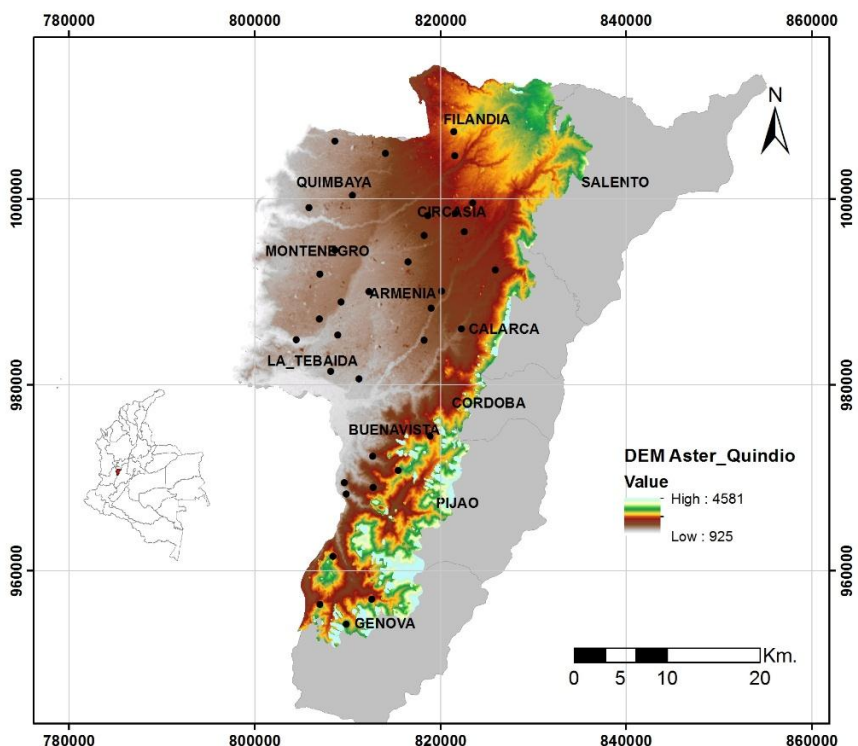


DETERMINACIÓN DEL RIESGO A LA EROSIÓN POTENCIAL HIDRICA EN LA ZONA CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DE QUINDÍO

Andrés Felipe Castro Quintero



UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES

2017

**DETERMINACIÓN DEL RIESGO A LA EROSIÓN POTENCIAL HIDRICA EN
LA ZONA CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DE QUINDÍO**

PROYECTO: AMBIENTAL

Estudiante de posgrado:

Andrés Felipe Castro Quintero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:

Maestría en tecnologías de información geográfica

Director

Orlando Riaño

Msc. Geomántica

Msc. Ingeniería de Sistemas

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PROGRAMA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

MANIZALES

2017

TABLA DE CONTENIDO

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
2. . OBJETIVO GENERAL:	14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. MARCO TEORICO.....	16
4.1 ESTADO DEL ARTE	16
4.1.1 INICIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA	16
4.1.2 MECANISMOS Y FACTORES DE LA EROSIÓN.....	16
4.1.3 TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA.	17
4.2 ANTECEDENTES	18
4.2.1 INVESTIGACIONES SOBRE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN EN ZONA CAFETERA DE COLOMBIANA.....	18
4.2.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ Y EROSIÓN DE LOS SUELOS.	18
4.2.3 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE SUELOS POR EROSIÓN	20
4.2.4 ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELO POR EROSIÓN	20
5. METODOLOGÍA.....	22
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.	22
5.2 Procesamiento.....	23
5.2.1 Unidades de suelo.....	23
5.3.1 Fase I. Campo.	25
5.4 Fase II. Laboratorio.	27
5.4.1 Preparación muestras de suelo.....	27
5.4.2 Variables determinadas	27
5.5 Determinación del factor k utilizando modelos matemáticos de predicción de pérdida de USLE mediante el simulador de lluvias	34
5.5.1 Descripción del procedimiento en el simulador de lluvia.	34
5.5.2 Características de simulador de lluvias.....	35
5.5.3 Calibración del Simulador de Lluvias	36
5.5.4 Cálculo para determinar la lluvia efectiva.....	38
5.5.5 Determinación del índice de erodabilidad K con ecuación de (USLE) en simulador de lluvia.	38
5.5.6 Esquema de la prueba simulación de lluvias para cálculo de factor K de erodabilidad.....	39
5.5.7 Aplicación de las ecuaciones para la determinación del factor k de erodabilidad en la unidad de suelo	40

5.5.9 Cálculo para Índice de Erosividad EI_{30}	41
5.6.1 Cálculo para pérdida de suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}$	42
5.6.2 Cálculo para hallar el Factor K.....	42
5.8 PROCEDIMIENTOS DEL DESARROLLO DE LA ECUACION USLE/RUSLE EN ARCGIS 10.2	43
5.8.1 Determinación de los factores.....	43
ECUACIÓN (18).....	44
ECUACIÓN (19).....	44
5.8.2 Análisis de distribución de los datos de las estaciones.....	46
5.9 Erosión Hídrica Potencial.....	50
5.9.1 PROGRAMACIÓN DE LA ECUACIÓN EN MODEL BUILDER.....	50
6. RESULTADOS.....	53
6.1 ÍNDICE MODIFICADO DE FOURIER (IMF).....	53
6.2 FACTOR DE ERODABILIDAD (K).....	57
6.3 PÉRDIDA DE SUELO POTENCIAL (EP).....	58
7. CONCLUSIONES.....	61
8. RECOMENDACIONES.....	62
9. BIBLIOGRAFÍA.....	63
10. ANEXO 1: ANÁLISIS FÍSICOS.....	69

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO Y UNIDAD DE SUELO A LA QUE PERTENECEN.....	23
TABLA 2. PROPIEDADES FÍSICAS.....	27
TABLA 3. ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS INCLUIDAS EN EL ESTUDIO Y LOS AÑOS DE LOS QUE SE TOMÓ EL DATO DE PRECIPITACIÓN DIARIA.....	44
TABLA 4. VALORES PROMEDIO DE ÍNDICE MODIFICADO DE FOURNIER Y SU CLASIFICACIÓN.....	53
TABLA 5. VALORES EROSIVIDAD (R) Y CLASIFICACIÓN PARA EL ÁREA CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO.....	55
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO DE ACUERDO CON LA CALIFICACIÓN.....	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, MUESTREO Y ESTACIONES CLIMÁTICAS.....	22
FIGURA 2. MAPA DE UNIDADES DE SUELOS DE LA REGIÓN CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DE QUINDÍO Y PUNTOS D	

E MUESTREO.....	26
FIGURA 3.TRIANGULO DE TEXTURA	34
FIGURA 4.CALIBRACIÓN DE SIMULADOR DE LLUVIA.	37
FIGURA 5.DIMENSIONES DE MICROPARCELA O BANDEJA.	38
FIGURA 6. ESQUEMA DE PROCESOS EN SIMULADOR DE LLUVIAS	40
FIGURA 7.CLASIFICACIÓN DE LOS REGISTROS DE PRECIPITACIÓN ANUAL PARA LAS 19 ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS.	47
FIGURA 8.DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA CON MODELBUILDER PARA EP	52
FIGURA 9.MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EROSIVIDAD (R) EN LA REGIÓN CAFETERA DEL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO.	56
FIGURA 10.MAPA DE ERODABILIDAD O SUSCEPTIBILIDAD EN EL DEPARTAMENTO QUINDÍO.....	58
FIGURA 11.PÉRDIDA DE SUELO POTENCIAL EN EL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO.	60

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen

Por haber permitido llegar hasta este punto y dándome la salud para lograr el objetivos, además de su infinito conocimiento, sabiduría, misericordia y amor.

A mi familia.

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

¡Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos!

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo a Dios y la Virgen, que serán la guía de mi vida.

Agradecer de manera muy especial al alma mater de la Universidad del Manizales, por ofrecer los conocimientos y metodologías para llevar a cabo este logro profesional. Y por enriquecer mi vida personal, con su gran diversidad cultural.

A mi director de tesis, Orlando Riaño, por el esfuerzo y compromiso. Sus conocimientos, orientaciones, paciencia y persistencia han sido fundamental para mi formación como personas y luego como profesional.

A mi compañera y amiga Adriana Lince, persona extraordinaria, que en el trascurso del posgrado me brindo apoyo y afecto absoluto en la formación personal y profesional, Damos gracias a Dios por su permanecía en la vida.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. “Pedro Uribe Mejía”, por facilitarme las instalaciones e información necesaria para realizar esta investigación.

COMITÉ DEPARTAMENTAL DE CAFETEROS DEL QUINDÍO por el apoyo logístico en el **trabajo** de campo

RESUMEN

En el presente trabajo 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 siguiente fórmula $A = (R) * (K) * (LS)$, se realizó muestreo aleatorio simple, con cuatro repeticiones en once Unidades de suelo, 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 para la predicción de EP, se encontró en los municipios de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao y Génova presentaron más de 27 % del área de estudio con valores de calificación de pérdida de suelo Moderada, Alta y muy Alta que va desde las 26 o más de $100 \text{ t/ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, 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 $25 \text{ t/ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, y correspondiendo a pendientes poco pronunciadas, lo que representa pérdidas potenciales considerables en la capa orgánica del suelo que pueden llegar hasta los $3 \text{ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

Palabras clave: Aster GDEM, erodabilidad, interpolación Kriging, ponderación por distancia (IDW) y Simulador de lluvias.

SUMMARY

In the present work, water potential erosion (PE) was estimated, causing degradation and affectation to soil fertility, reducing crop yield and increasing production costs. We used the Universal Equation of Soil Loss (USLE / RUSLE), with the following formula $A = (R) * (K) * (LS)$, we performed simple random sampling, with four replications in eleven Soil Units, we worked with the rainfall erosivity factor R reported by Lince (2015) with monthly precipitation of 19 meteorological stations for the period 1999-2011. The calculation of the Factor (K) was quantified using a rain simulator, the data obtained were interpolated with kriging, and finally

the topographic factor (LS) was found, by the treatment of Aster GDEM image, owned by Nasa. We then proceeded to use the map algebra for the prediction of PE, found in the municipalities of Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao and Genoa presented more than 27% of the study area with values of soil loss rating Moderate, High And very high that ranges from 26 or more than 100 t / ha⁻¹year⁻¹, and the municipalities of Armenia, Circasia, Filandia, Montenegro, Quimbaya and La Tebaida present EP with ratings considered as Light to Low, representing Up to 73% of the study area with values ranging from 10 to 25 t / ha⁻¹year⁻¹, and corresponding to steep slopes, which represents considerable potential losses in the organic layer of the soil that can reach the 3 mm.ha⁻¹.year⁻¹

Keywords: Aster GDEM, erodability, kriging interpolation, distance weighting (IDW) and Rain Simulator.

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo, a consecuencia de la erosión, afecta su fertilidad y en última instancia la producción de los cultivos. A pesar de que esta afirmación es de conocimiento general, son escasos los estudios disponibles que cuantifican la susceptibilidad y pérdida potencial de los suelos. En Colombia y zonas tropicales se ve reflejada la variabilidad climática con los fenómenos de La Niña y El Niño, como lo menciona Jaramillo y Arcila (2009). Estos eventos son naturales y se caracterizan por el incremento de las lluvias en algunas regiones y disminuciones en otras y viceversa en el fenómeno de El Niño, en consecuencia ambas se asocian con cambios en el brillo solar y en la temperatura.

Por otro lado Castillo (2004) menciona que la pérdida de suelo por erosión es ocasionada cuando la frecuencia de las lluvias es alta, estas impactan la superficie del suelo sin cobertura. En este mismo sentido Sagredo (2005) menciona que los índices máximos de pérdidas de suelo por erosión se producen básicamente por el uso y manejo inadecuado que dejan desprotegido el suelo lo que conlleva al desgaste permanente de la capa orgánica causando pérdida de productividad e incremento en los costos de producción en el cultivo de café (Rivera, 1999).

En Colombia, según (Leihner *et al.*, 1997) es determinado la erodabilidad (Factor k) que es la susceptibilidad a la erosión, la cual se determina de forma indirecta a partir de modelos y métodos empíricos, esta metodología también se ha utilizado en algunos suelos de la zona cafetera de los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda Rivera y Gómez (1991), además se han utilizado simuladores de lluvia para evaluar la resistencia relativa del suelo a la erosión, mediante diferentes metodologías que utilizaron Hincapié y Rivera (2003), lo cual ha permitido establecer diferentes categorías, desde suelos muy resistentes a la erosión (como aquellos derivados de cenizas volcánicas) hasta suelos altamente susceptibles (como los derivados de rocas sedimentarias).

La forma de cuantificar las pérdidas de suelo mediante modelo de USLE, utiliza los factores de erodabilidad, erosividad (Factor R) que es la capacidad de la lluvia de erosionar el suelo. La longitud y gradiente pendiente (Factor LS) son los parámetros topográficos del terreno que

tienen relación con las propiedades físicas de los suelos, coberturas vegetales y prácticas de conservación (Wischmeier, WH *et al.*, 1971).

En la actualidad para la región cafetera de Colombia se desconoce cuánta es la pérdida potencial de suelo por erosión, según el tipo de suelo. Esta información debe conocerse a escala regional o local, con el fin de diseñar las estrategias acordes a dichas condiciones, ya que en muchos casos la baja adopción de las prácticas de conservación, puede obedecer a recomendaciones generales que no corresponden con las condiciones ni necesidades de los productores.

Por lo anterior se plantea el objetivo de cuantificar las pérdidas de suelo por erosión mediante el uso de un SIG y utilizando herramientas de sensor remoto, en suelos de alta montaña de Colombia.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Gran parte de la caficultura de Colombia se encuentra en zona de ladera, con diferente parámetro morfológico y topográfico, donde debido a la necesidad de aumentar la productividad y rentabilidad se ha descuidado las prácticas de conservación provocando la degradación acelerada de los suelos por erosión hídrica. El 97 % de la erosión de los suelos es causada por la lluvia sobre el suelo libre de coberturas. La zona cafetera se caracteriza por estar determinada por lluvia intensas y agresivas (FEDERACAFÉ, 1975).

Los últimos estudios indican que la zona cafetera del departamento del Quindío está limitada por fenómeno de erosividad que es uno de los factores que participa en la degradación del suelo con algunos rangos clasificados como alto y muy alto con valores 7.500-15.000 MJ.mm.ha-1 (Lince, 2015). Por tal motivo se hace necesario cuantificar la degradación del suelo que es irreversible y el recurso suelo que no es renovable, toma gran importancia en zona cafetera, donde se cuenta con las pendientes altas en la zona montañosa, constituyéndose en un problema grave, que provoca una pérdida en la estructura del suelo, reduce permeabilidad, débil resistencia del subsuelo e inestabilidad de los agregados siendo estos altamente susceptibles a la erosión, amenazando la productividad agrícola y la calidad de los suelos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe determinar el riesgo por erosión potencial, mediante simulador de lluvia en la zona cafetera del departamento del Quindío, con el fin de identificar las zonas donde se deben empezar a intensificar las prácticas de conservación. Para tal fin, se propone el uso de la ecuación de Pérdida Universal de Suelo USLE/ RUSLE a través del manejo de herramientas SIG (Sistemas de información Geográfica), por medio de las cual se determinan los factores de erosividad, erodabilidad, topografía, los cuales componen la ecuación, representándolos por medio de índices. Considerándose entonces importantes para la toma de decisiones en las prácticas de manejo de suelos en los sistemas de producción o de conservación, y así contar con un producto indicador generado por la susceptibilidad.

2. . OBJETIVO GENERAL:

Generar mapa de riesgo por erosión potencial hídrica en la zona cafetera del departamento de Quindío.

2.1 Objetivos Específicos:

- Emplear la imagen AsterGDEM para calcular los factores de longitud de la pendiente y pendiente (LS).
- Estimar para los once suelos muestreados el factor de erodabilidad (K) mediante simulador de lluvia.
- Identificar zonas susceptibles a la erosión potencial por el método de la ecuación de USLE/ RUSLE para el departamento del Quindío.

3. JUSTIFICACIÓN

La determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en zona cafetera del departamento de Quindío, se convierte en una herramienta visual para identificar el deterioro del suelo a futuro, pudiendo cuantificar dichas pérdidas cuando no se establecen prácticas de conservación, mediante la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica para realizar un análisis complejo de la información relacionada con suelos, pendientes, erosividad, erodabilidad, indicando una erosión potencial y actual.

La información generada permite identificar y evaluar los factores más importantes que intervienen en el proceso de erosión hídrica, así como contribuir al desarrollo de prácticas que ayuden a la conservación del suelo para elaborar planes que orienten a un mejor uso y sistema de manejo de los suelos, buscando mitigar la infertilidad del suelo.

4. MARCO TEORICO

4.1 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 Inicio de la Erosión hídrica

El inicio de la erosión se define como el proceso que ocasiona la degradación del suelo. Dicho proceso se desarrolla como consecuencia de condiciones naturales tales como la lluvia y el viento o por condiciones inducidas por el hombre producto de las malas prácticas socio-económicas que desarrolla (Morgan, 1997).

4.1.2 Mecanismos y factores de la erosión.

La cantidad de partículas que son desprendidas del suelo por el impacto de las gotas de lluvia depende del umbral de resistencia que ejerce el suelo a ser erodado por el impacto de las gotas al caer, obedeciendo a la capacidad que tiene el agua de llevar un cierto tamaño de partículas proporcional a la magnitud de la velocidad (Hairsine and Rose, 1991, citado por Lal, 2001).

Según Horton (1945) los procesos relacionados con la erosión del suelo son la pérdida de material por el salpiqueo de las gotas de lluvia, transporte o remoción del material erodado por la lámina de agua y la depositación del material transportado o sedimentación.

A este concepto Lal (2001) concluye que el trabajo erosivo requiere cierta cantidad de energía y según el tipo de energía utilizada se determina la clase de erosión. A partir del inicio de la erosión del suelo se pueden presentar canales por fuerza y el flujo de agua constante hasta convertirse en cárcavas.

El efecto combinado de las tres etapas se expresa en términos de peso o volumen por unidad de superficie y tiempo ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), es el valor que se conoce como erosión anual. Esta erosión afecta el 40 % de los suelos Colombianos con vocación agrícola lo cual reduce la producción

en los cultivos (Olmos y Montenegro, 1987)

4.1.3 Tipos de erosión hídrica.

Según Suárez (2001), la erosión hídrica se divide en tres tipos que se denominan: Laminar, en surcos y cárcavas.

- **Erosión laminar**

La erosión laminar consiste en la dispersión de partículas de suelo y posteriormente son arrastradas por flujos de agua en distintas direcciones de la pendiente.

Las áreas de cultivos de ciclos cortos son susceptibles a la erosión laminar al igual que los suelos desprotegidos de cobertura vegetal.

- **Erosión en surcos**

Son la formación de canales paralelos irregulares concentrando el flujo de agua preferencial y la parte superficial del suelo. Este tipo de erosión puede ser controlada mediante retenedores de sedimentos. De lo contrario si no se reduce la velocidad puede llegar a un estado más avanzado como lo es la cárcava.

- **Erosión en cárcavas.**

La concentración de grandes volúmenes de agua y la caída del agua en forma de cascada, genera socavamiento y pérdida de grandes masas de suelo ampliando canales muy profundos con cambios bruscos en la pendiente

4.2 ANTECEDENTES

4.2.1 Investigaciones sobre pérdida de suelo por erosión en zona cafetera de colombiana

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia desde 1946 viene realizando una serie de investigaciones sobre la erosión de los suelos y presentan algunas de éstas que se consideran importantes para el presente estudio.

En el año 1982 se llevó acabo en la Federación Nacional de Cafeteros varios trabajos con el fin determinar las pérdidas de suelo por erosión en cultivos de semibosque (café), densos (caña y pastos y limpio (yuca y piña) establecidos en suelos de la consociación Chinchiná (*Melanudands*), con pendientes de 60%, bajo diferentes sistemas de manejo. Se encontró que el uso (tipo de cultivo) y el manejo tienen que ver con las pérdidas mayores y menores de suelo por erosión. Siendo entre más denso el cultivo y con menos desyerbas presentan menor erosión. Mientras que en los suelos limpios se presentaron las mayores pérdidas de suelo con valores ($3,52 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) denominada como media, seguido por el cultivo de café ($2,84 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) como baja. Las pérdidas menores promedio fueron para el tratamiento con caña con valores ($0,45 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) como natural (Federación Nacional de Cafeteros, 1982).

4.2.2 Sistemas de producción de café y erosión de los suelos.

Cenicafé viene ensayando diferentes sistemas de manejo del cultivo de café, buscando disminuir las pérdidas de suelo por erosión con prácticas de conservación y desyerba con machete, sin que se afecte la producción del mismo. Donde observaron que en cultivos de café a la sombra presentan las pérdidas menores de suelo por erosión debido a que cuenta con prácticas de conservación y las mayores pérdidas se presentan cuando no existen prácticas de conservación y la desyerba se hace con azadón.

- **Longitud y grado de pendiente.**

La longitud y grado de la pendiente del terreno, tiene un efecto importante en las pérdidas de suelo por erosión. Cuando la longitud de la pendiente permanece constante (20m) y se duplica el grado de la misma, la erosión se aumenta y de igual forma el grado permanece constante y se duplica la longitud de la pendiente la erosión aumenta.

Según (Gómez, 1990) con el manejo integrado de arvenses (manual, mecánico, químico), ha reducido las pérdidas de suelo por erosión a niveles cercanos a $1 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, sin disminuciones de producción.

Federación Nacional de Cafeteros (2003) realizó validación del factor de erodabilidad en suelos de la Unidad Chinchiná (*Melanundands*), mediante el uso de simulador de lluvias en campo laboratorio el factor erodabilidad entre surcos (Ki-WEPP). Con una intensidad de lluvia de 100 mm.h^{-1} durante 1 hora. Donde en campo se separaron y fueron clasificadas por tamaños de agregados: 2-1, 1-0,5 y $<0,5\text{mm}$. En contrarón correlación del factor erodabilidad determinado en campo y laboratorio. El factor Ki-WEPP determinado en campo varió entre 107.519 a $159.425 \text{ kg.s.m}^{-4}$; en laboratorio osciló entre $90.814 \text{ kg.s.m}^{-4}$ y $2.496.129 \text{ kg.s.m}^{-4}$. Los valores de Ki más bajos se presentaron en laboratorio para los agregados de 2-1 mm y los mayores en las muestras con agregados $<0,5\text{mm}$ de diámetro promedio. (Hincapié y Rivera, 2003).

En otros estudios realizados por Cenicafé, (Ramírez *et al.*, 2009) en la región cafetera colombiana, se presentan graves problemas de erosión, donde la lluvia es el principal agente natural causante de éstos, la cual es favorecida por las pendientes Fuertes de longitudes largas y por el manejo inadecuado del suelo.

El objetivo de este trabajo es caracterizar las zonas de acuerdo a la erosión potencial, como una herramienta de planificación y así contribuir con la sostenibilidad de los recursos Para ello se empleó la ecuación universal de pérdida de suelo con modificaciones, utilizando el análisis multiplicativo de los factores Erosividad (R), Erodabilidad (K), Longitud y Gradiente de la pendiente (L y S). La Erosividad se determinó mediante el Índice de Erosividad EI_{30} calculado

a partir del índice de Fournier modificado y especializados mediante interpolación Kriging. La Erodabilidad se determinó en forma directa en condiciones de laboratorio; para ello se tomaron muestras disturbadas de 14 unidades de suelo mapificadas dentro del área de estudio.

4.2.3 Ecuaciones para el cálculo de pérdidas de suelos por erosión

En el principio las fórmulas matemáticas que buscaban describir una forma de degradación del suelo por erosión hídrica, y para determinar la tasa media anual de pérdida de suelo, para ellos, se deben conocer.

Cook, 1936 menciona los tres factores que tienen influencia directa e indirecta con la erosión de los suelos.

- 1) La erodabilidad del suelo es la susceptibilidad del suelo a la erosión por lluvia.
- 2) La agresividad que es el potencial erosivo de la lluvia y la escorrentía, que está influenciado por el grado y longitud de la pendiente.
- 3) Cobertura vegetal que interseca el impacto de la gota de lluvia.

La primera ecuación para calcular la pérdida de suelo en campo la publicó Zingg (1940) estableciendo solamente la importancia de la pendiente y su longitud. Posteriormente se incorporaron los factores de manejo de cultivo, prácticas de conservación, erodabilidad del suelo. Hasta 1965 con la ecuación desarrollada por Wischmeier and Smith (1965), se dieron una serie de propuestas de ecuaciones que llegaron a incluir hasta nueve factores.

4.2.4 Estimación de las pérdidas de suelo por erosión.

Con el fin de predecir los niveles de erosión causada por el agua, se han desarrollado numerosos modelos, unos simples y otros muy complejos, los cuales son herramientas fundamentales para la planificación del uso y manejo de los suelos a nivel de finca, microcuenca, cuenca, región o país (Ramírez, 2007).

Entre los modelos específicos de pérdida de suelo destaca la ecuación universal de pérdida de suelo, USLE, basada en medidas realizadas durante más de cuarenta años por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Aunque de carácter eminentemente práctico y simplificador, resume la amplia información adquirida durante esos años y a pesar de la difícil extrapolación de algunos de sus parámetros ha sido usado con éxito en numerosas partes del mundo. Al mismo tiempo el modelo ha ido actualizándose, mejorando la definición de muchos parámetros y adaptando nuevas tecnologías como el laboreo de conservación. En la actualidad el propio Departamento de Agricultura de Estados Unidos patrocina una nueva versión de la ecuación, denominada la ecuación revisada RUSLE en sus iniciales inglesas, y otro más complejo conocido por WEPP (The Water Erosion Prediction Project) (Carvajal y Giráldez, 2000).

Figuroa 1975, en México a modo de validación de la EUPS y desde entonces esta herramienta se ha convertido en una de las principales, en México, para determinar el proceso de pérdida de suelo. Pando *et al.* (2003) menciona que a través de métodos directos se han estimado valores de erosión, con valor de 13,5 ton/ha/año mientras que por métodos indirectos, como la EUPS, la erosión ronda los 492 ton/ha/año.

En zonas de Veracruz se han estimado valores de erosión de hasta 568 ton/ha/año con métodos empíricos para zonas donde la pendiente aproximada es de 25 %. Sin embargo existen otros trabajos en donde se obtuvieron valores de erosión menores a través de métodos empíricos que por medición directa. En general, la medición directa siempre será lo más recomendable para determinar el comportamiento de una variable, sin embargo esto implica grandes sumas de dinero y aumenta el tiempo de ejecución de un estudio.

Para la obtención de resultados más certeros a través de métodos empíricos es de importancia la calidad de las bases de datos que alimentarán el modelo. Donde se calcula la erosión hídrica como uno de los principales pasos para determinar la degradación. Se basa en el método empírico de la EUPS/RUSLE para el cálculo de la erosión hídrica actual y potencial, utilizando bases de datos nacionales para alimentar el modelo. Los cálculos se efectúan en plataformas de

sistemas de información geográficas (SIG) y tecnologías de información geográficas con base en el módulo Raster Calculator y Slope, mientras que el procesamiento de la imagen satelital para determinar la cobertura vegetal.

5. Metodología

5.1 Área de estudio.

El Departamento del Quindío está ubicado en la parte centro-occidental del país; 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.

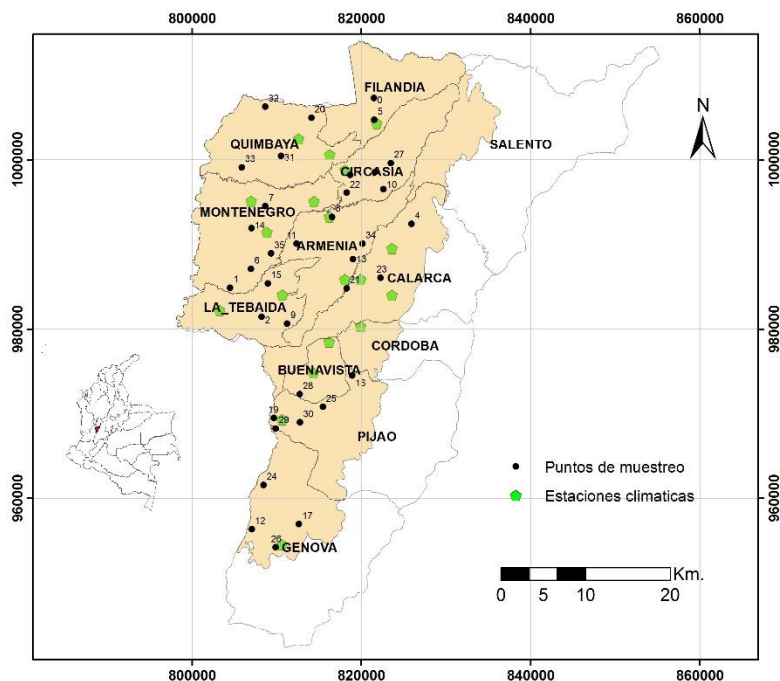


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, muestreo y estaciones climáticas

Fuente propia

5.2 Procesamiento

En el procesamiento se seleccionaron suelos desarrollados bajo distintas condiciones climáticas a lo largo de gradientes, para cada sitio se identificó el materiales parentales de los suelo, teniendo en cuenta los sitios por rangos altitudinales (1200 m a 1400 m – 1400 m a 1600 m y 1600 m a 1800 m, sembrados con cultivos de café.

Se elaboró un mapa de muestreo identificando once unidades de suelos representativas de la zona de estudio, luego se procedió a realizar un muestreo aleatorio simple en once unidades más representativas distribuida de la siguiente forma: la 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.

En la Tabla 1 se muestran los sitios de muestreo y las Unidades de suelos, según la metodología establecida.

5.2.1 Unidades de suelo

Tabla 1. Localización de puntos de muestreo y unidad de suelo a la que pertenecen

Finca	Municipio	Vereda	Altitud (m)	Unidad Suelo
La Julia	Circasia	Naranjal	1474	Quindío
El Mango	Circasia	La Pradera	1349	Montenegro
La Ilusión	Circasia	Pinares	1400	Chinchiná

Finca	Municipio	Vereda	Altitud (m)	Unidad Suelo
La Primavera	Circasia	La Pola	1548	Quindío
Buenos Aires	Circasia	La Pola	1610	Quindío
Cocora	Montenegro	Calle Larga	1200	Montenegro
Brisas del pacífico	Montenegro	Naranjal	1219	Montenegro
Singapur	Montenegro	El Guaico	1088	Sedimentario
La Gaviota	Montenegro	Platanillal	1247	Montenegro
La Marina	Montenegro	El Prado	1224	Montenegro
Camaral	Armenia	La Revancha	1197	Montenegro
San Antonio	Armenia	El Meson	1293	Montenegro
Galicia	Armenia	El Caimo	1330	Quindío
La Esperanza	Armenia	San Pedro	1409	Quindío
La Floresta	Calarcá	La Floresta	1480	Quindío
El Prado	Calarcá	Potosi	1311	Montenegro
La Albania	Calarcá	La Albania	1250	La Concha
El Placer	Quimbaya	Guaymaral	1240	Malabar
La Sarana	Quimbaya	La Mesa	1370	Chinchiná
Nazareth	Quimbaya	El chaquiro	1250	Chinchiná

Finca	Municipio	Vereda	Altitud (m)	Unidad Suelo
La Paloma	Quimbaya	El Laurel	1186	Malabar
Buenos Aires	Filandia	Buenavista	1751	Filandia
La Esperanza	Filandia	Fachadas	1655	Filandia
La Castañuela	La tebaida	Padilla	1177	Montenegro
La Ceiba	La tebaida	El Cinco	1162	Montenegro
Palo Negro	La tebaida	La Primavera	1145	Montenegro
Bajo puerto colón	Pijao	La Mina	1489	Patiobonito
El porvenir	Pijao	Los Juanes	1625	Patiobonito
La marina	Pijao	Cañaveral	1291	Buenavista
Jamaica	Pijao	Barragán	1100	Aluvial
La Esperanza	Buenavista	Los Juanes	1176	Buenavista
La Perla	Génova	La Topacia	1300	Génova
El Naranjo	Génova	El Dorado	1877	Génova
Santa Ana	Génova	La Primavera	1800	Génova
Alto Bonito	Génova	San Juan	1876	Génova
Nubia y Cuchilla	Génova	Cumaral	1778	Génova

Fuente Lince 2015

5.3.1 Fase I. Campo.

Como se observa en la Figura 2 donde se recolectaron 40 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.

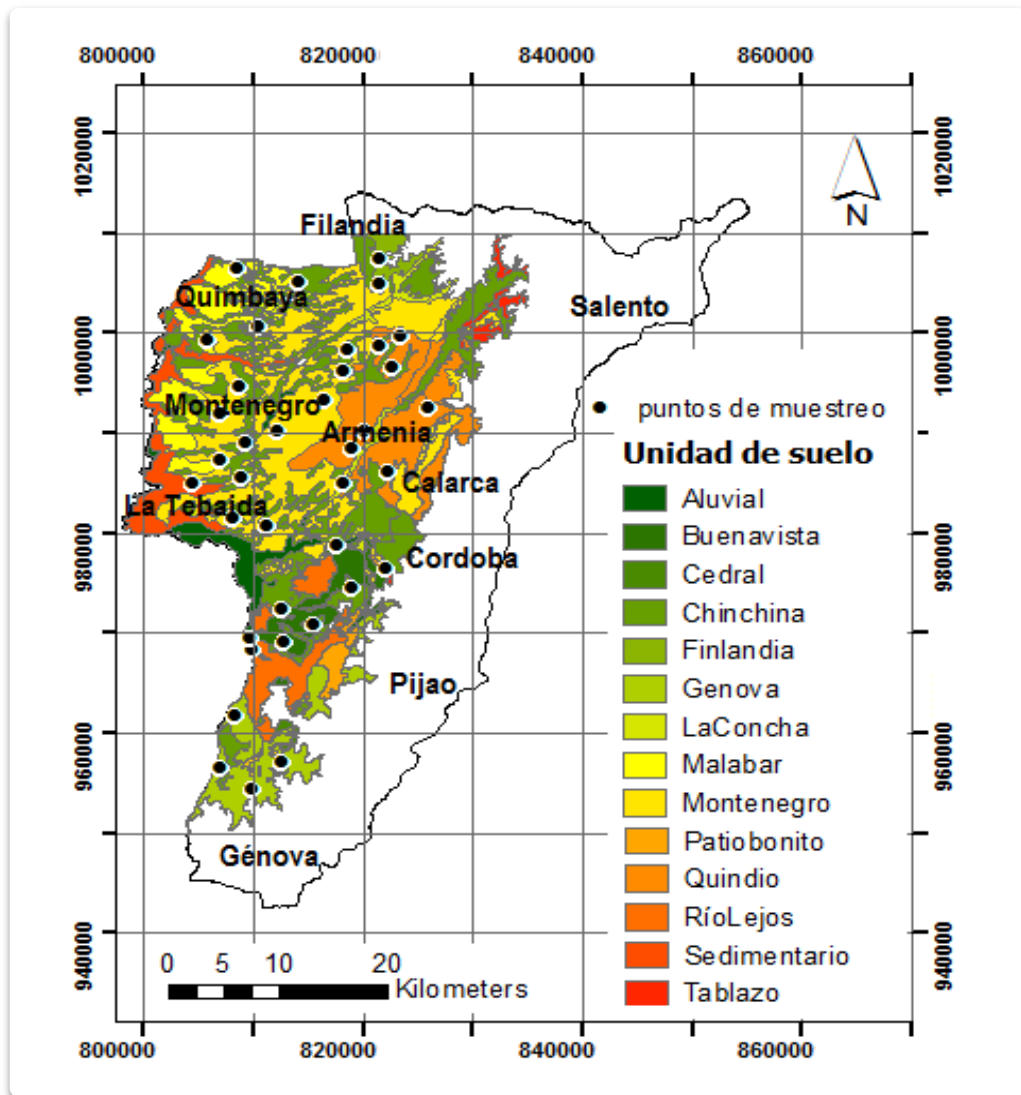


Figura 2. Mapa de unidades de suelos de la región cafetera del departamento de Quindío y puntos de muestreo.

Fuente propia

5.4 Fase II. Laboratorio.

5.4.1 Preparación muestras de suelo

La muestras fueron secadas al aire libre bajo sombra, se separó 1kg de suelo para análisis de propiedades físicas como densidad aparente, densidad real, estabilidad de agregados al agua, conductividad hidráulica, textura, retención de humedad a 33 kPa y 1500 kPa (capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente), y 1 kg para química materia orgánica. El suelo sobrante fue pasado por un tamiz con diámetro 11.2 mm, para ser utilizado en construcción de microparcels en el simulador de lluvias, donde se tuvo presente el porcentaje de humedad y la densidad aparente del suelo para calcular el volumen de suelo que va dentro de las microparcels.

5.4.2 Variables determinadas

En la Tabla 2. Se presentan las variables analizadas.

Tabla 2. Propiedades físicas.

PROPIEDADES FÍSICAS EN LABORATORIO		MÉTODO DE DETERMINACIÓN
Propiedades volumétricas:	Densidad aparente (Da)	Método del cilindro
	Densidad real (Dr)	Método del picnómetro
Conductividad hidráulica		Permeámetro de carga constante
La estabilidad de agregados en húmedo		Método de yoder

Fuente propia

- **Densidad aparente.**

Se realizó por el método de cilindro biselado con unas dimensiones de 5 cm de diámetro interno y 5 cm de altura donde se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo,

Se ejecutaron 5 repeticiones para obtener un valor representativo. Seleccionó la superficie de suelo a muestrear de forma vertical. Se introduce el barreno de núcleo con el cilindro, teniendo cuidado de no compactar el suelo y tener un volumen conocido con la estructura de campo. Se procedió a sellar herméticamente el cilindro para que no haya pérdida de humedad, y se pesan.

Se determinó mediante la fórmula

$$D_a = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde,

D_a = es la densidad aparente, g/cm³ o Mg cm⁻³

M_{ss} = es la masa del suelo seca a 105 °C, g.

V_c = es el volumen del cilindro donde se tomó la muestra de suelo, cm³ o Mg.

La muestra se lleva a secar en estufa (110° C) durante 24 horas o hasta peso constante, y determino la humedad. También, se estableció el volumen del cilindro midiendo el diámetro y la altura del mismo (medidas internas). Se expresa en megagramos por metro cúbico (Mg m⁻³). La muestra tomada depende del orden de la fracción sólida y se ve afectada por la textura, estructura, contenido de materia orgánica, su humedad (en especial suelos con materiales expansivos) y su grado de compactación, principalmente. Se determinó mediante el método de los cilindros cortos (Klute 1986).

- **Densidad real**

Se realizó por el método del picnómetro para ello hay que tener presente que el aire debe ser eliminado del sistema, razón por la cual debe efectuarse bajo condiciones de vacío; esta condición hace que el método sea un poco dispendioso y lento según Montenegro y Malagón (1990).

$$\frac{(M_{pss}-M_{pv})D_w}{M_{pw}-M_{pv})-(M_{pssw}-M_{pss})} \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde;

D_r = es la densidad real de las partículas o densidad específica, g/cm^{-3} .

M_{pss} =es la masa del picnómetro más suelos seco a 105 °C, g.

M_{pv} = es la masa del picnómetro vacío y seco.

M_{pw} = es la masa de picnómetro más agua.

M_{pssw} es la masa del agua más suelo seco.

D_w =es la densidad del agua.

- **Conductividad hidráulica**

Se realizó por método de permeámetro de carga constante donde La conductividad hidráulica del suelo se determina, en laboratorio, midiendo el tiempo que gasta en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna de él, saturado con agua previamente durante 24 horas por ascenso del agua por capilaridad en cada una de las muestras; para hacer esta prueba se utilizan los permeámetros, para este caso fueron de cabeza constante Motta *et al* (1990)

$$k_{sat} = \frac{V}{tA} \times \frac{L}{H} \quad \text{Ecuación (3)}$$

K_{sat} = conductividad hidráulica saturada, $cm\ h^{-1}$.

V = volumen total del agua que pasó a través del cilindro, cm^{-3} .

t =tiempo total empleado en la prueba, min.

A = área transversal interna del cilindro, cm^2

L = longitud de la columna del suelos, cm.

H =longitud de la columna del agua, cm.

- **Caracterización de la estabilidad estructural del suelo.**

Se utilizó con el fin de cuantificar la estabilidad estructural del suelo. Para dicha característica se han diseñado varios métodos como por ejemplo el de Yoder y el de Henin, pero en el presente trabajo se optó por el de Yoder orientados principalmente a medir la resistencia de los agregados frente a la acción del agua; los tamaños de los agregados que se tomen para hacer las interpretaciones varían según las aplicaciones que se vayan a hacer. (Carter, 1993).

Se toma una muestra de suelo sin disturbar de unos 100 g, se criba en un tamiz con abertura de 6,3 mm y la parte de la muestra que pasa a través del tamiz se recoge; se toma una submuestra del material que pasa a través del tamiz y se le determina el contenido de humedad gravimétrica que posee [W (%)], utilizando la siguiente formula.

$$W = \frac{P_{ss} - P_{sh}}{P_{ss}} \times 100 \% \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde,

W = es el porcentaje de humedad de la muestra, %.

P_{ss} = es el peso seco de la muestra, g.

P_{sh} = es el peso de la muestras humedad, g.

Con esta información se hace la corrección de humedad para establecer el peso seco de la muestra tomada para hacer el análisis, de la manera; la muestra se coloca en un equipo Daiki y se ensambla un juego de cinco tamices con \emptyset de 2 mm a 0,106 mm de tamaño de abertura;

Humedeciéndolo con un atomizador y luego dejándolo que se sature lentamente, por capilaridad, durante unos 15 minutos, para evitar la explosión de agregados por presión de aire atrapado en los poros. Ø Se coloca el juego de tamices con la muestra saturada en el equipo de Yoder, sumergiéndolos dentro del agua en el recipiente cilíndrico, hasta que los hilos del tamiz superior queden a ras con el nivel del agua, cuando el aparato se encuentre en su punto más alto de funcionamiento. Ø Se pone a funcionar el equipo por 30 minutos, a un ritmo de 2 ciclos por segundo, al cabo de los cuales se retiran los tamices, se dejan escurrir por 5 minutos, se traslada su contenido a recipientes adecuados y se ponen a secar en horno a 105 o C, durante 24 a 36 horas, para luego pesar los agregados secos que quedaron retenidos en cada uno de los tamices. Ø Se calcula la cantidad de agregados que quedaron en cada tamiz en porcentaje, con respecto a la cantidad inicial de muestra utilizada.

$$\% \text{ Retenido en el tamiz} = \frac{\text{Peso suelo retenido en el tamiz}}{\text{Pss}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

donde,

Pss = es peso de la muestra seca al horno a 105 °C.

Según Kemper y Chepil (1965) Para calcular el DPM.

$$\text{DPM} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \frac{W_i}{100} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde,

DPM: Diámetro Ponderado Medio.

X_i : Diámetro promedio de la fracción de tamaño correspondiente.

W_i : Porcentaje por peso de la respectiva fracción de agregados de un determinado rango de tamaño (debe trabajarse dividido por 100). Y para calcular IE, González (1987)

$$\text{IE} = \frac{W_2+W_4+W_4\dots W_n}{W_1+W_n} \times 100\% \quad \text{Ecuación (7)}$$

donde,

IE: es el Índice de Estructura.

W 1: es el % de agregados estables con diámetro > 2 mm.

W_n: es el % de agregados estables con diámetro < 0.25 mm.

W 2, W 3, W 4, ...: % de agregados estables en cada uno de los rangos de tamaño utilizados. En la determinación, comprendidos entre 2 y 0.25 mm de diámetro.

Con la información recogida se pueden calcular varios índices que sirven para caracterizar la estabilidad de la estructura del suelo analizado.

DPM: es el diámetro ponderado medio de los agregados del suelo

IE: es el índice de estructura de los agregados del suelo

AE: la suma de agregados del suelo 0,25 mm de Ø.

AF: el contenido de agregados finos del suelo, es decir, menores a 0.5 mm de diámetro.

- **La determinación de humedad a diferentes tensiones**

Se realizó por medio de un equipo llamado Olla y membrana de presión con las que se calculó capacidad de campo (CC) y a punto de marchitez permanente (PMP), fueron (0.3 y 15 bares) con la metodología del laboratorio de física de suelos Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) encargado de los respectivos análisis.

- **Granulometría se determinó por el método del hidrómetro o bouyoucos.**

Para establecer la textura del suelo por este método se pesan 25 g de suelo, cernido por tamiz de 2 mm y seco al aire. Se coloca el suelo en el vaso de una batidora (Hamilton Beach Scovill), se le agregan 30 ml de dispersante y se bate durante 10 minutos.

Se transfiere la suspensión anterior a un cilindro graduado de 1130 ml, se lava el vaso con agua destilada y se completa el volumen del cilindro. Se agita la suspensión unas 10 veces, vigorosamente, con un émbolo de caucho y se deja reposar, tomando registro del tiempo a

partir del momento en que se retire el émbolo. A los 40 s de reposo se hace la primera lectura con el hidrómetro apuntando, además, la temperatura de la suspensión; con esta lectura se calcula el contenido de arena (A%) con la Fórmula

$$A(\%) = 10 - \left(\frac{\text{Lectura corregida 40s}}{\text{peso muestra}} \times 100 \right) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Al terminar la lectura de los 40 s, se retira el hidrómetro y se deja en reposo la suspensión hasta completar 2 horas. Al cabo de éstas, se introduce nuevamente el hidrómetro y se hace otra lectura; se toma también la temperatura; con esta lectura se calcula el contenido de arcilla (Ar%), utilizando la Fórmula.

$$Ar(\%) = \left(\frac{\text{Lectura corregida 2h}}{\text{peso muestra}} \times 100 \right) \quad \text{Ecuación (9)}$$

A continuación, se calcula el contenido de limo (L%) con la Fórmula

$$L(\%) = 100 - [(A(\%) + Ar(\%))] \quad \text{Ecuación (10)}$$

Los porcentajes obtenidos se llevan al triángulo textural Figura 3 y se define la clase textural

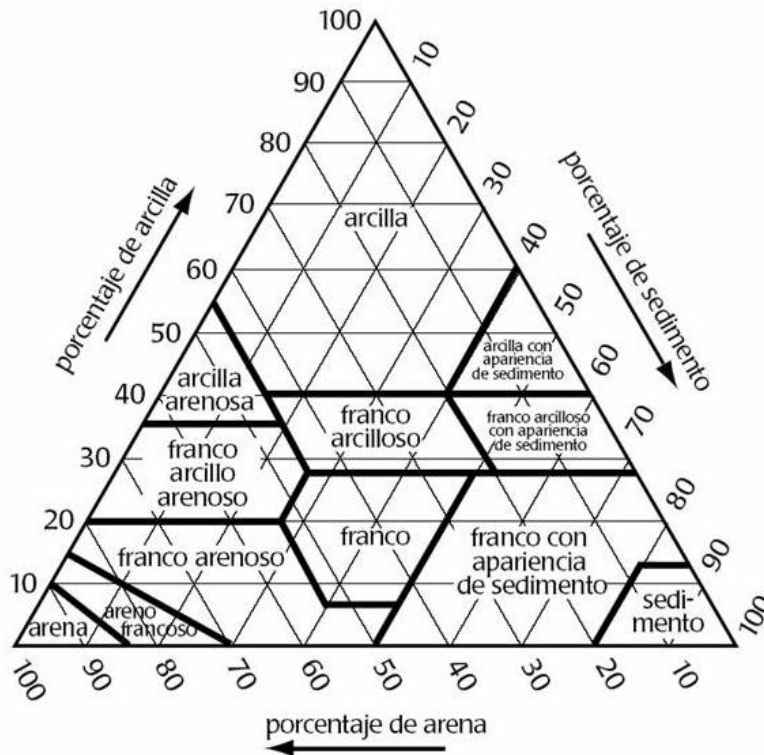


Figura 3. Triángulo de textura

Fuente <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm#anchor618597>

5.5 Determinación del factor k utilizando modelos matemáticos de predicción de pérdida de USLE mediante el simulador de lluvias

5.5.1 Descripción del procedimiento en el simulador de lluvia.

Las principales ventajas de determinar el factor K de erodabilidad del suelos con simuladores de lluvia en condiciones laboratorio es forma rápida y sencilla y a muy bajo costo de las pruebas (Lal, 1988). La erodabilidad entre surcos puede ser medida en el campo o en laboratorio con el uso de simuladores de lluvia. El tamaño de las parcelas debe estar limitado por debajo de 1 m², para asegurar que solamente la erodabilidad entre surcos está ocurriendo.

Para cada muestra de suelo, se simuló la lluvia con una duración de una hora y se realizaron las siguientes determinaciones:

- Distribución del flujo de agua por escorrentía y percolación. Se colectaron las aguas de escorrentía y percolación durante el tiempo de duración de la lluvia simulada. Para ello, se colocaron recipientes plásticos en la salida de los canales de escorrentía y percolación, respectivamente, y se midió el volumen de agua en probetas. Estos valores se expresaron como lámina de agua en cm.h^{-1} .
- Pérdidas de suelo por escorrentía. Se determinaron la cantidad de suelo contenido en cada una de las muestras de la escorrentía y el suelo depositado en el canal que no fue arrastrado hasta el recipiente por el flujo de escorrentía. Las muestras se secaron en estufa a 105°C durante 24 horas. Se estimó la cantidad de suelo seco perdido por escorrentía en kg.m^{-2} .
- Pérdidas de suelo por salpique en canal lateral y a favor de la pendiente. Se determinaron las pérdidas de suelo por salpique de los agregados, debido al impacto de las gotas de lluvia durante una hora. Se recolectó el suelo depositado en los canales laterales que rodearon la bandeja, lo mismo que el suelo adherido a las paredes del protector metálico o cubierta que bordeaba la bandeja. Las muestras se secaron en estufa a 105°C durante 48 horas, posteriormente se estimó el suelo perdido por salpique en kg.m^{-2} .
- Los factores L y S se mantuvieron constantes para todas las muestras, por lo tanto, no se incluyeron para estimar el factor K; los factores C y P se asumieron como 1, ya que las determinaciones se realizaron con suelo totalmente desnudo y sin prácticas de conservación.

El valor K estimado, se representó espacialmente de acuerdo con las coordenadas determinadas con GPS.

5.5.2 Características de simulador de lluvias

El equipo para determinar el factor de erodabilidad (k) es del tipo Purdue Programable, que cuenta con Boquilla Vee-Jet 80 – 100; el cual se calibro con una precipitación de 82 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

5.5.3 Calibración del Simulador de lluvias

Antes de las pruebas del simulador lluvias se calibró con una intensidad de 82 mm.h^{-1} a una presión constante de 8 PSI, en laboratorio.

Como se muestra en la Figura 4 Se procedió a colocar 9 recipientes debajo del soporte de la boquillas del simulador con una separación de 50cm cada uno formando una cuadrícula, luego se dejó funcionar el equipo durante 10 min y se midió el agua recogida en cada uno de los recipientes, esta operación se realizó 6 veces, mediante la fórmula se calculó mm.h^{-1} .

Área de captación:

$$A = \pi r^2 \quad \text{Ecuación (11)}$$

Radio del recipiente: 11,5 cm

Por lo tanto: $A = 415,47 \text{ cm}^2$

Donde se recolectaron 572 cm^3 en 10 min (3432 cm^3 en 1 hora)

Entonces, Intensidad es igual a:

$I = \text{Volumen recolectado (cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}) / \text{Área de captación (cm}^2)$: $I = 3432 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} / 415,47 \text{ cm}^2 = 8,26 \text{ cm.h}^{-1}$

$8,26 \text{ cm.h}^{-1}$ por 10 minutos = $82,6 \text{ cm.h}^{-1}$



Figura 4. Calibración de simulador de lluvia.

Fuente Propia

Una vez calibrado el simulador se procedió a colocar una muestra de la unidad de suelo muestreada y determinar de la distribución del flujo de agua en cada uno de los suelos estudiados se recolectó flujo de agua escorrentía, distribución de flujo de agua percolada, y se midió el volumen en una probeta con intervalos de 20 min durante 1 hora.

5.5.4 Cálculo para determinar la lluvia efectiva

Es el agua lluvia que cae dentro de la microparcels de esorrentía, pero se debe conocer el área de la microparcels de esorrentía

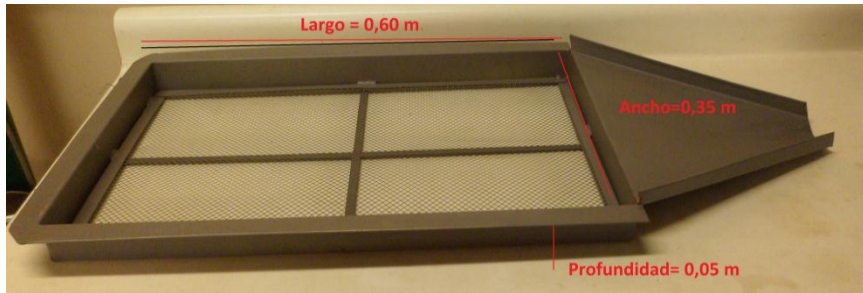


Figura 5. Dimensiones de microparcels o bandeja.

Fuente propia

$$\text{Área de la bandeja} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \text{ cm}^2 \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\text{Área de la bandeja o microparcels esorrentía} = (35 \times 60) \text{ cm}^2 = 2100 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la bandeja o microparcels esorrentía} = (0.35 \times 0.60) \text{ m}^2 = 0.21 \text{ m}^2$$

Se pasa a metros cuadrados

$$\text{El volumen de lluvia efectiva en la microparcels de esorrentía} = 82.6 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1} \times 0.21 \text{ m}^2 = 17.346 \text{ L.h}^{-1}$$

La lluvia efectiva en lámina cm.h^{-1} = lluvia efectiva se pasa a cm^3 y esta se divide por el área en metros cuadrados y esta se multiplica $10000 \text{ cm}^2/$ que equivale a 1 m^2 .

5.5.5 Determinación del índice de erodabilidad K con ecuación de (USLE) en simulador de lluvia.

La determinación del índice de erodabilidad se realizó usando la metodología propuesta por **Wischmeier y Smith (1978)**, con base en la erosividad de las lluvias (R) y la pérdida de suelo por erosión (A) en $\text{tonha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en el agua de esorrentía proveniente de lluvia simulada. La

erosión potencial de un suelo, es igual a la erosividad (R) multiplicada la erodabilidad (K), considerando los demás factores de la Ecuación Universal de Erosión iguales a 1, correspondiente a su valor máximo (Hudson, 1982).

5.5.6 Esquema de la prueba simulación de lluvias para cálculo de factor K de erodabilidad

Como se observa en la **Figura 6**, donde se muestra los procesos que se llevan a cabo en el simulador de lluvia.

Descripción para construir las microparcels o bandejas:

- a). Filtro: Capa de Arena gruesa con diámetro de 6,3 mm
- b) Microparcelsa con capa de arena 3 cm de espesor más capa de Tela de muselina.
- c) Microparcelsas con capa de suelo, previamente pasado por tamiz con diámetro de 11,2 mm según la densidad aparente.
- d) posición de las microparcelsas con su cubierta de 54 cm de altura con el fin de recolectar las pérdidas por dispersión de agregados por la lluvia, y con líneas blancas la pendiente representativa de la ladera colombiana.
- e) Procesos de recolección de pérdida de suelo por salpique o distribución de agregados en canal lateral, pérdida en canal de escorrentía, pérdida por arrastre de canal de escorrentía,
- f) Sedimentación de la pérdida de suelo recolectado en cada uno de los procesos.
- g) Pérdida suelo por percolación.
- h) Proceso de secado se colocaron en capsulas de aluminio y puestas a secar en estufa a 105 centígrados, durante 24 horas, para ser previamente pesadas en balanza analítica.

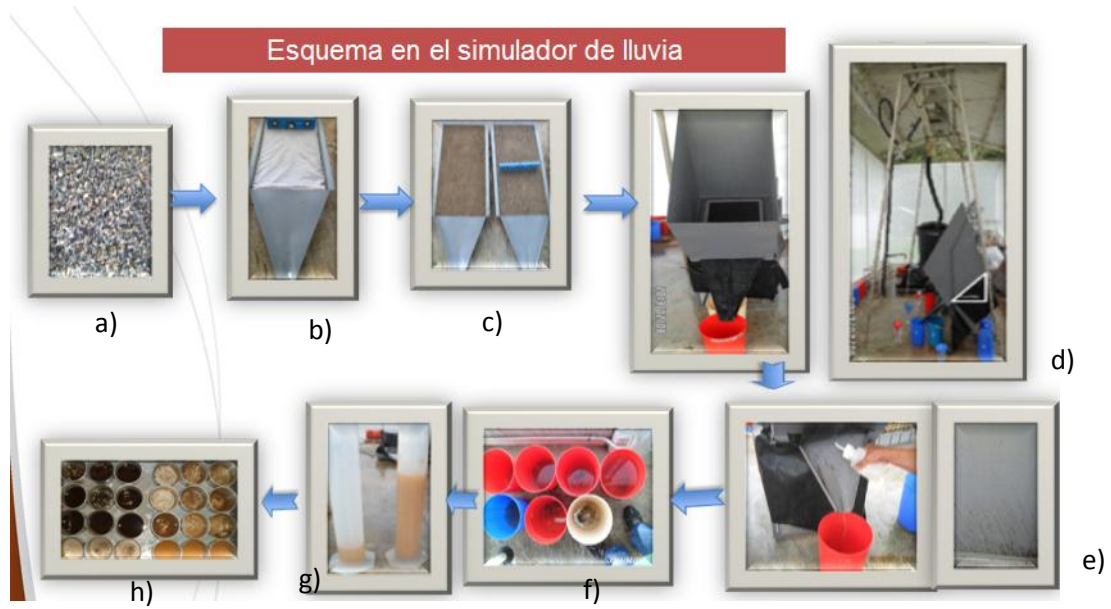


Figura 6. Esquema de procesos en simulador de lluvias

Fuente propia

5.5.7 Aplicación de las ecuaciones para la determinación del factor k de erodabilidad en la unidad de suelo

USLE y significado para calcular factor k de erodabilidad

$$A = R \times K \text{ despejando a } k$$

Ecuación (13)

$$k = \frac{A}{R}$$

Ecuación (14)

donde:

A = Pérdida de suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}$

R = Índice de erosividad de las lluvias, en $MJ.mm.ha^{-1}\ .h^{-1}$

K = Índice de erodabilidad del suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}\ .MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$

$R = EI_{30}$ Según (Foster *et al.*, 1981) la energía cinética de la lluvia, E ($MJ\ ha^{-1}$) es igual a la energía cinética de la lluvia por unidad de lluvia, e ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$), multiplicada por la precipitación total (mm).

5.5.8 Calcular energía cinética

$$E = e \times Im, \text{ en } MJha^{-1} \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación (15)}$$

donde

$e = 0.119 + 0.0873 \times \text{LOG}_{10}(Im)$, en $MJha^{-1}\ mm^{-1}$

Im = Intensidad de la lluvia, en $mm\ h^{-1}$

5.5.9 Cálculo para Índice de Erosividad EI_{30}

Que es igual a R podemos despejar a K que es el Índice de erodabilidad del suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}\ .MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$

$$R = EI_{30} \quad \text{Ecuación (16)}$$

donde decimos

$EI_{30} = \text{Intensidad de la lluvia en 30 min} = 41.17\ mm\ \text{en } 30\ \text{min} \times 2 = 82.34\ mm.h^{-1}$

$EI_{30} = 23.565\ MJ\ ha^{-1} \times 82,34\ mm.h^{-1} = 1940.400$ este valor es igual (R) en el caso de precipitación de lluvia en el simulador con el fin de garantizar la precipitación calculada en 1 hora.

5.6.1 Cálculo para pérdida de suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}$

A = Pérdida de suelo, en $t\ ha^{-1}\ h^{-1}$ donde se deben tener en cuenta todas las pérdidas (Pérdida de suelo por escorrentía + pérdida de suelo por salpique o dispersión y pérdida de suelo en lengua frontal + pérdida de suelo depositado en canal de escorrentía.

$A = (0,0148 + 0,0400 + 0,0180) = 0,0728\ kg.m^{-2}$ pero hay que pasarlo a toneladas hectárea

Se hace una conversión de $kg.m^{-2}$ a $ton.ha^{-1}$

$0,0728\ kg.m^{-2} = (1\ ton/1000\ kg \times 10000\ m^2/1ha) = 0,728$ =se aproxima a $=0,73\ ton.ha^{-1}$

Como se halló **R** y **A** con sus respectivas unidades se remplaza en la fórmula en la siguiente fórmula para determinar **K**

5.6.2 Cálculo para hallar el Factor **K** $t\ .ha^{-1}\ h^{-1}\ MJ^{-1}$

$$K = A/EI_{30}, \text{ en } t\ ha^{-1}\ h^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1} \dots\dots\dots \text{Ecuación (17)}$$

$K = 0,73\ ton.ha^{-1}/1940.400\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1} = 0,000376\ 0\ \text{ó}\ 3,76\ 3\ exp\ 10^{-4}\ t\ .ha^{-1}\ h^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$
ha

Nota: Una vez se hallaron los valores en el simulador se procedió a introducirlos en un (SIG) en este caso se utilizó Arcgis 10.2

5.7 Recopilación de datos primarios para trabajar los sistemas de información geográfica.

Como mapa base se empleó una imagen **ASTER** (Global Digital Elevation Model –**GDEM**) en formato raster con un tamaño de píxel 30 m por 30 m. Dicha información geospacial 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 “Cenicafé” y los datos de erodabilidad mediante la utilización de un simulador de lluvia.

5.8 PROCEDIMIENTOS DEL DESARROLLO DE LA ECUACION USLE/RUSLE EN ARCGIS 10.2

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):

Factores de la ecuación de pérdida de suelo

$$A = (R) * (K) * (S. L) * (C * P)$$

5.8.1 Determinación de los factores

- **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 (2007) y Lince (2015), los cuales trabajan con índice de Fournier modificado (IMF) el cual corresponde al promedio mensual propuesto por Arnoldus, (1980). El índice de erosividad o capacidad de las lluvias de erosionar el suelo (EI_{30}), recomendado por Rivera (1991) (ver Ecuación 16 y 17) 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 de puntos dispersos en el área geográfica. El factor R utilizado fue de datos aportados en investigaciones anteriores para este departamento por Lince (2015).

Ecuación (18)

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

donde

IFM = Índice de Fournier modificado en mm.

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 (19)

$$\mathbf{EI}_{30} = \sum_{12}^1 30,4 (\mathbf{IMF}) + 28,3$$

donde,

EI₃₀ = Erosividad en MJ.mm.ha⁻¹

IMF = Índice modificado de Fournier (promedio mensual)

Para determinar la erosividad en el departamento del Quindío se contó con la información de 19 estaciones agroclimáticas 8 presentaron registros históricos completos de precipitación diaria por 15 años (1997 – 2011), 3 presentaron registros por 14 años, 1 por 13 años, 4 por 12 años, 3 por 11 años ver Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones agroclimáticas incluidas en el estudio y los años de los que se tomó el dato de precipitación diaria.

Estación	Municipio	LAT. (N)	LONG. (W)	ELEV.	Años
----------	-----------	----------	--------------	-------	------

Estación	Municipio	LAT. (N)		LONG. (W)		ELEV. (m)	Años	
		Gra.	Mín	Gra.	Mín		Total	periodos
El Agrado	Montenegro	04	31	75	48	1275	15	1997 - 2011
El Jardín	Calarcá	04	28	75	42	1300	11	1998, 2000 - 2002, 2005 - 2011
El Porvenir	Pijao	04	19	75	47	1470	15	1997 - 2011
La Alejandría	Génova	04	11	75	47	1600	12	1997 - 2000, 2003 - 2007, 2009 - 2011
La Argentina	La Tebaida	04	27	75	47	1200	14	1998 - 2011
La Bella	Calarcá	04	30	75	40	1449	15	1997 - 2011
La Esperanza	Buenavista	04	22	75	45	1428	12	1997 - 1998, 2000 - 2006, 2008 - 2011
La Esperanza	Filandia	04	38	75	41	1671	14	1997 - 2003, 2005 - 2011
La Ilusión	Circasia	04	35	75	43	1442	15	1997 - 2011
La Julia	Montenegro	04	33	75	45	1250	12	1997 - 1999, 2002 - 2003, 2005 - 2011
La Miranda	La Tebaida	04	26	75	51	1193	15	1997 - 2011

Estación	Municipio	LAT. (N)		LONG. (W)		ELEV.	Años	
La Pradera	Armenia	04	28	75	43	1350	13	1997 - 1998, 2000 - 2009, 2011
Maracay	Quimbaya	04	36	75	44	1402	15	1997 - 2011
Mónaco	Córdoba	04	25	75	42	1250	12	1997 - 2002, 2004 - 2005, 2008 - 2011
Paraguaicito	Buenavista	04	24	75	44	1203	11	1998, 2000 - 2002, 2005 - 2011
Quebradanegra	Calarcá	04	27	75	40	1500	11	1997 - 1998, 2000 - 2004, 2006, 2009 - 2011
Sorrento	Montenegro	04	33	75	49	1203	15	1997 - 2011
Tucumán	Armenia	04	32	75	44	1250	14	1998 - 2011
Vivero	Quimbaya	04	37	75	46	1330	15	1997 - 2011

Fuente Lince 2015

5.8.2 Análisis de distribución de los datos de las estaciones.

Según Lince 2015 el análisis de distribución en rangos de precipitaciones anuales de todas las estaciones durante los 15 años, se encontró que durante los años 1999, 2008, 2010 y 2011

fueron las máximas precipitaciones anuales y mayores valores de Erosividad, como se muestran en la Figura 7. De las estaciones la que mayor precipitación anual presentó fue Vivero (Quimbaya) con un total de 4173 mm en el año 2011, pero la que mayores precipitaciones registro en total fue Quebradanegra (Calarcá) y la de menores precipitaciones La Ilusión.

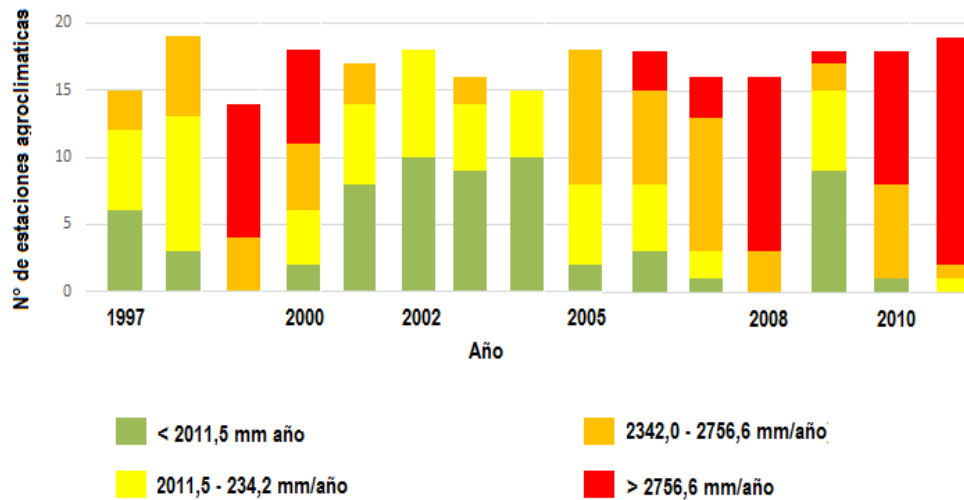


Figura 7. Clasificación de los registros de precipitación anual para las 19 estaciones agroclimáticas.

Fuente Lince 2015

- **El Factor (K) o Índice de Erodabilidad, según** (Figuroa *et al.* 1991) lo define como la susceptibilidad de un suelo a la erosión, este factor se realizó para las diez unidades de suelo, mediante el simulador de lluvia en el cual se cuantificó la pérdida de suelo arrastrado por escorrentía, salpique y deposito en canal y agua escorrentía e infiltrada. El suelo recolectado en cada prueba se dejó decantar durante 48 horas, secado en estufa a 105°C durante 48 h, luego pesados 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 y 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 y Quiñonez, 2000). Se

implementa el mapa de pendientes y se reclasifica, luego se procede para 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 en la (Ecuación 19 y 20)

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{3.0 (\sin \theta)^{0.8}+0.56} \quad \text{Ecuación (20)}$$

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_ β que en modelo lo nombramos como F por fines prácticos

- **Factor** = ((Sin(“Slope”*0.01745)/0.0896)/(3*Power(Sin(“Slope”*0.01745),0.8)+0.56))
hace referencia la ecuación (20)

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 empleara la siguiente formula en “Raster Calculator”

$$m = \frac{\beta}{(\beta+1)} \quad \text{Ecuación (21)}$$

- **Factor M** = "Factor_ β " / ("Factor_ β " + 1). Hace referencia a la ecuación (21)

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. Una vez obtenidas estas dos imágenes se obtuvo el Factor L en "Raster Calculator" empleando la siguiente Ecuación (22) y formula Desmet & Govers (1996) citado por (Shi *et al.*, 2004).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad \text{Ecuación (22)}$$

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 = (Power ("flow_acc"+625, ("Factor_M"+1))Power("flow_acc", ("Factor_M"+1)))/Power (25, ("Factor_M"+2)) *Power (22.13"Factor_M"). Hace referencia a la ecuación (22)

Para el cálculo del Factor S se empleara la siguiente ecuación y formula.

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad \text{Ecuación (23)}$$

donde.

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

β (i, j) = Pendiente (grados) con las coordenadas (i, j)

- **Factor S** = Con ((Tan ("Slope" * 0.01745) < 0.09),(10.08 * Sin ("Slope" * 0.01745) + 0.03),(16.8 * Sin("Slope" *0.01745)) - 0.5)). Hace referencia a la ecuación (23)

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 subgrids en la dirección de mayor pendiente según (McCOOL *et al.*, 1987), citado por (Barrios y Quiñonez, 2000).

Velásquez (2008) menciona que cuando se aplican estas fórmulas en algebra de mapas en la función de Raster Calculator de ArcGIS, para obtener un correcto funcionamiento el ángulo 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 se procedió a calcular el factor LS que es objeto de la presente metodología. Para ello se utilizó la siguiente formula.

- Factor LS = "Factor_L" * "Factor_S". Hace referencia a las ecuaciones (22 y 23)

5.9 Erosión Hídrica Potencial

En el caso de la erosión hídrica potencial, se multiplican los factores que se hallaron con las formulas anteriores.

$$A = (\text{Factor K}) * (\text{Factor R}) * (\text{Factor LS}).$$

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

5.9.1 Programación de la ecuación en ModelBuilder.

Para fines prácticos se estructuro en la herramienta ModelBuilder, el modelo de geoprociamiento automatizando mediante análisis espacial y de administración de datos, además se representa con un diagrama que concatena secuencias de procesos utilizando la

salida y entrada de las variables de la ecuación USLE/RUSLE **Pérez y Quintana (2009)**

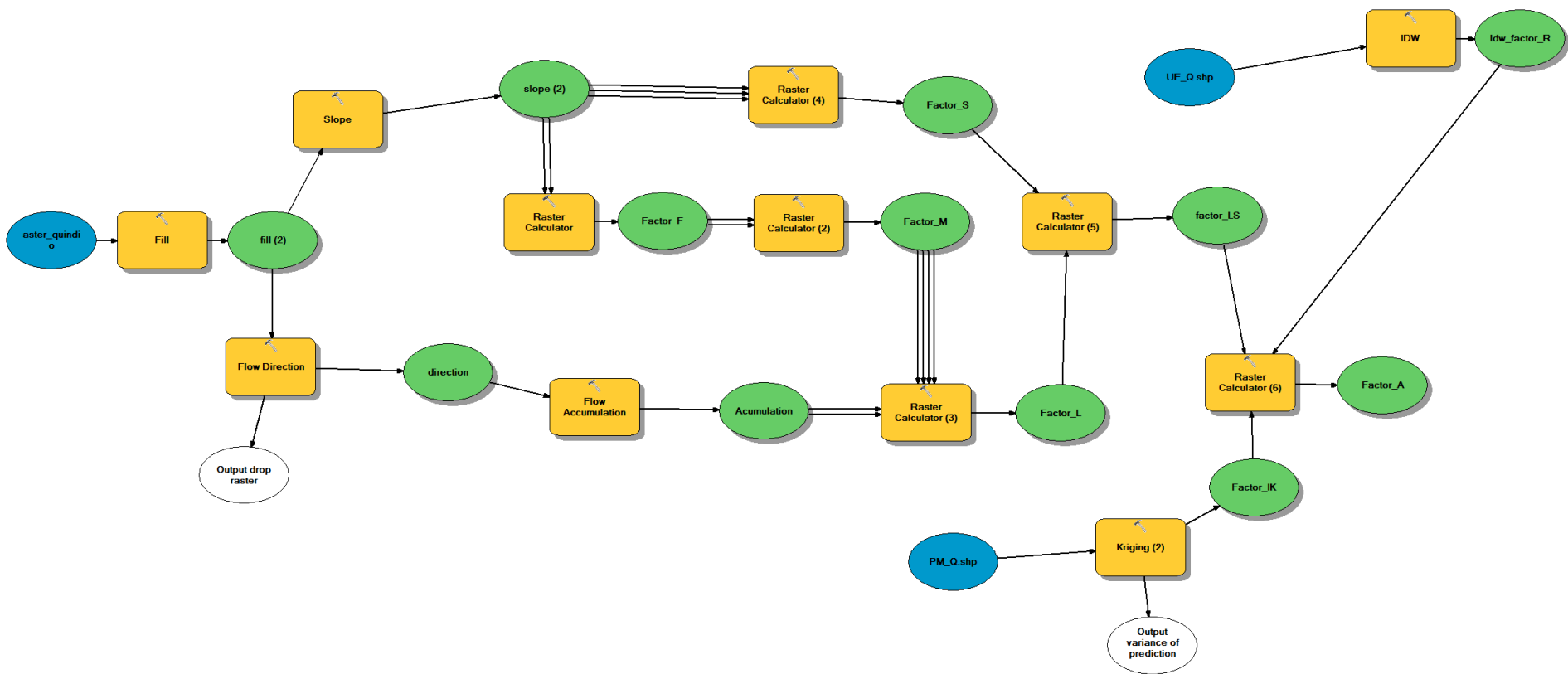


Figura 8.Diagrama de la estructura con Modelbuilder para EP
Fuente propia

6. RESULTADOS

6.1 Índice Modificado de Fourier (IMF)

Los valores promedio del índice de erosividad de la lluvia “IMF” para la región cafetera del departamento del Quindío son de moderada a alta, es decir 7500 a 15000 MJ.mm.ha⁻¹ Tabla 4. La totalidad de los datos, individuales anuales, solamente la estación La Alejandría (Génova) en el año 2009 presento un valor en la categoría Alto de resto todas las localidades siempre presentaron valores correspondientes a la clasificación Muy Alto. Estos valores indican que los suelos de la zona se ven afectados por una fuerte agresividad climática con la lluvia como agente fuertemente erosivo.

Tabla 4. Valores promedio de Índice Modificado de Fournier y su clasificación.

Estación	Municipio	IFM promedio	Clasificación
El Agrado	Montenegro	235,50	Muy Alto
El Jardín	Calarcá	301,86	Muy Alto
El Porvenir	Pijao	265,14	Muy Alto
La Alejandría	Génova	218,07	Alto
La Argentina	La Tebaida	259,66	Muy Alto
La Bella	Calarcá	261,27	Muy Alto
La Esperanza	Filandia	314,23	Muy Alto
La Esperanza	Buenavista	291,49	Muy Alto
La Ilusión	Circasia	284,82	Muy Alto

Estación	Municipio	IFM promedio	Clasificación
La Julia	Montenegro	271,35	Muy Alto
La Miranda	La Tebaida	234,97	Muy Alto
La Pradera	Armenia	251,62	Muy Alto
Maracay	Quimbaya	270,54	Muy Alto
Mónaco	Córdoba	282,73	Muy Alto
Paraguaicito	Buenavista	261,71	Muy Alto
Quebradanegra	Calarcá	287,14	Muy Alto
Sorrento	Montenegro	236,30	Muy Alto
Tucumán	Armenia	250,63	Muy Alto
Vivero	Quimbaya	253,39	Muy Alto

Fuente Lince y Castro 2015

6.1.1 Erosividad (R).

La zona cafetera del departamento de Quindío presenta un nivel de erosividad entre alto y muy alto según la clasificación de Rivera y Gómez 1991 para R, en el nivel alto se encuentra el área de influencia de 5 estaciones y en nivel Muy Alto las de las 14 estaciones restantes Tabla 5.

Tabla 5. Valores Erosividad (R) y clasificación para el área cafetera del departamento del Quindío.

Finca	Municipio	Erosividad (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
El Agrado	Montenegro	9382,95	Alta
El Jardín	Calarcá	11930,86	Muy Alta
El Porvenir	Pijao	10521,13	Muy Alta
La Alejandría	Génova	8765,32	Alta
La Argentina	La Tebaida	10310,41	Muy Alta
La Bella	Calarcá	10372,36	Muy Alta
La Esperanza	Filandia	12406,08	Muy Alta
La Esperanza	Buenavista	11532,81	Muy Alta
La Ilusion	Circasia	11276,87	Muy Alta
La Julia	Montenegro	10804,96	Muy Alta
La Miranda	La Tebaida	9362,34	Alta
La Pradera	Armenia	10107,63	Muy Alta
Maracay	Quimbaya	10728,41	Muy Alta
Mónaco	Córdoba	11196,40	Muy Alta
Paraguaicito	Buenavista	10389,32	Muy Alta
Quebradanegra	Calarcá	11365,76	Muy Alta
Sorrento	Montenegro	9453,81	Alta

Finca	Municipio	Erosividad (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
El Agrado	Montenegro	9382,95	Alta
Tucumán	Armenia	9963,63	Alta
Vivero	Quimbaya	10069,77	Muy Alta

Fuente Lince y Castro 2015

De las cinco estaciones que presentan un nivel Alto, cuatro se encuentran en el flanco occidental de la región cafetera, con influencia en parte de los municipios de Montenegro, La Tebaida y Génova. Las demás áreas de influencia presentan R muy alta **Figura 9**.

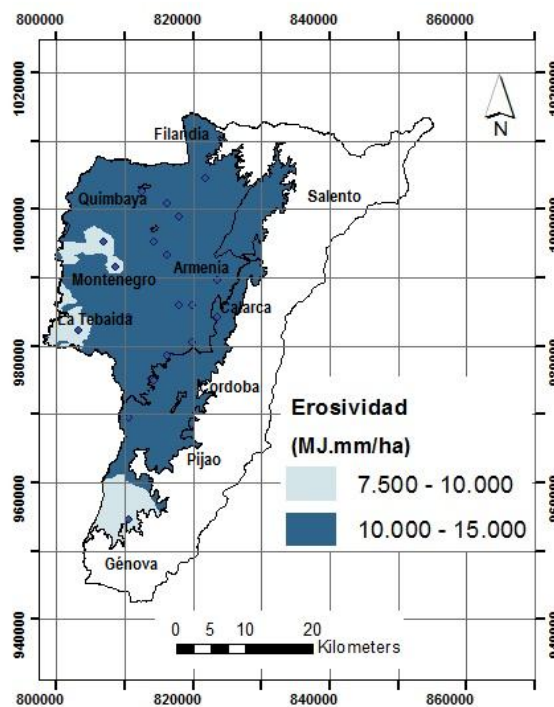


Figura 9. Mapa de distribución espacial de la erosividad (R) en la región cafetera del departamento del Quindío.

Fuente Lince y Castro 2015

Fuente: Lince y castro 2015

Como se muestra en la Figura 9, se calcularon con una erosividad simulada promedio de 21600 MJ.mm/ha, y la erodabilidad se clasifica como natural por ser menor que $0,01 \text{ t.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (clasificación de Rivera y Gómez 1991).

6.2 Factor de erodabilidad (K)

En la Figura 10 se ilustra los valores del factor K de erodabilidad en cada municipio que van desde 0.0002 hasta $0.0077 \text{ t/ha/MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Siendo este el rango de susceptibilidad natural como lo indican Rivera y Gómez (1991).

En los municipios Buenavista, Calarcá, Córdoba, Génova, Montenegro, Pijao y Quimbaya; se presentan valores de susceptibilidad altos que van desde 0.0041 a $0.0077 \text{ t/ha/MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$; siendo los municipios de Buenavista y Pijao, los que presentan mayor porcentaje del área susceptible con valores de 90 y 83 % en área total de superficie. Esto corresponde a suelos con pendientes superiores al 30 % calificada como fuerte.

En los municipios de Génova, Montenegro y Quimbaya muestran valores de susceptibilidad Moderados que van desde 0.0041 a $0.0057 \text{ t/ha/MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, con porcentajes susceptible con valores 5, 25 y 60% en su área de estudio.

Mientras que los municipios de Armenia, Circasia, Filandia y La Tebaida corresponde a los valores susceptibilidad Baja con valores que oscilan entre 0.0002 a $0.0041 \text{ t/ha/MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Presentando el menor porcentaje del área susceptible comprometida con valores del 10, 15, 8 y 30 % de su área total de la superficie; esto se puede deber a que las pendientes de estas zonas están clasificadas como ligera a bajas 0 a 15 %.

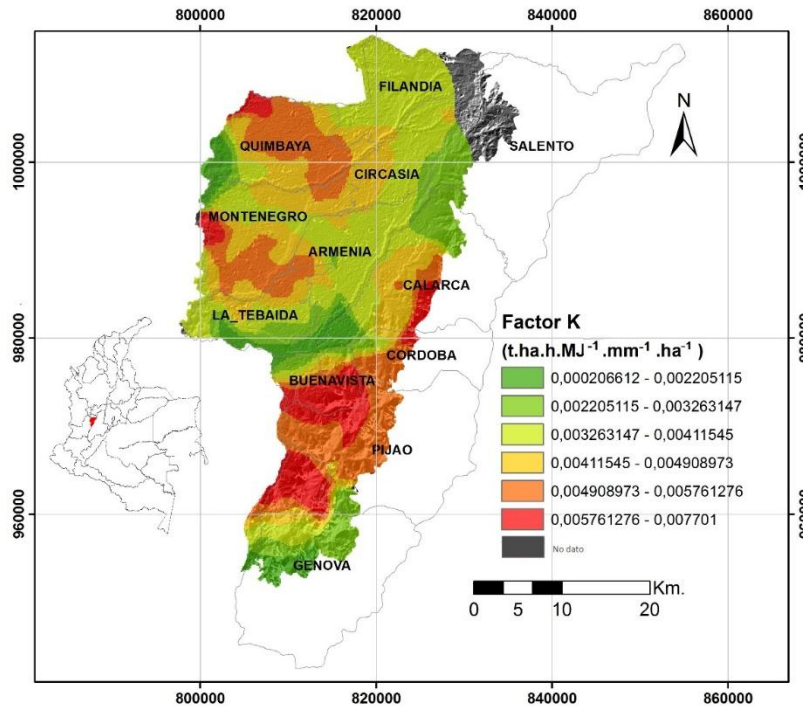


Figura 10. Mapa de erodabilidad o susceptibilidad en el departamento Quindío

Fuente propia

6.3 Pérdida de suelo potencial (EP)

En la Figura 11 como se muestra en la partes baja del mapa, donde se observa la pérdida de suelo con valores que van de 9.431 a 202.17 t/ ha⁻¹. año⁻¹. Los cual se clasificaron con las pérdidas de suelos propuesta por Pérez (2001) en la cual, se categorizan como ligera menor a 10 t/ ha⁻¹. año⁻¹, Baja 10 a 25 t/ ha⁻¹. año⁻¹, Moderada 26 a 50 t/ ha⁻¹. año⁻¹. Alta 51 a 100 t/ ha⁻¹. año⁻¹. Muy alta mayor a 100 t/ ha⁻¹. año⁻¹. Es importante mencionar que se realizó la proyección con los promedios de pérdidas potenciales de suelos en la zona cafetera del departamento del Quindío, multiplicando, el factor R agresividad de la lluvia con rangos de Alta a Muy Alta con valores que van de 7.500 a 15.000 MJ.mm.ha⁻¹, Factor K que es erodabilidad o susceptibilidad de los suelos a la erosión y por ultimo 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 $100 \text{ t/ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

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 $25 \text{ t/ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Siendo los municipios de Armenia, Montenegro y La Tebaida los que menores pérdidas presentan puede llegar a perder 2 a 3 mm de espesor por hectárea año, por tan razón, las pérdidas potenciales puede llegar a causar daños irreparable en la capa orgánica del suelo, ya que el espesor del suelo puede perder un 1mm por tonelada año en condiciones muy severas, lo que significa que 27 % del área de estudio puede llegar perder 3 mm. $\text{ha} \cdot \text{año}$ 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 clasifico la pérdida de suelo según la **Tabla 6**.

Tabla 6. Clasificación de la pérdida de suelo de acuerdo con la calificación.

Pérdida de suelo ($\text{t/ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)	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)**.

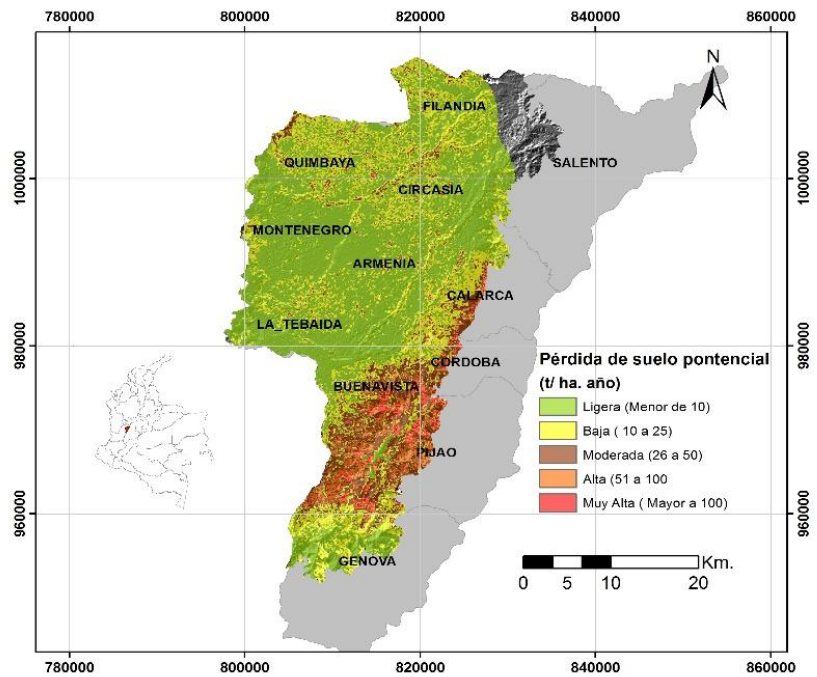


Figura 11. Pérdida de Suelo potencial en el departamento del Quindío.

Fuente propia

7. CONCLUSIONES

El factor de erodabilidad más alta y que cubre mayor área de estudios, se presenta en el municipio de Buenavista y Pijao, con valores de 0.0041 a 0.0077 t/ha/MJ-1.mm⁻¹.ha⁻¹. Se encontró que estos municipios 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 mapa de riesgos a la erosión potencial para predecir las zonas con pérdida de suelo calificadas como Alta y muy alta que va de 26 a más 100 t.ha.año, donde puede llegar a perder 3 mm por hectárea año de capa orgánica como lo demuestran los estudios anteriores por CENICAFÉ.

Material parental, la erosividad y las pendientes jugaron un papel fundamental en las pérdidas de suelo, como 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.año, que correspondían a pendientes del 15 y 30 %.

La erosión potencial se puede cuantificar de forma puntual, lo cual sirve para la toma decisiones en proyectos de conservación de suelos y medio ambientales.

8. RECOMENDACIONES

Es importante la actualización y recopilación periódica de la información de este tipo de trabajos con miras a una mejor clasificación que conlleve a un recomendable uso y manejo del suelo, con la ayuda de prácticas de conservación de suelos a partir de las necesidades a nivel de Región o cuenca.

Con base en los resultados y metodologías desarrolladas en la presente investigación mediante tecnologías de información de Información Geográfica se realizara un proyecto en los municipios que presentaron mayor erosión potencial a mayor escala, con el fin de ajusta modelo a mayor detalle para implementación de prácticas de conservación.

En las áreas que presentan riesgo a la erosión potencial, se deben empezar a concientizar a los productores sobre la degradación del suelo y la contaminación ambiental que provocan a los ríos.

9. BIBLIOGRAFÍA

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.

Barrios, A. G., & Quiñónez, E. (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo (R) USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los Andes Venezolanos. *Revista Forestal Venezolana*, 44(1), 2000.

Carter, M. R. (Ed.). (1993). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC Press.

Carvajal Ramírez, F. y Giráldez Cervera, J. V. Análisis de la producción de sedimentos en una cuenca con un Sistema de Información Geográfica. (2000). *El sistema cubillas-colomera. Ingeniería del Agua*, Vol. 7 N° 3, pp 255-236

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, Escuela de Posgrados sede Palmira.

Cook, H.L. (1936). The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil Sd. Soc. Amer. Proc.* 1:60-64.

Desmet, P. J. J. & G. Govers. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 (5): 427-433.

ESRI. (2008). *ArcGIS 9.3*. Redlands, CA. USA.

Federacion de Cafeteros. (1982). *40 años de investigación en Cenicafé. Vol1. Suelos*

Figueroa Sandoval, B. (1975). *Pérdida de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo*

en la cuenca del río Texcoco. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 209 p.

Figuroa S., B.; Amante O. 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.

Figuroa-Jáuregui, M. L.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Arteaga-Ramírez, R.; Arellano-MONTERRAS J. L.; Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de Uso de Suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia* 45: 531-544.

Flores Lopez, H. E.; Martínez Menes, M.; Oropeza Mota, J. L.; Mejía Saenz E.; López CARRILLO R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepetitlan, Jalisco, México. *Terra* 21: 233-244.

Foster, G. R., Meyer, L. D., & Onstad, C. A. (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transactions of the ASAE*, 20(4), 683-687.

Foster, G.R., D.K. McCool, K.G. Renard, and W.C. Moldenhauer. (1981). Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units. *J. Soil and Water Cons.* 36(6):355-359.

Foster, G.R., Renard, K.G., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A., (1996). "RUSLE User's Guide. Soil and Water Conservation Society." <http://www.elsevier.com/locate/catena>

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* 55:33

González, Antonio. Anotaciones sobre Física de Suelos: Fracción teórica. Palmira, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, (1987). 165 p.

GOMEZ A., A. (1990). Las malezas nobles previenen la erosión. Chinchiná, Colombia. Cenicafé. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafé No. 151).

Hairsine, P. B., & Rose, C. W. (1991). Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 320-324.

Hairsine, P. B. y C. W. Rose (1992). "Modeling water erosion due to overland flow usng physical principles: 1. Sheet flow." *Water Resources Research* 28(1): 237-243

Hincapié G, 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.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.

Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo*. Reverte.

Hudson, N. (1982). *Conservación de suelos*. Barcelona, Reverté, 335 p.

Jaramillo R., A.; Arcila P., J. (2009). Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de la niña y su efecto en la caficultura. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 389:1-8.

Klute, A Z. *Methods of Soil Analysis*. (1986). Physical and mineralogical properties. Madison, American Society of Agronomy and Soil Science of America.,1187 p.

Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 635-662.

Lal, R. (1988). Erodibility and erosivity. Soil erosion research methods., 141-160.

Lal, R. a. t. t. a. n. (2001). Soil degradation by erosion. Land degradation & development, 12(6), 519-539.

Leihner, D. E.; Ruppenthal, M.; Castillo F., J. A.; Müller, K. (1997). Cuantificación y estudios de la erodabilidad de los suelos andinos en el suroccidente colombiano. Memorias del taller “Conceptos integrales en la conservación de suelos y aguas en la zona andina”. (Cali), CIAT, .227 p.

Lince s., L.A.; Castro Q., A.F. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío Colombia. Cenicafé 66(1):25-31.

Mancebo Quintana, S.; Ortega Perez, E.; Martín Fernández, L.; Valentín Criado, A.C. (2009) LibroSIG:aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental: ejercicios. Madrid, España, los autores.

Montenegro H., G.; Malagón D., C. (1990). Propiedades Físicas de los Suelos. Instituto Geografico Agustin Codaszzi (IGAC). Bogotá, D.E. (Colombia). 813 p.

Morgan, R. P. C. (1997). Soil erosion and conservation. Erosión y consevación del suelo (No. S623. M6818).

Motta de Muñoz, B., Rodríguez, C. M. G., & Marulanda, J. C. D. C. (1990). Métodos analíticos del laboratorio de suelos (No. Doc. 22687) CO-BAC, Bogotá).

McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K. y Meyer L.D. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Trans. ASAE 30: 1387-1396

McCool, D. (1987). Command of the waters: Iron triangles, federal water development, and Indian water. University of Arizona Press.

Olmos, E., & Montenegro, H. (1987). Inventario de los problemas de la erosión y degradación de los suelos de Colombia. In Resúmenes del Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (Vol. 4, pp. 18-21).

Pando, M., Gutiérrez, M., Maldonado, A., Palacio, J.L. y Estrada, E. (2003). Comparación de Métodos en la estimación de erosión hídrica. Investigaciones Geográficas Universidad Nacional Autónoma de México. N° 051. México, pp. 23-36.

Pérez. S. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. (2001). Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/modeloerosion.pdf>. Consultado en Agosto de 2016.

Ramírez O., F.A.; Hincapié G., E.; Sadeghian K., S. Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafé* 60(1):58-71. 2009.

Ramírez O., F.A.; Hincapié G., E.; Sadeghian K., S.; Pérez G., U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé* 58(1):40- 52

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703). Washington, DC: US Government Printing Office.

Rivera P., H.; Gómez A., A. (1991) Erodabilidad de los suelos de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé* 42 (3):67–88.

Rivera, P. (1999). H. 1999b. El Manejo Integrado de Arvenses en Cafetales Aumenta los Ingresos y Evita la Erosión. Chinchiná (Colombia). *Cenicafé*.

Sagredo, C. (2005). Metodología para evaluar la estabilidad de camellones. Tesis de grado Ingeniero Agrónomo, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago de Chile. 23p.

Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga, CO. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.

Velásquez, S. (2008). Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Coronado, Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza.

Wischmeier WH, Johnson CB and Cross BV. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of soil and water conservation 26: 189-192.

Wischmeier, W. H., y 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.

Wischmeier, W.H., and Smith. D.D. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA Agr. Handbk. No. 282, 47 p.

Wischmeier, WH & DD Smith. (1978). Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agr. Handbook, 537.

Zingg, A.W. (1940). Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agr. Eng. 21 :59-64.

10. Anexo 1: Análisis físicos

Hasta el momento se tienen resultados parciales de conductividad hidráulica saturada, densidad aparente (**Da**), densidad real (**Dr**) y estabilidad de agregados al agua (**EAA**). Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 7. Resultados parciales de análisis físicos.

		Conductividad							
Unidad	Punto	Hidráulica	Da (gr/cm3)		Dr (gr/cm3)		EAA (mm)		
		(cm/h)							
			punto	Unidad	punto	Unidad	punto	Unidad	
			□						
Ch	41	0,06	0,06	0,78	0,78	2,15	2,15	3,56	3,56
	9	0,17		1,24		2,54		3,36	
	11	0,34		1,15		2,70			
	13	0,46		1,00		2,70			
Mn	21	0,45		1,07		2,70		3,18	
	31	0,34	0,43	1,26	1,05	2,66	2,62		3,44
	45	0,39		0,85		2,70			
	48	0,80		0,96		2,34		3,58	
	49	0,42		0,84		2,70			

	70	0,48		1,09		2,51		3,57
	6	0,14		0,70		2,26	2,10	3,66
Qd	7	0,51		0,96		2,58		
	18	0,29		0,85		2,09	1,02	3,58
28	55	0,19	0,40	0,84	0,88	2,28		3,53
0,88							2,70	
							2,91	
	68	0,41		0,91		2,70		3,38 3,66
S	3	0,01	0,01	1,28	1,28	2,69	2,69	
Lc	45	0,39	0,39	0,85	0,85	2,50	2,50	