo, Universidad Pedagógica
y Tecnológica de Colombia, Grupo
Institucional de Investigación en Suelos
Sulfatados Ácidos Tropicales
victor.guio@uptc.edu.co

Germán Cely-Reyes

Magíster en Ciencias Agrarias,
Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia, Grupo Institucional de
Investigación en Suelos Sulfatados
Ácidos Tropicales
german.cely@uptc.edu.co

Diego Fernando Moreno-Pérez

Ingeniero agrónomo, Universidad
Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Grupo Institucional de Investigación en
Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales
diego.morenoperez@uptc.edu.co

Recepción: 13 de abril de 2015
Aceptación: 23 de Septiembre de 2015

Resumen

La cuenca del embalse La Copa se encuentra ubicada en la provincia centro del departamento de Boyacá. Actúa como área de almacenamiento y recarga de agua, que luego es suministrada principalmente para riego a los municipios del alto Chicamocha. Una de las principales causas de pérdida de suelos en cuencas hidrográficas es la erosión hídrica debida a la lluvia o erosividad. El presente artículo busca determinar el grado de erosividad en la cuenca del embalse La Copa, para lo cual se evaluó y mapeó la agresividad climática mediante el índice IFM, la erosividad de la lluvia mediante el factor R y la concentración de las precipitaciones mediante el índice ICP. Los resultados revelaron que en los municipios de Toca, Siachoque, Tuta y Soracá la agresividad de la lluvia es moderada, mientras que en el resto de la cuenca la agresividad es baja. El factor R indicó que la totalidad de la cuenca presenta un bajo riesgo de erosividad; de igual manera, el ICP mostró que las lluvias en la cuenca se distribuyen durante varios meses del año, lo cual las hace menos concentradas y se genera un menor riesgo de erosión causado por lluvia. Se concluye que si bien el riesgo de erosividad es bajo, es necesario estudiar los demás factores de la ecuación universal de pérdida de suelos para tener una visión más exacta de este fenómeno en la cuenca.

Palabras clave: cuenca, erosividad, factor R , índice ICP, índice IFM, precipitación.

Abstract

The watershed of La Copa Reservoir is located in the central province of Boyacá's department. It acts as a storage area and water recharge, which is used for irrigation by the municipalities of the highlands of Chicamocha. One of the main reasons of soil loss in the hydrographic watersheds is water erosion due to rain or erosivity. The goal of this research was to determine the degree of erosivity in the watershed of La Copa Reservoir. The climatic aggressiveness was evaluated and mapped by the MFI index, the rainfall erosivity by the R factor, and the concentration of rainfall by the PCI index. The results showed that in the municipalities of Toca, Siachoque, Tuta and Soracá, the aggressiveness of rainfall is moderate, while in the rest of the watershed, the aggressiveness is low. The R factor indicated that the whole watershed has a low risk of erosivity. Likewise, the PCI showed that rainfall in the watershed is distributed over several months, which reduces the risk of watershed erosion. We conclude that even though the risk of erosivity is low, it is necessary to study other factors of soil loss to obtain a more exact view of the watershed.

Keywords: watershed, erosivity, R factor, PCI index, MFI index, Precipitation.

1. Introducción

Las cuencas hidrográficas actúan como áreas de captación, almacenamiento y descarga de agua, que luego es utilizada para propósitos tales como el consumo, el riego y la generación de electricidad. Las cuencas cumplen importantes funciones ambientales, como la preservación de hábitat y rutas para diversas especies animales y vegetales (Pineda *et al.*, 2006). Las pérdidas de suelo en las cuencas hidrográficas son causadas principalmente por la erosión hídrica generada

por las lluvias y el escurrimiento; y ello es acentuado por la actividad antrópica, que genera conflictos entre el uso que el hombre hace de sus recursos ambientales y las potencialidades que estos le ofrecen.

Además de generarse pérdida de suelo, que es un recurso no renovable, la erosión hídrica disminuye la productividad en las zonas de cultivo (Gracia, 1996). Una vez la superficie del suelo ha sido removida a causa de la lluvia, la vulnerabilidad a la erosión del subsuelo se

incrementa por la falta de materia orgánica, lo cual a su vez dificulta que se establezca nuevamente una cubierta vegetal protectora (Leal, 2007).

En el territorio colombiano, un 40% de los suelos presentan algún grado de erosión, desde muy ligera, hasta muy severa. La región Andina es la más afectada pues se presenta un 88% de erosión hídrica (Olmos y Montenegro, 1987, citado en Rivera, 1999).

La erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras: es responsable de la erosión de 440 millones de hectáreas de tierras de las 747 millones que sufren erosión en Asia; de 227 millones de hectáreas de las 497 millones que son afectadas por este fenómeno en África; de 123 millones de hectáreas de 243 millones en América del Sur; de 115 millones de 219 millones en Europa, y de 106 en América del Norte y América Central (Bifani, 1984, citado en Santacruz, 2011).

El primer paso en el proceso de erosión hídrica comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie con una energía suficiente como para desplazar partículas de material sin consolidar, lo cual da lugar al proceso denominado *erosión por salpicadura* o *erosividad de la lluvia* (Sudas, 2006, citado en Vega, 2008). La estimación de la erosión causada por la lluvia ha tenido un papel importante en las áreas de las ciencias ambientales, agrícolas y forestales, debido a los efectos que puede ocasionar en el suelo y como agente fundamental en el proceso de producción de material sedimentario en las cuencas (Besteiro y Delgado, 2011).

Wischmeier y Smith (1958) propusieron una ecuación para calcular la erosividad de la lluvia, denominada el factor R : el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad, en un tiempo de 30 minutos (EI_{30}) (Suárez, 2001). El EI_{30} es una medida de la manera como se relacionan la intensidad de una tormenta con su energía, e indica cómo el desprendimiento de las

partículas causado por la lluvia es combinado con la capacidad de transporte de estas (Tafur y Obando, 2010).

Los datos para calcular el factor R se obtienen de pluviogramas de registro diario; pero estos no se encuentran en la zona de estudio, donde solo se tienen datos de precipitaciones mensuales. Debido a esta dificultad para hallar el factor R , varios autores han propuesto métodos alternativos para definir la erosividad de la lluvia. Uno de estos es el índice de Fournier modificado (IFM) propuesto por Arnoldus (1977), que tiene correlación con el factor R . Así lo reportó Ramírez (2006), quien con este índice estimó la erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas (Tafur y Obando, 2010).

Por otro lado, Oliver (1980) propone el índice de concentración de las precipitaciones (ICP), el cual, a partir de datos mensuales y anuales, es capaz de estimar la agresividad de las lluvias mediante la variabilidad temporal de las precipitaciones.

La delimitación de una cuenca en la cual se estudien los diferentes comportamientos de la precipitación y su relación con la erosión del suelo sirve de base para la planificación del uso y manejo sostenible de las tierras (Cortez *et al.*, 2011). Este trabajo tiene como objetivo determinar y mapear, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), la erosión causada por las precipitaciones, por medio de los índices IFM, ICP y el factor R en la cuenca del embalse La Copa.

Esta cuenca es uno de los principales reguladores de la cuenca alta del río Chicamocha. A su vez, las subcuencas y microcuencas del embalse La Copa abastecen las necesidades de agua de los municipios que la cuenca abarca, ya sea para su principal actividad productiva: la agricultura, o para su consumo como agua potable. Para desarrollar este estudio, se contará con el registro de precipitaciones mensuales de nueve estaciones

pluviométricas a lo largo de la cuenca, por un periodo de veinte años, entre 1992 y 2011.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

Este estudio se realizó en la cuenca del embalse La Copa, que forma parte de los municipios de Siachoque, Toca, Tuta, Chivatá, Pesca, Rondón y Soracá. Más del 50% de esta cuenca pertenece al municipio de Toca, y sus aguas convergen en el embalse La Copa. Este proyecto fue construido en 1984 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (Himat) y fue inaugurado en 1989. Se ubica aguas abajo de la confluencia de los ríos Chorrera y Cormechoque.

La cuenca cubre un área aproximada de 32.600 Ha y 307 km², aproximadamente. Recibe las aguas de las cuencas hidrográficas de los ríos Siachoque, Cormechoque, Toca, Tuta, Chorrera y de las quebradas de Tuaneca, Tocavita, La Raiba y Leonera. El embalse La Copa suministra agua para riego a los municipios del Alto Chicamocha (Paipa, Duitama, Sogamoso, Tibasosa y Nobsa). La administración del embalse se encuentra a cargo de la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

2.2. Delimitación de la cuenca

Los datos cartográficos de este estudio fueron obtenidos a partir de archivos *shape* de la hidrología del departamento de Boyacá, suministrados por la Corporación Regional de Boyacá (Corpoboyacá). Para el desarrollo de los procedimientos cartográficos se usaron sistemas de información geográficos mediante el *software* ArcGIS 10.1.

La delimitación de la cuenca del embalse La Copa se llevó a cabo mediante la extensión ArcSWAT, herramienta para la evaluación del suelo y el agua en cuencas hidrográficas. Una vez delimitada la cuenca, esta fue exportada en formato *shape*, el cual sirvió de base para

toda la mapificación del proyecto.

2.3. Pluviometría

Para el desarrollo de este estudio, se analizó la información pluviométrica mensual suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) para un periodo de 20 años, entre 1992 y 2011 en un total de 9 estaciones meteorológicas presentes en la zona; (Tabla 1). Con esta información se calculó la precipitación media anual para cada una de las estaciones.

Tabla 1. Estaciones presentes en la cuenca del embalse La Copa, Boyacá

Nombre de la estación	Ubicación geográfica	
	X	Y
El Encanto	1084683,14	1110746,15
Colegio Departamental Agropecuario	1090231,02	1105223,81
San Antonio	1093903,55	1119975,21
El Garrocho	1105216,24	1113701,17
Casa Amarilla	1102776,23	1103711,14
Los Azulejos	1097602,18	1116294,13
La Copa	1096812,47	1113534,00
Pila La Fca.	1086156,18	1101844,05
Siachoque	1091697,08	1101851,51

Fuente: Ideam (s. f.).

2.4. Índice de Fournier modificado

El índice de Fournier modificado (IFM) fue propuesto por Arnoldus (1980). Es una corrección del índice de Fournier (IF), que solo se consideraba la precipitación del mes más húmedo del año. Arnoldus propone que sea tenida en cuenta la precipitación de todos los meses del año, y por

ello, el IFM caracteriza la agresividad de la precipitación (Velazco y Cortés, 2009). Así, para el cálculo del IFM se usó la ecuación (1) propuesta por Arnoldus (1980):

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (1)$$

Donde *IFM* es el índice de Fournier modificado en *mm*; *P_i* es la precipitación del mes *i* en *mm*; y *P* es la precipitación total anual en *mm*.

El IFM se calculó para cada año en cada una de las estaciones presentes en la zona de estudio. Posteriormente se promedió el periodo de 20 años por estación, lo cual dio como resultado el IFM para cada una. Finalmente, este índice se clasificó de acuerdo con los rangos propuestos por Gabriels *et al.* (2004) (tabla 2).

Tabla 2. Categorías de clasificación para el índice de Fournier modificado en Latinoamérica

Índice de Fournier modificado (IFM)	Clasificación
0-60	Muy bajo
60-90	Bajo
90-120	Moderado
120-160	Alto
>160	Muy alto

Fuente: Gabriels *et al.* (2004).

2.5. Factor de erosividad *R*

Con el fin de obtener una aproximación que permita determinar el factor *R* a partir del IFM, se utilizó la ecuación (2) propuesta por Ramírez (2006), en la cual se encontró una correlación ($r = 0,84$) entre, por un lado, el EI_{30} reportado por Rivera (1990) en su estudio sobre la determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona cafetera central colombiana y, por otro, el IFM propuesto por Arnoldus (1980):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 30,4 * (IFM) + 28,3 \quad (2)$$

Donde *R* es la erosividad en $MJ*mm*ha^{-1}$ y el índice *R* se clasificó según lo propuesto por Rivera y Gómez (1991) (tabla 3).

Tabla 3. Clasificación del factor *R*

Erosividad <i>R</i> (MJ.mm.ha-1)	Clasificación
<1000	Natural
1000- 2500	Muy baja
2500-5000	Baja
5000- 7500	Moderada
7500-10.000	Alta
10.000-15.000	Muy alta
15.000 -20.000	Severa
>20.000	Extremadamente severa

Fuente: Rivera y Gómez (1991, citados en Tafur y Obando, 2010).

2.6. Índice de concentración de las precipitaciones ICP

Con el propósito de determinar la variabilidad temporal de las precipitaciones, se utilizó la ecuación (3) del ICP propuesta por Oliver (1980). El valor del índice de concentración de las precipitaciones (ICP) proporciona una gran significancia, pues tiene en cuenta la importancia de la precipitación en la erosión del suelo, que genera una dinámica más activa cuanto mayor es la concentración en el tiempo de las precipitaciones (Jordán y Bellinfante, 2000). El ICP se calculó para cada año en el periodo 1992-2011. Posteriormente fue promediado para cada estación y clasificado según la tabla 4 propuesta por Gabriels *et al.* (2004):

$$ICP = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t^2} * 100 \quad (3)$$

Donde P_i es la precipitación mensual y P_t es la precipitación anual

Tabla 4. Clasificación del índice de concentración de las precipitaciones

Clase	Rango	Descripción
1	8,3-10	Uniforme
2	10-15	Moderadamente estacional
3	15-20	Estacional
4	20-50	Altamente estacional
5	50-100	Irregular

Fuente: Gabriels *et al.* (2004).

2.7. Mapeación de los índices mediante SIG

La mapeación de los índices IFM, ICP y el factor R se realizó mediante el *software* ArcGIS 10.1. Luego de obtener los *shapes* respectivos a cada índice, se procedió a hacer un análisis geoestadístico de interpolación mediante el método determinístico del inverso de la distancia (IDW). Este método fue elegido por cuanto es un algoritmo simple que está diseñado para disminuir la distorsión de la interpolación de la superficie determinada, a partir de puntos seleccionados al azar (Riquelme *et al.*, 2008).

Vale señalar que cuando se interpolan valores tales como los de la precipitación media anual, no es adecuado utilizar aquellos métodos que suavicen excesivamente la superficie resultante, tales como *kriging*, porque se estarán perdiendo los valores extremos que, por la naturaleza del valor interpolado, son de gran interés

(Olaya, 2011). Además, métodos de interpolación locales como el IDW han sido los más frecuentemente utilizados en la predicción climática y el desarrollo cartográfico (Núñez, 2014; Serrano *et al.*, 2003).

Finalmente se exportó el inverso de la distancia a un archivo *raster*, el cual fue reclasificado según los rangos correspondientes a cada índice.

3. Resultados y discusión

En la figura 1 se muestra la cuenca del embalse La Copa, resultado de la delimitación mediante el *software* ArcSWAT. Además, se puede observar la ubicación de cada una de las estaciones pluviométricas presentes en la zona. Si bien no todas están posicionadas dentro del área de la cuenca, las nueve estaciones fueron tenidas en cuenta para realizar el análisis de interpolación por medio del método determinístico IDW. Este método permite obtener el valor de una variable en un punto determinado del espacio cuando se conoce el valor de esta misma variable en otros puntos del espacio (Bosque, 2000, citado en Paredes *et al.*, 2013).

Las variables de esta investigación fueron: la precipitación promedio anual, el índice IFM, el factor R y el índice ICP. El área total de la cuenca delimitada es de 31.065 ha, de las cuales el 50,62% pertenece al municipio de Toca, el 37,20% al municipio de Siachoque, el 7% al municipio de Tuta, el 4,15% al municipio de Chivatá, el 0,40% al municipio de Soracá, el 0,19% al municipio de Pesca y el 0,13% al municipio de Rondón.

En la tabla 5 se evidencian los resultados de la investigación. Allí se muestra la precipitación promedio anual en milímetros para cada una de las estaciones, al igual que el índice de Fournier modificado en milímetros, el factor R en $MJ*mm*ha^{-1}$ y el índice de concentración de las precipitaciones en porcentaje. Estos índices son el resultado del promedio anual para un periodo de 20 años (entre 1992 y 2011).



Figura 1. Cuenca del embalse La Copa delimitada en ArcSWAT

Fuente: Autores.

Tabla 5. Resultados de la investigación

Nombre de la estación	Precipitación promedio anual (mm)	Índice IFM	Factor R	Índice ICP
El Encanto	743,71	87,66	3005	11,81
Colegio Departamental Agropecuario	558,83	72,71	2550	13,07
San Antonio	880,23	100,37	3391	11,39
El Garrocho	701,74	84,19	2899	12,05
Casa Amarilla	804,08	93,62	3186	11,71
Los Azulejos	839,46	99,83	3375	11,87
La Copa	772,44	88,76	3038	11,54
Pila La Fca.	787,34	109,75	3676	13,85
Siachoque	704,46	87,55	3001	12,58

Fuente: Autores.

3.1. Pluviometría

Como se evidencia en la tabla 5, la precipitación promedio anual en la cuenca oscila entre los valores de 558 mm y 880 mm. Para poner en contexto estos valores, Ojeda y Arias (2000), en su informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia, establecen que la precipitación promedio anual en el 88% del país es superior a los 2000 mm, con un promedio anual cercano a los 3000 mm en la totalidad del territorio nacional. Por su parte, la precipitación promedio anual en el territorio de Suramérica es de 1900 mm, y en el ámbito global es de 900 mm.

Estos datos demuestran que la precipitación promedio anual para la cuenca del embalse La Copa es baja, es decir, hay una escasa intensidad de las lluvias durante todo el año. El comportamiento de las precipitaciones en la cuenca presenta un régimen bimodal, como puede verse en la figura 2, donde se observan dos periodos húmedos correspondientes a los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, con precipitaciones promedio mensuales entre los 91 mm. y los 94 mm de lluvia. El resto del año corresponde a un periodo relativamente seco, con precipitaciones que oscilan entre los 19 mm y los 64 mm.

La figura 3 muestra el mapa de distribución de las precipitaciones a lo largo de la cuenca, realizado mediante la interpolación del IDW. Se observa que la zona de mayor precipitación corresponde al municipio de Toca, específicamente en las veredas Raiba, Centro, Tuaneca y parte de Cunuca. De igual manera se presentan altas precipitaciones en la vereda Cormechoque Arriba (Siachoque), Rominquirá (Soracá) y La Hacienda (Tuta), mientras que la zona de menor precipitación en la cuenca corresponde al municipio de Chivatá y su vereda Siatoca.

Las zonas donde se presentan las mayores precipitaciones en la cuenca están ubicadas sobre el

páramo de la Cortadera, que se caracteriza por lluvias frecuentes de escasa intensidad.



Figura 2. Precipitación promedio mensual en la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores a partir de datos pluviométricos del Ideam.

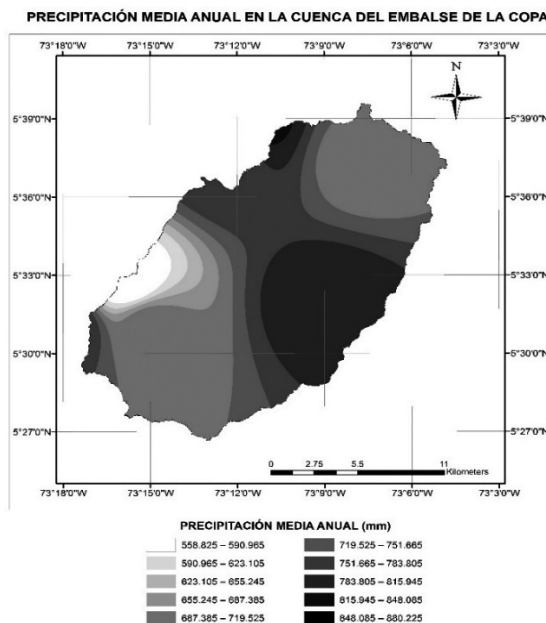


Figura 3. Mapa de distribución de la precipitación media anual de la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores.

3.2. Índice de Fournier modificado

La agresividad de la precipitación en la cuenca estimada con el IFM se expone en la figura 4, que muestra valores de agresividad de la precipitación que van desde 72 hasta 109. El valor más alto del IFM se presentó en Soracá (vereda Rominquirá), y una pequeña parte de la vereda Tirga, del municipio de Siachoque. Este valor en área representa menos del 0,50% de la cuenca.

Otros valores altos del IFM se presentaron en el municipio de Tuta (vereda La Hacienda). En los municipios de Toca (parte de las veredas Raiba, Centro y Tuaneca) y Siachoque (vereda Cormechoque arriba), estos valores oscilan entre 95 y 100, y entre 91 y 95, respectivamente.

Los valores más bajos del IFM se observaron en el municipio de Chivatá, donde estuvieron entre 72 y 76. Teniendo en cuenta las categorías de clasificación del IFM para Latinoamérica propuestas por Gabriels *et al.* (2004),

se puede observar que la totalidad de la cuenca entra en dos de estas categorías: moderado y bajo. Los municipios de Soracá, Siachoque, Toca y Tuta, en las veredas mencionadas líneas arriba, son los que tienen un riesgo moderado de erosión causado por la agresividad de la lluvia; mientras que en el resto de la cuenca la agresividad de la lluvia es baja.

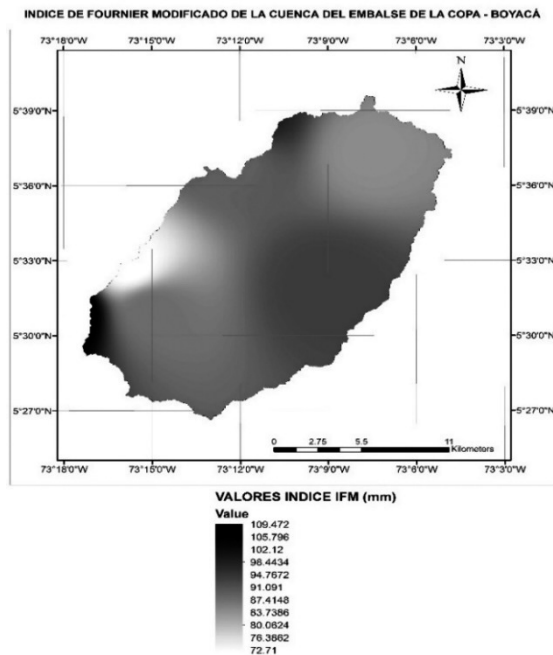


Figura 4. Mapa de distribución espacial del IFM en la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores.

Como lo reportan Rey *et al.* (2012), los mayores niveles de agresividad climática se dan durante los meses de mayor precipitación. Para la cuenca del embalse La Copa, como se observa en la figura 5, los meses de abril, mayo, octubre y noviembre son los que presentan un IFM más alto y registran un comportamiento muy semejante a la precipitación promedio, tanto en intensidad como en su distribución espacial.

Es importante aclarar que las zonas con potencial erosivo moderado, exceptuando Tuta (vereda La Hacienda),

se encuentran a una altitud mayor a los 2900 msnm, llegando inclusive a los 3500 msnm en zona de páramo; mientras que las zonas con potencial erosivo bajo se encuentran a una altitud menor a los 2800 msnm. Esto en parte coincide con las afirmaciones de Velazco y Cortés, (2009), que señalan que el riesgo de erosión se incrementa a medida que la altitud aumenta. Esto significa que la vulnerabilidad a la erosión causada por la lluvia está influenciada en gran medida por el relieve.

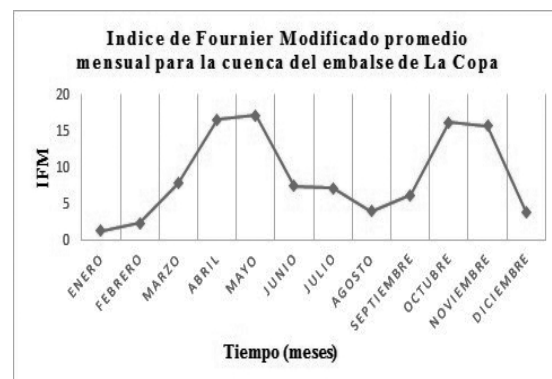


Figura 5. Promedio mensual del IFM para la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores.

3.3. Factor R

Como era de esperarse, los resultados del factor R (figura 6) muestran que existe una marcada correlación con el índice de Fournier modificado (figura 4), ya que este factor fue estimado a partir del IFM. Ramírez (2006) encontró, con un nivel de significancia del 0,05, que el IFM explica la variación del EI_{30} , lo cual valida la utilización del IFM para obtener una aproximación del factor R cuando no se cuenta con registros de precipitaciones diarias.

Tanto el IFM como el factor R presentan una distribución espacial muy similar. Las zonas próximas a las estaciones Pila la Fca., Los Azulejos y Casa Amarilla son las que obtuvieron un valor de R más alto; y la estación Colegio Departamental Agropecuario, ubicada

en Chivatá, fue la que presentó un valor más bajo del factor R .

Los valores del factor R oscilaron entre los 2550 $MJ*mm*ha^{-1}$ y los 3675 $MJ*mm*ha^{-1}$. Según la clasificación del factor R (tabla 3), estos valores determinan que la totalidad de la cuenca del embalse La Copa presenta un bajo riesgo de erosividad; sin embargo, es importante aclarar que tanto el IFM global como el Factor R global no explican de manera total las diferencias en el efecto que la erosividad produce sobre la pérdida de suelo por erosión en la cuenca. Por ello, Ramírez *et al.* (2007) sugieren analizar la distribución temporal y espacial de la erosividad de la lluvia a lo largo del año.

3.4. Índice de concentración de las precipitaciones (ICP)

La figura 7 muestra que la distribución de las precipitaciones en la cuenca, hallada mediante el índice de concentración de las precipitaciones, oscila entre el 11% y el 14%. Según estos resultados, la distribución es moderadamente estacional (Gabriels *et al.*, 2004). Esto indica que las precipitaciones se distribuyen durante varios meses del año, lo cual se puede apreciar mejor en la figura 2, en la que a pesar de observarse un régimen bimodal de las precipitaciones, también se evidencia un marcado periodo de transición entre las dos épocas más húmedas (entre junio y septiembre). Este periodo representa aproximadamente el 30% de las precipitaciones del año, mientras que los dos periodos más húmedos representan el 50% de las precipitaciones totales del año.

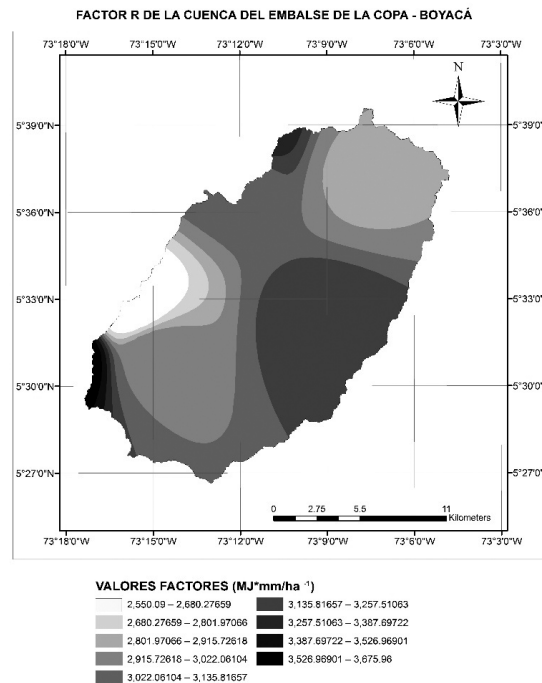


Figura 6. Mapa de distribución espacial del factor R en la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores.

Los valores más altos del ICP (12-13,8%) se encontraron en los municipios de Siachoque, Chivatá y Soracá, respectivamente; mientras que Toca, Tuta, Pesca y Rondón presentaron los valores más bajos de ICP, en el rango del 11%. El hecho de que las precipitaciones se distribuyan en varios meses del año indica que las lluvias, al ser menos concentradas, pueden tener un bajo efecto erosivo durante ese intervalo de tiempo.

La agresividad de la precipitación calculada mediante el IFM demostró que en la mayor parte de la cuenca la agresividad de las lluvias fue baja; mientras que en la parte restante la agresividad de las lluvias fue moderada y su pico más alto se registró en Soracá, donde se ubica la estación pluviométrica Pila La Fca. Allí el estudio pluviométrico evidenció un régimen bimodal de precipitaciones un poco más marcado que el resto de las estaciones.

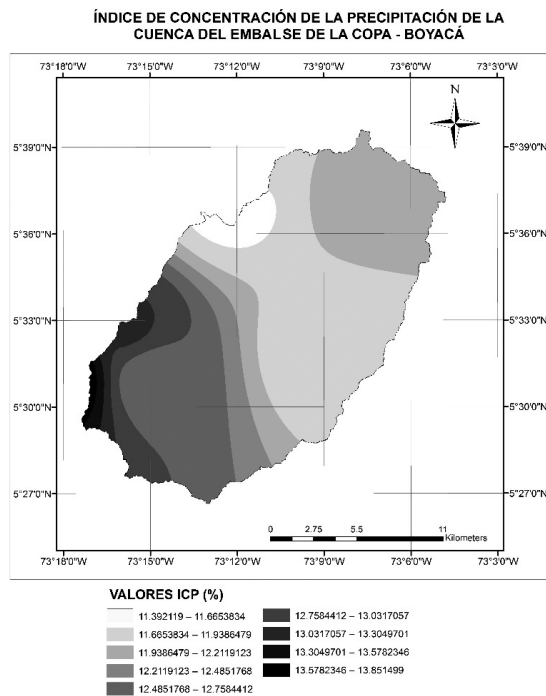


Figura 7. Mapa de distribución espacial del ICP en la cuenca del embalse La Copa

Fuente: Autores.

4. Conclusiones

La zona de la cuenca del embalse La Copa, que abarca los municipios de Toca, Siachoque, Tuta, Chivatá, Soracá, Rondón y Pesca, en el departamento de Boyacá, presenta un bajo riesgo de erosión causada por la lluvia, debido en parte a los bajos niveles de precipitación media anual, que en el periodo 1992-2011 osciló entre los 550 a los 880 mm de lluvia anual aproximadamente.

El factor *R* mostró una baja amenaza de erosividad para toda la cuenca; sin embargo, es importante definir un análisis de distribución temporal y espacial del factor *R* y del IFM para cada uno de los meses del año, lo cual permitirá tener una aproximación más exacta de la erosividad que causan las lluvias en la cuenca.

El ICP igualmente demostró que las lluvias, al estar distribuidas durante varios meses del año, generan un bajo riesgo de erosión; sin embargo, como conclusión principal se aclara que si bien estos tres índices ayudan a definir la erosividad de las lluvia, el IFM, el factor *R* y el ICP no son suficientes para explicar la pérdida de suelos en una cuenca. Por lo tanto, para lograr este propósito, es necesario tener en cuenta los demás factores de la ecuación universal de pérdida de suelos, la cual incluye el factor *K* de erodabilidad del suelo, el factor *LS* de longitud e inclinación de la pendiente, el factor *C* de manejo de coberturas y el factor *P* de prácticas de control de la erosión. Al estudiar estos factores junto con el factor *R*, se puede tener una visión más clara y más exacta de la pérdida de suelos en cuencas causada por erosión, y ello permitirá proponer y promover prácticas para la mitigación de la pérdida de suelos en la zona estudiada.

Referencias

- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. En T. De Boodt y D. Gabriels (Eds.), *Assesment of erosion* (pp. 125-132). Londres: Wiley.
- Besteiro, S. y Delgado, M. (2011). Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 110(2), 82-90.
- Cortez, A., Rodríguez, M., Rey, J., Lobo, D., Parra, R., Ovalles, F. Y Gabriels, D. (2011). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. II. Región Noroccidental. *Bioagro*, 23(1), 13-18.
- Gabriels, D., Ovalles, F., Santibáñez, F., Moyano, M. C., Aguilera, R., Pizarro, R. (2004). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. Montevideo: Unesco.
- Gracia, S. J. (1996). *Pérdida de suelo en cuencas. Capítulo 17 del Manual de ingeniería de Ríos*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Jordán, A. y Bellinfante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*, 7(3), 83-92.
- Leal, S. R. (2007). Análisis de la erosividad de la lluvia en Isla de Margarita (Venezuela) a través de datos de precipitación horaria. *Investigaciones Geográficas*, 44, 167-185.
- Núñez, L. D., Treviño, E. J., Reyes, V. M., Muñoz, C. A., Aguirre, O. A. y Jiménez, J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos; *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2).
- Ojeda, E. O. y Arias, R. (2000). *Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia*. Proyecto GWP SAMTAC. Cepal.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica, Versión 1.0*.
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32, 300-309.
- Paredes, C. U., Salinas, W. E., Martínez, X. y Jiménez, S.B. (2013). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas*, 82, 118-130.
- Pineda, C., Machado, D., Casanova, E. y Vilorio, J. (2006). Evaluación física de tierras de la cuenca alta del río guárico con fines de producción sustentable de agua. *Agronomía Trop.*, 56(3), 385-414.
- Ramírez, O. F. (2006). *Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas* (tesis de grado). Ibagué: Universidad del Tolima.
- Ramírez, O. F., Hincapié, G. E., Sadeghian, K. S. y Pérez, G. U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 58(1), 40-52.
- Rey, J. C., Rodríguez, M. F., Cortez, A., Lobo, D., Ovalles, F., Gabriels, D. y Parra, R. M. (2012). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. IV. Región Los Andes. *Bioagro*, 24(2), 115-120.
- Riquelme, R., Darrozes, J., Maire, E., Hérail, G., Soula, J. C. (2008). Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a Digital Elevation Model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implications for the Neogene climate of the Atacama Desert. *Revista Geológica de Chile*, 35(1).

Rivera, P. H. (1990). *Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda)* (tesis de maestría). Palmira: Universidad Nacional de Colombia.

Rivera, P. H. y Gómez, A. A. (1991). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37-52.

Rivera, P. H. (1999). *Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana* (tesis de doctorado). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Santacruz, G. (2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahocacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 3(1), 45-54.

Tafur, E. y Obando, F. (2010). Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín*, 62(1), 5307-5318.

Velazco, I. y Cortés, G. (2009). Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. Aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. *Thornes*, 9, 431-434.

Serrano, S. M., Sánchez, M. A. y Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Res.*, 24, 161-180.