

Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia

Determination of the risk to the potential erosion by water in the coffee zone of the Quindio, Colombia

A avaliação de risco para o potencial de erosão hídrica na região do café de Quindio, Colombia

Andrés Felipe Castro Quintero¹, Luz Adriana Lince Salazar² & Orlando Riaño Melo³

¹Ingeniero Agrónomo. ²Geóloga, Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. ³Matemático, Ingeniero de Sistemas y Computación, Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Magister en Geomática

^{1,2}Centro Nacional de Investigaciones de Café- CENICAFE. Manizales. Colombia.

³Maestría en Teledetección. Universidad Católica de Manizales. Colombia

¹andres.castro@cafedecolombia.com, ²luz.lince@cafedecolombia.com, ³orianom@unal.edu.co

Resumen

En la presente investigación se estimó la erosión potencial hídrica –EP-, la cual causa degradación y afectación a la fertilidad del suelo reduciendo el rendimiento del cultivo e incrementando los costos en producción. Se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE/RUSLE), con la formula $A = (R) * (K) * (LS)$, se realizó muestreo aleatorio simple, en once Unidades de suelo como repeticiones. Se trabajó con el factor de erosividad de la lluvia R reportados por Lince (2015), con precipitación mensual de 19 estaciones meteorológicas para el periodo 1999-2011. El cálculo del Factor (K) se cuantificó utilizando un simulador de lluvia, los datos obtenidos fueron interpolados con kriging, y por último se halló el factor topográfico –LS-, mediante el tratamiento a la imagen Aster GDEM, propiedad de la Nasa. Luego se procedió a utilizar el álgebra de mapas. Se encontró que la EP en los municipios de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao y Génova (Quindío, Colombia) presentaron más de 27 % del área de estudio con valores de calificación de pérdida de suelo Moderada, Alta y muy Alta que van desde las 26 a más

de 100 t/ha¹.año⁻¹, y los municipios de Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya y La Tebaida, presentan EP con calificaciones consideradas como Ligera a Baja, representando hasta el 73% del área de estudio con valores que van desde 10 a 25 t/ha¹.año⁻¹, y correspondiendo a pendientes poco pronunciadas, lo que representa pérdidas potenciales considerables en la capa orgánica del suelo.

Palabras clave: erosión potencial, interpolación Kriging, ponderación por distancia y simulador de lluvias.

Abstract

This research estimated erosion potential - EP-, which causes degradation and affecting the fertility of the soil by reducing the crop yield and increasing costs in production. Used the Universal equation of soil loss (USLE/RUSLE), with the formula $A = (R) * (K) * (LS)$, simple random sampling, in eleven ground units such as replications was conducted. He worked with R rain rainfall erosivity factor reported by

Lynx (2015), with monthly precipitation of 19 weather stations for the period 1999-2011. The calculation of Factor (K) was quantified using a rainfall Simulator, data were interpolated with kriging, and finally found the topographic factor - LS-, through treatment in the Aster GDEM image, owned by Nasa. They then proceeded to use the algebra of maps. Found that the EP in the municipalities of Buenavista, Pijao, Calarcá, Córdoba, Génova (Quindío, Colombia) presented more than 27% of the study area with moderate soil loss rating values, high and very high ranging from 26 to more than 100 t/ha¹.year¹, and the municipalities of Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya, and La Tebaida they present EP with qualifications considered light to low, representing up to 73% area of study with values that range from 10 to 25 t/ha¹.year¹, and corresponding to little steep slopes which represents significant potential losses in the organic layer of the soil.

Key-words: potential erosion, interpolation Kriging, weighting by distance, rain simulators.

Resumo

Neste trabalho de pesquisa foi estimada a erosão potencial hídrica –EP- causante da degradação afetando a fertilidade do solo reduzindo o rendimento do cultivo e incrementando o custo da produção. Utilizou-se a Equação Universal de

Perda de Solo (USLE/RUSLE), com a fórmula $A = (R) * (K) * (LS)$ e realizou-se uma coleta ao acaso simples de onze unidades de solo como repetições. Foi usado o fator de erosão da chuva R reportado por Lince (2015), com precipitação mensal de 19 estações climáticas no período de 1999-2011. O fator (K) foi calculado usando-se um simulador de chuva, foi feita uma interpolação com “kriging” e finalmente foi calculado um fator topográfico – LS – por médio do tratamento Aster GDEM, propriedade da Nasa. Logo após foi utilizado o álgebra de mapas. Foi encontrado que a EP nas localidades de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao e Génova (Quindío, Colômbia) apresentaram mais do que 27% da área de estudo com valores de qualificação de perda do solo moderada, alta e muito alta, desde 26 até mais de 100 t/ha¹.año¹, já as localidades de Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya e La Tebaida, apresentaram EP com valores considerados como leve para baixo, representando até 73% da área de estudo com valores de 10 a 25 t/ha¹.año¹, isto corresponde a inclinações pouco marcadas, o que representa perdas potenciais importantes na camada orgânica do solo.

Palavras-chave: erosão potencial, interpolação “Kriging” ponderação por distância, simulador de chuvas.

Introducción

La erosión hídrica de suelos en Colombia es un problema que afecta directamente la fertilidad del suelo, ocasionando baja producción de los cultivos e incrementando los costos en producción Rivera & Gómez (1991). En la zona cafetera hay procesos naturales que favorecen erosión como lo son las fuertes lluvias, material parental susceptible y las altas pendientes. En este sentido Castillo (2004), menciona que la erosión hídrica puede convertir el terreno en áreas degradadas. Mientras Sagredo (2005), afirma que los índices máximos se presentan cuando existe un uso y manejo inadecuado de

estos a favor de la pendiente. Por lo tanto, se hace necesario estimar la pérdida del suelo debido a la erosión hídrica en el departamento del Quindío, y de esta manera identificar zonas donde ocurre este proceso. Para calcular la pérdida de suelo en este caso para erosión potencial se hace por medio de la implementación de un modelo matemático empírico para el cálculo de la pérdida de suelo USLE/ RUSLE, desarrollado por Wischmeier & Smith (1978) y revisado por Renard, Meyer & Foster (1989).

Se aplicó la metodología de Hincapié & Rivera (2003) obteniendo los datos numéricos para

determinar la erosividad de la lluvia (R) en MJ.mm. ha⁻¹, adquiriendo datos de precipitación de 19 estaciones climática, aplicando la fórmula matemática del índice de Fournier IFM, reportado por Arnoldus, Boodt & Gabriels (1980) y el EI30 propuesto por Rivera & Gómez (1991) y Rivera *et al.* (2010) para la zona centro cafetera. La determinación del índice de Erodabilidad (Ki) en t/ha/MJ-1.mm-1. ha⁻¹, el cual es cuantificado utilizando el simulador de lluvia, determinando la susceptibilidad del suelo a erosionarse por acción de la gota de la lluvia, por último, se tuvieron en cuenta los factores topográficos LS, utilizando la metodología citada por Cocuyame & Salazar (2015). Donde, para ello se utilizó un modelo digital de elevación (ASTER GDEM), calculando la longitud y ángulo de la pendiente. En este estudio se asume que no existe cobertura alguna (C=1) y que el suelo se encuentra sin prácticas de manejo de conservación (P=1), y están a favor de la pendiente (Montes-León, Uribe-Alcantara, García-Celis, 2011), la cual permite estimar cuantitativamente la erosión potencial, representada por la pérdida de suelo en t/ha/año.

Los datos obtenidos fueron proyectados, utilizando Tecnologías de Información Geográfica TIG, que se convierte en herramienta de gestión ambiental y control de riesgos para analizar y prevenir la pérdida de suelos productivos (Rodríguez *et al.*, 2004). Además en la actualidad para la región cafetera de Colombia, se desconoce cuánta es la pérdida potencial de suelo por erosión, por tal motivo la información debe conocerse a escala regional o local, con el fin de diseñar las estrategias acordes a dichas condiciones, que en muchos casos la baja adopción de las prácticas de conservación, puede obedecer a recomendaciones generales que no corresponden a las condiciones ni a las necesidades de los productores. Por lo anterior, en esta investigación se plantea

llevar a cabo una predicción de erosión potencial en la zona cafetera del departamento del Quindío. Siendo necesario demostrar el deterioro real para crear conciencia, y proponer soluciones desde el interior de las comunidades.

Materiales y métodos

Área de estudio

El departamento del Quindío está ubicado en la región centro-occidental de Colombia; está dividido en 12 municipios: Armenia, Buenavista, Calarcá, Circasia, Córdoba, Filandia, Génova, La Tebaida, Montenegro, Pijao, Quimbaya y Salento, cuenta con una superficie de 1.845 km². En la mayoría de la zona cafetera del departamento, desde Filandia en el norte, hasta Génova en el sur. Cuenta con una temperatura media entre 18 y 24°C, y un promedio anual de lluvias de 2.000 a 4.000 mm.

Procesamiento

En el procesamiento se seleccionaron suelos desarrollados bajo distintas condiciones climáticas a lo largo de gradientes, para cada sitio se identificó el material parental de los suelos, teniendo en cuenta los sitios por rangos altitudinales (1200 a 1400 msnm – 1400 a 1600 msnm y 1600 a 1800 msnm, sembrados con cultivos de café. Se elaboró un mapa de muestreo aleatorio simple identificando once unidades de suelos representativas de la zona de estudio (Figura 1), distribuida de la siguiente forma: unidad Montenegro (11 muestras), Quindío (6 muestras), Génova (5 muestras), Chinchiná (3 muestras), Buenavista (3 muestras), Malabar (2 muestras), Filandia (2 muestras), La Concha (1 muestras), Patiobonito (1 muestras), Aluvial (1 muestras) y Sedimentario (1 muestras), el número de repeticiones está determinado por el área de la unidad cartográfica.

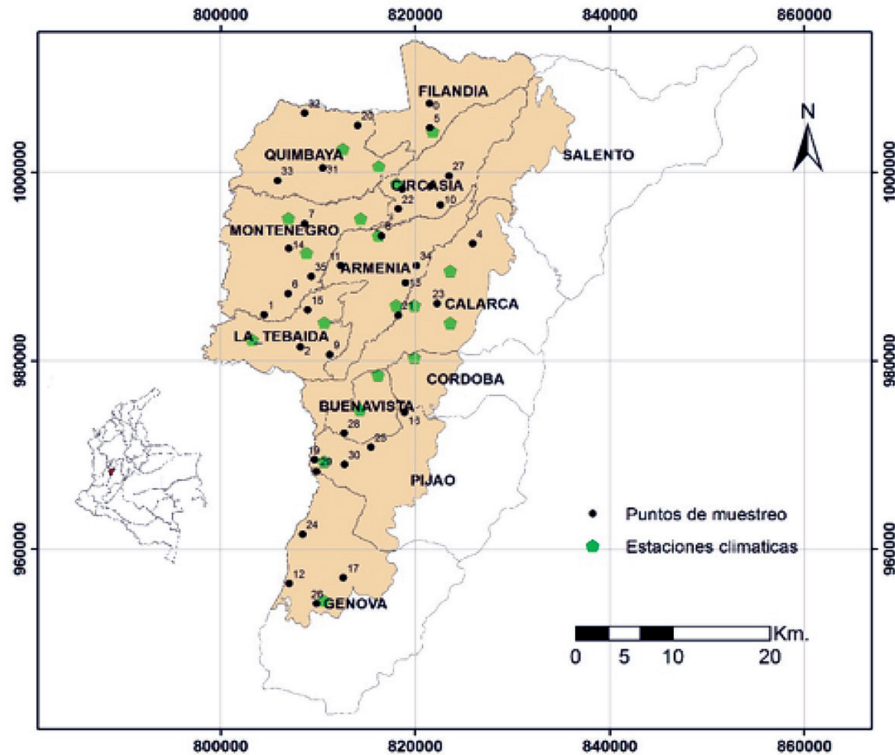


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Fase de Campo. Se recolectaron 36 muestras de suelo a una profundidad de 0 a 10 cm, para un total aproximado de 30 kg por muestra, estas fueron empacadas en bolsas herméticas, llevadas a laboratorio y procesadas para realizar análisis físico y químico a los suelos.

Fase de Laboratorio. Las muestras fueron secadas al aire libre bajo sombra, se separó 1kg de suelo para análisis de propiedades físicas y 1 kg para análisis químico, el suelo sobrante fue pasado por un tamiz con diámetro , para ser utilizado en construcción de microparcels del simulador de lluvias.

Recopilación de datos primarios. Como mapa base, se empleó una imagen ASTER (Global Digital Elevation Model –GDEM), en formato raster con un tamaño de píxel 30m por 30 m. Dicha información geoespacial se adquirió de la NASA, (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>). Para la precipitación se obtuvo información histórica contenida en la red climática de Federación Nacional de Cafeteros Cenicafe y datos de erodabilidad.

Características del simulador de lluvias. El equipo para determinar el factor de erodabilidad (k) es del tipo Purdue Programmable, que cuenta con Boquilla Vee–Jet 80 – 100; el cual se calibro con una precipitación de 80 mm/hora, y una presión de 8 PSI. Las microparcels se graduaron con inclinación del 70% que hace referencia a la pendiente promedio de la zona cafetera colombiana.

Descripción del procedimiento. Para calcular la pérdida de suelos por erosión hídrica se aplicó la ecuación universal de pérdida de suelo Wischmeier & Smith (1978), usando el proceso en el álgebra de mapas, con el software ArcGIS (ESRI, 2008; Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011; Flores López *et al.*, 2003), La cual consiste en crear un mapa *raster* para cada uno de los factores de la ecuación, la importancia radica en que puede ser usada en cualquier región geográfica modificando sus factores de acuerdo a las características propias de la región de estudio y así cuantificar la erosión potencial, usando una relación funcional de varios factores expresados en la ecuación USLE/RUSLE (ecuación 1):

$$A = (R)^* (K)^*(S \cdot L) \tag{1}$$

$$EI_{30} = \sum_{12} 30,4 (IMF) + 28,3 \tag{3}$$

Siendo: A la pérdida de suelo por unidad de superficie (t/ha.año), R es el factor lluvia o índice de erosión pluvial (MJ. mm /ha h), K es el factor erodabilidad del suelo (t.ha.h / ha.MJ.mm).determinado en simulador de lluvia, L es el factor longitud de pendiente (adimensional) y S es la pendiente (adimensional). No se tienen en cuenta los factores C y P, para el cálculo de la erosión potencial EP.

Determinación de los factores de la ecuación

El Factor de erosividad (R) lo definen varios investigadores como la agresividad climática, siendo la fuerza de las gotas de agua lluvia, las que causan la erosión, y una forma de estimar el factor R es emplear la expresión utilizada por Ramírez *et al.* (2007) y Lince & Castro (2015), los cuales trabajan con índice de Fournier modificado (IMF), el cual corresponde al promedio mensual propuesto por Arnoldus *et al.* (1980) y el índice de erosividad o capacidad de las lluvias de erosionar el suelo (EI30), recomendado por Rivera (1991) (ecuación 2). La precipitación de la zona de estudio se caracterizó mediante información histórica del periodo de 15 años, para ello se seleccionaron 19 estaciones meteorológicas. Para estimar el factor R se emplea la extensión *Spatial Analyst*, el método de interpolación distancia inversa ponderada IDW. Se obtuvo una superficie estimada a partir de este conjunto de datos los puntos dispersos en el área geográfica. El factor R utilizado fue de datos aportados en investigaciones anteriores para el departamento de Quindío por Lince & Castro (2015).

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \tag{2}$$

donde:

- P_i = Precipitación media mensual del mes (mm)
- P_t = Precipitación media anual (mm).

Luego de ello se obtienen los valores de EI30 para la zona de estudio (ecuación 3)

donde:

- EI₃₀ = Erosividad en MJ.mm.ha⁻¹
- IMF = Índice modificado de Fournier (promedio mensual)

Factor (K) o Índice de Erodabilidad. Según (Figueroa *et al.*, 1991) se define como la susceptibilidad de un suelo a la erosión, este factor se realizó en 11 unidades de suelo, mediante el simulador de lluvia, el cual, cuantificó la pérdida de suelo arrastrado por escorrentía, salpique y depósito en canal y agua escorrentía e infiltrada, el suelo recolectado en cada prueba se dejó decantar durante 48 horas, luego fue secado en estufa a 105°C durante 48 h, y pesado en una balanza de precisión de 0.0001 g; los datos obtenidos fueron modelizados con métodos geoestadísticos con interpolación (KRIGING).

Factor topográfico (LS). Es la distancia horizontal desde el punto más alto, donde se origina el flujo superficial al punto más bajo donde comienza la deposición que fluye por escorrentía a un canal, mediante la ecuación usada por USLE/RUSLE (Renard *et al.*, 1997), implementando el modelo de dirección de flujo y acumulación de flujo con la extensión de *arcHydro* para *Arcgis*. (Foster *et al.*, 1977, citado por Barrios & Quiñonez, 2000). Se implementa el mapa de pendientes y se reclasifica, luego se procede a obtener la distribución espacial de LS. En el cálculo del factor L, fue necesario aplicar un relleno al DEM para evitar espacios vacíos en el raster, esto se elaboró mediante la herramienta "Fill" del software empleado, con la imagen resultante se creó un raster de pendientes -Slope- el mismo que fue utilizado para crear el factor empleando las ecuaciones 4 y 5.

$$\beta = \frac{(\sin\theta / 0.0896)}{3.0 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56} \tag{4}$$

donde:

- θ = Es el ángulo de la pendiente a partir de la metodología expuesta por Flores López *et al.*, 2003)

En *ArcMap* con *Raster Calculator* se emplea la siguiente fórmula para obtener el factor

- **Factor β** = $((\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$. Hace referencia a la **ecuación** (4)

Obtenido el Factor β se procedió a obtener el factor M que también es un dato a considerar en la obtención del Factor L, para ello se emplea la ecuación 6 en "Raster Calculator"

$$m = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \quad (5)$$

- Factor M = "Factor_ β " / ("Factor_ β " + 1) Hace referencia a la ecuación (5)

Para obtener el cálculo del factor L con el área de drenaje aportadora se procedió a realizar la dirección de flujo y acumulación del flujo con las herramientas *Flow Direction* y *Flow Accumulation* respectivamente. Obtenidas estas dos imágenes se halló el Factor L en "Raster Calculator" empleando la Ecuación 6 y formula Desmet & Govers (1996) citado por (Shi *et al.*, 2004).

$$L(i,j) = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad (6)$$

donde:

A_(i,j) [m] = es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda).

D = es el tamaño del pixel.

X = es el factor de corrección de forma.

- **Factor_L** = $(\text{Power}(\text{"flow_acc"} + 625, (\text{"Factor_M"} + 1)) / \text{Power}(\text{"flow_acc"}, (\text{"Factor_M"} + 1))) / \text{Power}(25, (\text{"Factor_M"} + 2)) * \text{Power}(22.13, \text{"Factor_M"})$. Hace referencia a la ecuación (6)

Para el cálculo del Factor S se empleara la ecuación 7.

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad (7)$$

donde:

S_(i,j) = Pendiente del factor de coordenadas (i,j)

$\beta_{(i,j)}$ = Pendiente (grados) con las coordenadas (i,j)

- **Factor S** = Con $((\text{Tan}(\text{"Slope"} * 0.01745) < 0.09), (10.08 * \text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) - 0.5))$. Hace referencia a la **ecuación** (7)

De igual modo se obtiene el ráster subfactor de (S) la cual es la pendiente del terreno, donde el ángulo β se toma como el ángulo medio a todos los sub-grids en la dirección de mayor pendiente según (McCool *et al.*, 1987), citado por Barrios & Quiñonez, 2000). Menciona Velásquez (2008) que, cuando se aplica esta fórmula en el Raster Calculator de ArcGIS se debe tomar en cuenta que el ángulo que deberá ser convertido a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745 radianes), para poder ser multiplicado por los demás componentes de las ecuaciones. Una vez obtenidos todos los factores anteriores procedió a calcular el factor LS que es objeto de la presente metodología. Para ello se utilizó la ecuación 8.

Factor LS = "Factor_L" * "Factor_S". Hace referencia a la ecuación (6 y 7) (8)

Erosión Hídrica Potencial

En el caso de la erosión hídrica potencial, se multiplican los factores de la ecuación, hallados en las ecuaciones anteriores.

A = (Factor K) * (Factor R) * (Factor LS). Hace referencia a la ecuación (8)

La clasificación de pérdida de suelo potencial se comparó con la propuesta por Pérez (2001)

Programación de la ecuación.

Para fines prácticos se estructuró en la herramienta ModelBuilder, el modelo de geoprocésamiento automatizando mediante análisis espacial y de administración de datos, además se representa con un diagrama que concatena secuencias de procesos y herramientas de geoprocésamiento utilizando la salida y entrada de las variables de la ecuación (Figura 2) en esta metodología se adaptó para reemplazar símbolo por F, para facilitar el modelo (Quintana *et al.*, 2009).

Pérdida de suelo potencial (EP). En la Figura 4, como se muestra en la parte baja del mapa, se observa la pérdida de suelo con valores que van de 9.431 a 202.17 t/ ha⁻¹. año⁻¹. Los cuales se clasificaron con las pérdidas de suelos propuesta por Pérez (2001). Es importante mencionar que se realizó la proyección con los promedios de pérdidas potenciales de suelos en la zona cafetera del departamento del Quindío que es el resultado de multiplicar, el factor R agresividad de la lluvia, Factor K de erodabilidad o susceptibilidad de los suelos a la erosión y por último longitud y gradiente de la pendiente, llevándolo a condiciones extremas donde no existirían cobertura ni prácticas de conservación.

Los municipios de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Génova, y Pijao, presentaron el 27 % de área total de superficie con riesgo a la erosión potencial. Esto municipios se clasificaron de Moderada, Alta y Muy Alta con pérdidas que van desde 26 o más de 100 t/ ha⁻¹. año⁻¹. En los municipios de Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya y La Tebaida presentan calificación de Ligera a Baja en un porcentaje del 73 % de su área total de superficie con valores que van desde 10 a 25 t/ ha⁻¹. año⁻¹. En los municipios de Armenia, Montenegro y La Tebaida fueron los que menores pérdidas presentan.

Aunque las pérdidas fueron menores puede llegar a causar daños irreparables en la capa orgánica del suelo, donde se encuentra la mayor cantidad de raíces del café, encargadas de la nutrición de la planta. El espesor del suelo puede perder de 2 a 3 mm por cada 30 t.ha.año como lo reportan estudios previos de CENICAFE en 1975, lo que significa que 27 % del área de estudio puede llegar perder entos 2 mm. ha . año y en un periodo de 10 años por hectárea puede llegar a perder 2 cm de espesor de la capa fértil del suelo, lo cual genera infertilidad. Por lo tanto, para cada uno de los municipios se clasificó la pérdida de suelo según la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la pérdida de suelo de acuerdo con la calificación.

Pérdida de suelo (t/ha ⁻¹ .año)	Calificación de pérdida	Área (%)
Menor de 10	Ligera	43
10 a 25	Baja	30
26 a 50	Moderada	21
51 a 100	Alta	4
Mayor de 100	Muy alta	2

Fuente: Pérez (2001).

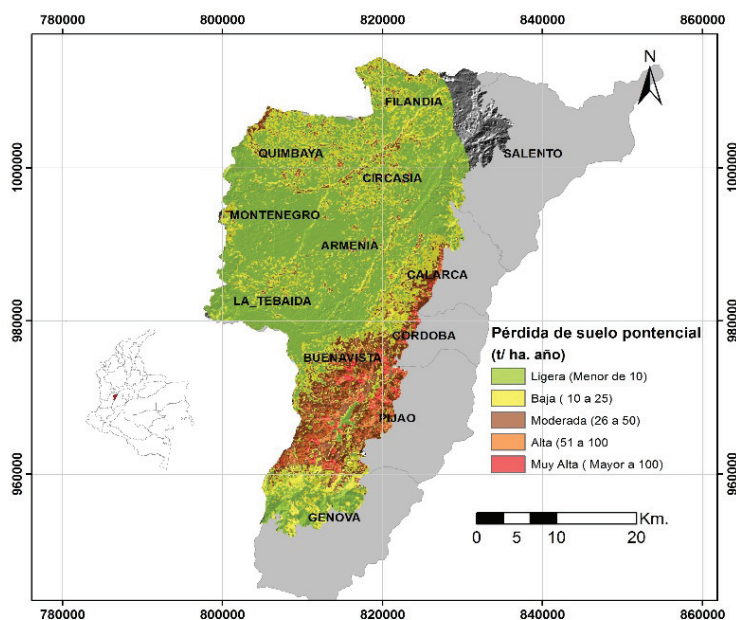


Figura 4. Mapa de Erosión Potencial. Pérdida de Suelo potencial en el departamento del Quindío

Conclusiones

El factor de erodabilidad más alta y que cubre mayor área de estudios se presenta en los municipios de Buenavista y Pijao, con valores de 0.0041 a 0.0077 t/ha/MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹, lo cual coincide con los municipios que se clasifican con riesgo potencial Moderada, Alta y Muy Alta y compromete más del 90% y 83 % de su área en estudio, lo cual es un indicador para la toma de decisiones a la hora de implementar prácticas de conservación.

La ecuación de pérdida de suelo USLE/RUSLE es un herramienta que permite generar los mapas de riesgos de la erosión potencial y así identificar las posibles zonas que pueden llegar a presentar baja fertilidad y desde el tema ambiental la que genera mayores aporte de sedimentos.

El material parental, la erosividad y las pendientes jugaron un papel fundamental en las pérdidas de suelo, como se pudo observar en los municipios de Montenegro, Circasia, La Tebaida y Armenia, donde las pérdidas fueron clasificadas de Ligera a Baja con valores menores 25 t/ha⁻¹.año⁻¹, que correspondían a pendientes del 15 y 30 %.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Comité Departamental de Cafeteros de Quindío y a las disciplinas de suelos y agroclimatología de Cenicafé.

Literatura citada

1. Arnoldus, H. M. J., Boodt, M. D. & Gabriels, D. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. *Assessment of Erosion*, 127-132.
2. Barrios R., A.G. & Quiñonez, E. (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo (r) USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los andes venezolanos. *Rev. Forest.* 44 (1), pp 65-71.
3. Castillo, J. (2004). Variación de la erodabilidad y aplicación de la ecuación universal de pérdida de Suelo (USLE) en Los Andes Colombianos, (tesis de Doctorado) Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.
4. Cocuyame R., R.A. & Salazar Q., D. (2015). Clasificación y zonificación de la susceptibilidad a erosión hídrica en la cuenca del río guabas con apoyo de herramientas geomáticas. (tesis de pregrado) Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.
5. Desmet, P. J. J. & Govers, G. A. (1996). GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 (5): 427-433.
6. ESRI. (2008). ArcGIS 9.3. Redlands, CA. USA.
7. Figueroa, Amante, A., Cortés, T. H., Pimentel, L. J., Osuna, C. E., Rodríguez, O. J. & Morales, F. F. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Post-graduados, México.
8. Figueroa-Jáuregui, M. L.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Arteaga-Ramírez, R.; Arellano-Monterrosas J. L. & Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de san cristóbal de las casas, México.
9. Foster, G. R., Meyer, L. D. & Onstad, C. A. (1977) An erosion equation derived from basic erosion principles. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs*, 678-682.
10. Flores López, H. E., Martínez Menes, M.; Oropeza Mota, J. L.; Mejía Sáenz, E. & López Carrillo, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlan, Jalisco, México. *Terra* 21, 233-244.
11. Hincapié, E. & Rivera, H. (2003). Validación del factor erodabilidad en suelos de la unidad Chinchiná, Melanudads, mediante el uso de simulador de lluvias. *Cenicafé* 54 (1): 77-89.
12. Lince, L.A. & Castro, A.F. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío Colombia. *Cenicafé* 66 (1):25-31.
13. Montes-León, M. L.; Uribe-Alcantara, E. M. & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. II* (1): 5-17.
14. Mccool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. & Meyer, L. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE* 30 (5): 1387-1396.
15. Pérez, S. (2001). Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. (tesis Especialiación). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.
16. Quintana, M., Ortega, S., Fernández, M. & Criado, V. (2009). Libro SIG aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental: ejercicios. Madrid, España,
17. Ramírez, F.A., Hincapié, E., Sadeghian, S. & Pérez, U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé* 58 (1):40- 52.
18. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies G.A. et al. (Coordinators). (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Uni-

- versal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA Agricultural Handbook No. 703*, 404 pp. Available at http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/AH_703.pdf
19. Renard, K. G.; Meyer, L. D. & Foster, G. R. (1989). Introduction and History. Revised Universal Soil Loss Equation, Chapter 1. USDA-ARS Tucson, Arizona.
 20. Rivera, H. & Gómez, A. (1991) Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé* 42 (2):37–52.
 21. Rivera, J. H., Lal, R., Amézquita, E., Mesa, O. & Chaves, B. (2010) Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 61 (4): 344-357
 22. Rodríguez, M.F., Florentino, A., Gallardo, J. & Antonio, R. (2004). Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*. Vol. 54-4, 391-409.
 23. Sagredo, C. (2005). Metodología para evaluar la estabilidad de camellones. (tesis de pregrado), Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
 24. Shi, Z. H.; Cai, C. F.; Ding, S. W.; Wang, T. W. & Chow, T. L. (2004). Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the three gorge area of China. *Catena*. Vol. 55, 33-48.
 25. Velásquez, S. (2008). Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Coronado, Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza.
 26. Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook, n° .537, Department of Agriculture Science and Education administration, Washington, USA: U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: Julio 22 de 2016
Aceptado: Agosto 12 de 2016