

**DETERMINACIÓN Y MAPIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE SUELO EN LA
CUENCA DEL EMBALSE DE LA COPA**

VÍCTOR HUGO GUÍO MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA
2019**

**DETERMINACIÓN Y MAPIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DE SUELO EN LA
CUENCA DEL EMBALSE DE LA COPA**

VÍCTOR HUGO GUÍO MARTÍNEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Dirigido por:

GERMAN CELY REYES

Ing. Agronomo – Mg. En Ciencias Agrarias

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL

TUNJA

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	10
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. ANTECEDENTES.....	22
5. OBJETIVOS.....	25
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	25
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
6. MARCO TEÓRICO.....	26
6.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.....	26
6.1.1. Pendiente de una cuenca.....	26
6.1.2. Longitud de la cuenca.....	27
6.1.3. Patrones de drenaje.....	27
6.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO.....	28
6.2.1. Procesos de degradación del suelo.....	31
6.2.2. El proceso de erosión del suelo.....	32
6.2.3. Erosión.....	35
7. METODOLOGÍA.....	42
7.1. MARCO ESPACIAL.....	42
7.1.1. Cuenca del embalse de La Copa.....	42
7.2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	46
7.2.1. Definición de hipótesis.....	46

7.2.2.	Recopilación de información existente	46
7.2.3.	Delimitación de la cuenca	46
7.2.4.	Estudio pluviométrico	47
7.2.5.	Estudio cartográfico y de cobertura vegetal	48
7.2.6.	Detección de cambios en la cobertura vegetal en el páramo de La Cortadera.....	48
7.2.7.	Ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)	48
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
8.1.	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	63
8.2.	ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO	64
8.3.	CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL EN EL PÁRAMO LA CORTADERA.....	67
8.4.	ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELOS REVISADA (RUSLE)	
	70	
8.4.1.	Índice de Fournier modificado	70
8.4.2.	Factor R	73
8.4.3.	Índice de Concentración de las precipitaciones	76
8.4.4.	Factor K	78
8.4.5.	Factor LS	79
8.4.6.	Factor C	82
8.4.7.	Factor P	85
8.4.8.	Pérdida de suelo en la cuenca del Embalse de La Copa	86
9.	CONCLUSIONES	88
10.	RECOMENDACIONES	90
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos antropogénicos de degradación del suelo. Tomado de: Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación.....	30
Figura 2. Tipos y procesos de degradación del suelo. Tomado de: Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación	31
Figura 3. Proceso de erosión en cuencas. Tomado de Manual de Ingeniería de Ríos	32
Figura 4. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse. Tomado de Manual de Ingeniería de Ríos, capítulo 18 (Sedimentación en embalses).	34
Figura 5. Elementos que intervienen en la formación de surcos. Tomado de: Control de Erosión en Zonas Tropicales	39
Figura 6. Área de estudio de la Cuenca del Embalse la Copa en el departamento de Boyacá, Colombia.....	44
Figura 7. Cuenca del embalse de la Copa-Boyacá delimitada en ArcSWAT.	64
Figura 8. Precipitación promedio mensual en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá. Fuente: Datos pluviométricos IDEAM.	65
Figura 9. Distribución de la precipitación media anual de la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá	66
Figura 10. Cambio de cobertura vegetal, comparando los años 1985 y 2012 en el Páramo La Cortadera, Boyacá.....	68
Figura 11. Imagen satelital del Páramo La Cortadera – Boyacá en 1985	69
Figura 12. Imagen satelital del Páramo La Cortadera – Boyacá en 2012	69
Figura 13. Distribución espacial del IFM en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.	71
Figura 14. Promedio mensual del índice de Fournier modificado (IFM) para la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.....	72

Figura 15. Distribución espacial del factor R en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.	74
Figura 16. Distribución espacial del ICP en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.	77
Figura 17. Distribución espacial del factor R en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.	79
Figura 18. Distribución espacial del facto LS (cualitativo) en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.....	81
Figura 19. Distribución espacial del factor LS (cuantitativo) en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.....	82
Figura 20. Distribución espacial del factor C en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.	84
Figura 21. Área de hectáreas y en porcentaje del factor C de la cuenca del Embalse de La Copa-Boyacá.....	84
Figura 22. Distribución espacial del factor P en la cuenca del Embalse de La Copa-Boyacá.....	86
Figura 23. Pérdida de Suelo de la cuenca del embalse de La Copa-Boyacá.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones presentes en la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá .	47
Tabla 2. Clasificación del factor R	51
Tabla 3. Categorías de clasificación para el índice de Fournier modificado en Latinoamérica.	53
Tabla 4. Clasificación del índice de concentración de las precipitaciones	54
Tabla 5. Clasificación de la estructura del suelo	57
Tabla 6. Clasificación de la permeabilidad del suelo	57
Tabla 7. Rangos de pendiente en el departamento de Boyacá propuesto por el IGAC	60
Tabla 8. Valores de susceptibilidad a la erosión, Factor C para cada tipo de cubierta del suelo.....	61
Tabla 9. Factor P de practicas de conservación. Tomado de: Control de Erosión en Zonas Tropicales	62
Tabla 10. Resultados de la investigación pluviométrica, índices IFM, ICP y Factor R	75
Tabla 11. Factor LS para la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá; de acuerdo a la clasificación propuesta por Ramírez e Hincapie (2009).	80
Tabla 12. Pérdida de suelo de la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá; de acuerdo a la clasificación propuesta por Pérez (2001).	87

RESUMEN

La cuenca del embalse la Copa está ubicada en el departamento de Boyacá con la tarea de suministrar el riego del alto Chicamocha. En este lugar se pretendió estimar la tasa de pérdida de suelos por erosión y generar un mapa de pérdida de suelos en la cuenca del embalse de la Copa, a partir de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE). Para esto se obtuvieron y mapificaron los componentes de la RUSLE y se usó el índice de Fournier modificado para evaluar la agresividad climática de la zona. Los resultados obtenidos permitieron conocer que la zona tiene un comportamiento bimodal de lluvias pero que se reparten durante varios meses al año (según el ICP), siendo Soracá, Siachoque, Toca y Tuta los municipios de la cuenca con mayor agresividad de lluvia, pero sin pasar de la categoría moderada y el Factor R mostró bajo riesgo de erosividad, por lo que la erosión hídrica medida por estos factores es baja. Sin embargo, el factor LS mostró que la longitud y pendiente de la cuenca es variada, típica de la zona Andina. El factor C demostró que solo la zona oriental de norte a sur cuenta con cobertura vegetal, siendo la zona más protegida de la erosión hídrica. Por último, el factor P dejó en evidencia que dentro de la cuenca del embalse no se realizan prácticas de manejo para evitar la pérdida de suelo. La suma de estos resultados lleva a encontrar que la pérdida de suelo de la cuenca del embalse La Copa es alta, comprometiendo el 76,11% de la zona de la compone.

ABSTRACT

The basin of the La Copa reservoir is located in the department of Boyacá with the task of supplying the irrigation of the upper Chicamocha. In this place, it is intended to estimate the rate of soil loss due to erosion and generate a map of soil loss in the Copa reservoir basin, based on the application of the universal soil loss equation (RUSLE). For this, the components of the RUSLE were obtained and mapped, and the modified Fournier index is used to evaluate the climatic aggressiveness of the zone. The results obtained allow to know that the area has a bimodal behavior of rains but that they are distributed during several months of the year (according to the ICP), being Soracá, Siachoque, Toca and Tuta the municipalities of the basin with greater aggressiveness of rain, but without Going from the moderate category and Factor R showed low risk of erosivity, so the water erosion measured by these factors is low. However, the LS factor showed that the length and slope of the basin is varied, typical of the Andean zone. Factor C showed that only the eastern area from north to south has vegetation cover, being the most protected area of water erosion. Finally, the P factor showed that there are no management practices to avoid soil loss within the reservoir basin. The sum of these results leads to finding that the loss of soil in the La Copa reservoir basin is high, compromising 76.11% of the area of the reservoir.

1. INTRODUCCIÓN

Suárez¹ y Buitrago² comentan que la erosión del suelo es un proceso comprendido por el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales superficiales del suelo, esto por acción de la fuerza de un fluido: agua o viento. Asimismo, Hazelton y Murphy³ comentan que la erosión física del suelo se produce principalmente por efectos hídricos y eólicos. Para Colombia, Buitrago⁴ reporta que la erosión más importante es la hídrica mientras que la eólica se encuentra en lugares muy específicos. Zinck⁵ considera que dicha erosión reduce la productividad, permite la contaminación de las fuentes hídricas, la sedimentación de los ríos, embalses y lagos, razón por la que se cataloga como uno de los problemas ambientales de mayor relevancia en el mundo entero. Además, Lal⁶ comenta que la erosión del suelo afecta de forma directa la seguridad alimentaria porque, según Gracia⁷, degrada la potencialidad productiva del suelo.

La FAO⁸ mostró algunos modelos que se han utilizado para predecir la erosión hídrica los cuales son variados entre los que están las observaciones directas con escalas cualitativas, la descripción de perfiles de suelos, parcelas de escorrentía, entre otras, que tienden a ser poco confiables porque de un área muy pequeña, como parcelas, se debe extrapolar resultados para un área mucho mayor. En ese

¹ SUÁREZ, Jaime. Control de la Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda. 2001, ISBN 958-33-2734-4.

² BUITRAGO, Jeiner. Desarrollo de un Modelo de Visualización de Erosión Hídrica en el Municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de Caso. Bogotá. 2011. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Bogotá.

³ HAZELTON, Pam; MURPHY, Brain. Soil Physical properties. Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO publishing, 2007. 5-29pp

⁴ BUITRAGO. Op. Cit.

⁵ ZINCK, Joseph. Suelos: información y sociedad. In: Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 2005. 9-19.

⁶ LAL, Rattan. Soil quality and sustainability. En: R. Lal et al. Methods for Assessment of Soil Degradation. Advances in Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 1998, 17-30pp

⁷ GRACIA, Jesús. Pérdida de suelo en cuencas. Capítulo 17 del Manual de ingeniería de Ríos. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. 1996

⁸ FAO. Boletín de suelos En: Capítulo 7: Estimaciones a partir de modelos. 1997

sentido, Wishmeier y Smith⁹ buscaron otros métodos con mayor confiabilidad como es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, la cual, utiliza un modelo matemático que permite relacionar diferentes factores de distribución espacial para obtener la pérdida de suelo por erosión (expresada: t.ha⁻¹).

No obstante, Gracia¹⁰ comenta que la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo tiene algunas limitaciones porque fue creada para áreas espaciales de tamaños reducidos y no para grandes zonas como son las cuencas. Se han detectado, dentro de la ecuación, los factores que generen las estimaciones menos uniformes: el factor S (gradiente de la pendiente), el factor L (longitud de la pendiente) y el factor R (erosividad del suelo), siendo este último el factor que más polémicas genera porque evalúa la precipitación media anual en el área a investigar y en ocasiones está información no existe. Sin embargo, Arnoldus¹¹ reporta el Índice de Fournier modificado puede ser un buen predictor de la erosión hídrica, esto porque según Ramírez¹² hay correlación con el Factor K que usa la precipitación de todos los meses del año, caracterizando la agresividad de la precipitación como lo comentan Velazco y Cortes¹³.

⁹ WISCHMEIER, Walter & SMITH, David. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains: Guide for selection of practices soil and water consecration. In: Agricultural Handbook, 1965. 282, 47pp

¹⁰ GRACIA. Op. Cit.

¹¹ ARNOLDUS, H. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: De Boods, T.; Gabriels, D. (Eds.). Assessment of erosion. London, 1980. 125-132.

¹² RAMÍREZ, Fernando. Evaluación del Riesgo por Erosión Potencial de la Zona Cafetera Central del Departamento de Caldas. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. Línea Desarrollo Regional Sostenible. Ibagué. 2006

¹³ VELAZCO, I. y CORTÉS, G. Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. Aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes. 2009, 9, 431-434.

Clerizí-Prechac¹⁴ y García y Cortez et al¹⁵. Comentan que teniendo datos cuantitativos sobre la erosión de suelo en un área determinada, se favorece el gerenciamiento del sitio y permite que se puedan tomar decisiones de manejo sobre la conservación, el uso y el aprovechamiento del suelo por parte de la comunidad circundante.

El embalse de La Copa en el departamento de Boyacá-Colombia, presenta una gran presión por actividades antrópicas, principalmente agropecuarias, en las que se hace uso del recurso hídrico para producciones como las flores o para consumo humano y animal. Previamente, en el embalse, se encontró que en los municipios de Toca, Siachoque, Tuta y Soracá la agresividad de lluvia es moderada y para el resto de la cuenca la agresividad es baja, esto, asociado a que la lluvia se presenta en varios meses del año, conllevan a que el riesgo de erosión por lluvia sea bajo, sin embargo Guío-Martínez et al¹⁶. recomienda realizar el estudio con todos los componentes de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. En ese sentido, se propuso estimar la tasa de pérdida de suelos por erosión y generar un mapa de pérdida de suelos en la cuenca del embalse de la Copa, a partir de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).

¹⁴ CLÉRICI, C. y GARCÍA-PRÉCHAC, F. Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de La Plata. *Agrociencia*, 2001. 5(1):92-103

¹⁵ CORTEZ, Adriana, et al. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. II. Región Noroccidental. *Bioagro*, 2011. 23(1), 13-18

¹⁶ GUÍO-MARTÍNEZ, Victor, et al. Determinación y mapificación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse La Copa, Boyacá. *Ingenio Magno*, 2015. 6: 34-46.

2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pineda et al¹⁷. comentan que las cuencas hidrográficas actúan como áreas de captación, almacenamiento y descarga de agua, que luego es utilizada para propósitos tales como consumo de agua potable, riego y generación de electricidad, entre otros, estas cumplen importantes funciones ambientales, como lo es, la preservación de hábitat y rutas para diversas especies animales y vegetales.

Tal como lo dice Gracia¹⁸ las pérdidas de suelo en las cuencas hidrográficas son causadas principalmente por la erosión hídrica generada por las lluvias y el escurrimiento, acentuada por la actividad antrópica que genera conflictos entre el uso que el hombre hace de sus recursos ambientales y las potencialidades que estos recursos le ofrecen. Además de generarse pérdida de suelo, el cual es un recurso no renovable, la erosión hídrica disminuye la productividad en las zonas de cultivo. Ramírez¹⁹ comenta que el proceso de erosión toma una notable importancia en las cuencas y microcuencas de Colombia, las cuales son un asentamiento de una elevada actividad agrícola, poniendo en riesgo dicha actividad, además de la calidad de los suelos y la calidad hídrica debido a la sedimentación y la alta presión que ejerce sobre la tierra el manejo inadecuado y la escasa aplicación de prácticas de conservación de suelos en el país.

Pérez²⁰ menciona que el estado del conocimiento actual sobre la erosión del suelo y sus efectos en el país es esencialmente cualitativo, de tal forma que la información

¹⁷ PINEDA Corina, et al. Evaluación Física de Tierras de la Cuenca Alta del Río Guárico con Fines de Producción Sustentable de Agua. *Agronomía Tropical*, 2006. 56(3): 385-414.

¹⁸ GRACIA. Op. Cit.

¹⁹ RAMÍREZ. Op. Cit.

²⁰ PÉREZ G. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Tesis de Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Bogotá. 2001.

cuantitativa sobre los procesos erosivos, sus efectos sobre la productividad, la sedimentación, aún no están disponibles; esta falta de información dificulta la identificación y la aplicación de prácticas estratégicas efectivas de conservación y la rehabilitación de las tierras en el país.

La cuenca del embalse de la Copa está compuesta por un gran número de nacimientos de agua. Las principales corrientes que confluyen en la cuenca son el Río Toca, Río Chorrera, Quebrada Raiba, Quebrada Tuaneca, Quebrada Leonera, quebrada El Vallado, parte del Río Cormechoque. Según el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Toca²¹, el principal cuerpo de agua en la cuenca es el Embalse de la Copa, este tiene un área de 307 km² aproximadamente, hace parte de los municipios de Siachoque, Toca, Pesca y Tuta; de la cual más del 80% pertenece al municipio de Toca. De esto, CORPOBOYACA²² reporta que del embalse depende en parte el desarrollo futuro municipal, industrial y agropecuario de los municipios del Alto Chicamocha, corriente que abastece gran parte de las demandas de agua existentes.

Alrededor de la cuenca del embalse de La Copa se desarrollan un gran número de actividades económicas de producción agropecuaria, entre estas, el cultivo de papa y cebolla en mayor magnitud y el cultivo de maíz es menor, además de esto cada vez es mayor el número de empresas floriculturas que se establecen alrededor de la cuenca, de la misma manera el uso de pastos para mantenimiento de ganado prevalece como una de las principales actividades económicas en la región. Sin embargo, en la actualidad la cuenca se encuentra en un alto estado de deterioro debido al mal manejo de estas actividades productivas, las rondas de los ríos y quebradas son utilizadas para el cultivo de productos agrícolas, ganadería o

²¹ ALCALDÍA MUNICIPAL DE TOCA. Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Toca, departamento de Boyacá, Colombia. 2004.

²² CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ (CORPOBOYACA). Plan de Ordenamiento Y Manejo De La Cuenca Alta Del Rio Chicamocha POMCA-RCH. Departamento de Boyacá, Colombia. 2006

construcción de viviendas; causando la contaminación y disminución del caudal de los espejos de agua, disminución de la cubierta vegetal protectora y pérdidas de suelo.

La mayor parte de la cuenca alta del río Chicamocha ha sido estudiada en el POMCA, en este estudio se ha concluido un avanzado estado de contaminación en toda la cuenca; sin embargo no se ha realizado un análisis detallado de las pérdidas del suelo en la cuenca del Embalse de la Copa y la poca información de suelos existente se encuentra en el plan de ordenamiento territorial del municipio; dicha información se encuentra desactualizada y suele ser poca para efectos de conservación de suelos en la región; no hay estimaciones de la tasa de pérdida de suelo en la cuenca en la actualidad, la estimación de la pérdida de suelos es importante, ya que el embalse de la Copa es uno de los principales reguladores de la cuenca alta del río Chicamocha, las subcuencas y microcuencas del embalse abastecen las necesidades de agua de los municipios que la cuenca abarca, ya sea para su principal actividad productiva, la cual es la agricultura, o para su consumo como agua potable. Debido a esto es necesario generar nuevo conocimiento sobre la cuenca del embalse de la Copa, conocimiento que involucre los procesos erosivos y de pérdida de suelos en esta región, el uso actual de los suelos y la condición de la cobertura vegetal protectora de la cuenca, todo esto detallado con la ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de proveer un diagnóstico minucioso de la condición en la que se encuentra dicha cuenca y así proponer estrategias para su manejo y conservación.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál ha sido la pérdida de suelo por acción de la erosión en la cuenca del embalse de la Copa, Boyacá?

3. JUSTIFICACIÓN

El suelo y el agua son recursos naturales esenciales para el desarrollo económico y social en todas partes del mundo, principalmente en zonas poco urbanizadas el sustento económico está basado en el aprovechamiento de estos recursos por parte del sector pecuario, forestal y agrícola, los cuales necesitan de un aprovechamiento sostenible del recurso suelo y el agua presente en las cuencas hidrográficas que lo rodean; sin embargo debido a las malas prácticas productivas que hacen uso indiscriminado de los recursos naturales tanto el suelo como el agua se encuentran en un avanzado estado de deterioro; el suelo erosionado por el efecto de las lluvias sumado a la devastación de la cubierta vegetal protectora, y el agua, contaminada en las cuencas como consecuencia del arrastre de sedimentos, materia orgánica y productos químicos del suelo.

El estudio de los factores naturales y humanos que actúan sobre las características de los suelos en cuencas hidrográficas y sobre las posibilidades de aprovechamiento de estos es una necesidad en el manejo integral de una cuenca hidrográfica. Estudios de Gaspari y Bruno²³ permiten identificar situaciones tales como la erosión hídrica superficial, la sedimentación y la pérdida de cobertura vegetal a partir del estudio y la evaluación del estado actual del suelo de una cuenca, se pueden generar pautas de gestión para la toma de decisiones sobre el uso de los recursos naturales que nos provee dicha cuenca y así inducir un manejo sustentable de la misma.

De Regoyos, citado por Vega y Pizarro²⁴ se extrae que la erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y engloba tanto la degradación

²³ GASPARI, Fernanda. y BRUNO, Juan. Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *Ecología Austral*, 2003. 13:109-120.

²⁴ VEGA, Leonardo y PIZARRO, Roberto. Evaluación de la erosión hídrica superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo. 2008. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Talca, Chile.

física del suelo como la química y biológica, dejando sitios vulnerables y dando como resultado un cambio en la calidad de agua y la cantidad apta para consumo, ya sea doméstico, industrial o agrícola según Castañeda²⁵. Sin embargo, Nemiga y Treviño²⁶ reportaron que los procesos relacionados con la creciente población y la expansión de la agricultura están causando la desaparición y la fragmentación de los ecosistemas naturales protectores de las cuencas hidrográficas. Estos procesos, además de poner en riesgo a los ecosistemas naturales, pueden alterar la captación de agua en las cuencas, lo cual afectaría la producción en las regiones agrícolas, como lo es la cuenca del embalse de la Copa. Por esto es prioritario diseñar estrategias para el manejo adecuado de los recursos naturales, las cuales concilien las necesidades de producción con las de conservación de los recursos. Estas estrategias se generan a partir de estudios que evalúen el estado actual de la cuenca y uno de los factores más importantes a estudiar es la medida de la pérdida de suelos asociada a los procesos erosivos causados por la lluvia, el mal manejo de las prácticas agrícolas y la fragmentación de los ecosistemas.

Este proyecto responde a las necesidades inmediatas de manejo y sostenimiento ambiental de un recurso no renovable como lo es el suelo, el cual a raíz de su proceso erosivo puede afectar otros recursos naturales en la cuenca como lo son la vegetación protectora y el agua; la generación de un mapa de pérdida de suelos de la cuenca del embalse de la copa y su futura divulgación puede ayudar a concientizar a las autoridades locales sobre la importancia de un manejo integrado de los recursos naturales; este manejo integrado hace énfasis en identificar las estrategias de manejo para mantener el estado de los recursos naturales así como sus flujos de bienes y servicios y sus procesos ecológicos subyacentes.

²⁵ CASTAÑEDA, S., et al. Evaluación ecológico-hidrológica del plan de manejo de la Microcuenca del Río Talgua, Olancho. 2006. Tesis de Licenciatura. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana-2012

²⁶ NEMIGA, Xanat y TREVIÑO, Eduardo. Modelos Espaciales Aplicados al Manejo de los Recursos Naturales: Una Propuesta en la Subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México. Universidad Autónoma Indígena de México. Ra Ximhai, enero-abril, 2008. 4(1): 23-44

Según Nemiga y Treviño²⁷, para hacer operativo este enfoque del manejo integrado de los recursos naturales cada vez se aplica con mayor frecuencia los sistemas de información geográfica como componente integral de las actividades de manejo de los recursos naturales, ya que estos han demostrado ser una útil herramienta para abordar los problemas inherentes al análisis de datos espaciales, pues estos son efectivos al combinar, archivar, desplegar, analizar y modelar los datos espaciales y temporales.

Arekhi et al²⁸. comentan que la aplicación de los sistemas de información geográfica acompañados del sensoramiento remoto contribuye a la determinación por un costo razonable y una mayor precisión en grandes áreas de la erosión hídrica del suelo y su distribución espacial; de esta manera una combinación de los SIG, el SR y la metodología RUSLE (Ecuación universal de pérdida de suelos revisada), representa una herramienta eficaz para estimar la pérdida de suelos en la cuenca del embalse de La Copa y así poder plantear estrategias dirigidas a un manejo sustentable del mismo, lo cual sería un paso importante hacia la conservación de dicha cuenca.

²⁷ NEMIGA y TREVIÑO. Op. Cit.

²⁸ AREKHI, Saleh, et al. Mapping soil erosion and sediment yield susceptibility using RUSLE, remote sensing and GIS (Case study: Cham Gardalan Watershed, Iran). J. Adv. Environ. Biol, 2012, 6(1):109-124.

4. ANTECEDENTES

En 1933 Baver mostró la primera ecuación empírica para estimar la erosión del suelo, en la cual incorporo la permeabilidad del suelo, el tamaño de las partículas, la dispersión y la absorción de este, visto en Villa²⁹. Luego de esto en 1947 Musgrave, desarrollo una ecuación de perdida de suelo en la que introdujo un factor climático basado en la máxima precipitación el cual posteriormente fue conocido como el índice de erosividad R; Wischmeir y Smith³⁰ en 1965 el SCS y el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Perdida de Suelo de la Universidad de Purdue, desarrollaron una ecuación paramétrica simple la cual fue llamada USLE, Universal Soil Loss Equation. Luego de varias modificaciones en los parámetros del USLE, Renard et al³¹. en 1997 el USDA publicó en el Handbook de Agricultura 703, la denominada Ecuación Universal De Perdida de Suelos (RUSLE).

Desde el desarrollo de la USLE en 1965, alrededor de todo el mundo se han efectuado un gran número de investigaciones encaminadas a estimar la perdida de suelos debida a la erosión. En Colombia la empresa INTEGRAL S.A. realizo en el año 1985 un estudio en el que se calificó la susceptibilidad de las cuencas ubicadas en el Valle medio del Rio Cauca a la erosión hídrica; esta fue una de las primeras investigaciones acerca de los procesos erosivos del suelo realizado en este país.

Madero y Bergsma³², determinaron la erodabilidad y la erosión hídrica potencial en un sector de la cuenca del rio Otún en el departamento de Risaralda, este estudio

²⁹ VILLA, Sebastián. Modelación de la Erosión Hídrica a Escala de Cuenca en la Zona Alta de la Quebrada La Garcia, Municipio de Bello, Antioquia. 2012. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.

³⁰ WISCHMEIR y SMITH. Op. Cit.

³¹ RENARD Kenneth, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook, 1997. 703. USA.

³² MADERO, Edgar y BERSGAM, Eelco. Erodabilidad y Erosión Hídrica Potencial en un Sector de la Cuenca del Rio Otun- Colombia. Acta Agron, 1996. 46(1/4): 58-71.

permitió predecir el avance de la erosión laminar. Rivera³³ como resultado de su tesis doctoral, determino la susceptibilidad a la erosión de los suelos de ladera en la zona cafetera colombiana; en este estudio y usando un simulador de lluvias en condiciones de laboratorio, se determinó dos índices de erodabilidad K, uno por el método WEPP y otro por el USLE.

Posteriormente Pérez³⁴ presentó un modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia usando sistemas de información geográfica, como resultado de esta investigación se generó mapas del factor de erosividad para toda Colombia. Ramírez en el 2006 evaluó el riesgo de erosión potencial en la zona cafetera central usando el modelo RUSLE, los resultados de este trabajo fueron mostrados a través de un sistema de información geográfico (SIG).

En 2009 Alvarado et al.³⁵ estimaron la pérdida de suelos por erosión hídrica en sistemas productivos de papa *Solanum tuberosum* L. Esta investigación fue realizada en el municipio de Pasto, Departamento de Nariño, en este proyecto no se usaron métodos predictivos como el USLE o el RUSLE, para determinar la cantidad de suelo perdido utilizaron sedimentadores e implementaron un diseño experimental de bloques completamente al azar.

Una investigación realizada en el Departamento de Boyacá se desarrolló por Buitrago³⁶, el cual propuso un modelo para la visualización de la erosión hídrica en el municipio de Samacá; para este estudio se evaluó tres tipos de modelos de datos de elevación los cuales fueron el ASTER, el modelo de curvas de nivel y el SRTM,

³³ RIVERA, José. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, Colombia, 1999.

³⁴ PÉREZ. Op. Cit.

³⁵ ALVARO, Kevin, et al. Pérdida de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de producción con papa *Solanum tuberosum* L. Revista de Ciencias Agrícolas, 2011. 28(1): 64-72.

³⁶ BUITRAGO, Jeiner. Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de caso/Development of a visualization water erosion model in the municipality of Samacá (Boyacá). Case study. 2011. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.

resultando este último el que mejor represento el comportamiento del relieve en la zona de estudio.

Finalmente, en un estudio más reciente Villa³⁷ realizó una modelación de la erosión hídrica en la cuenca de la quebrada García en el municipio de Bello, departamento de Antioquia, en este estudio se utilizó la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE) y el método de erosión potencial (EPM) para posteriormente comparar los resultados obtenidos a partir de los dos métodos.

³⁷ VILLA. Op. Cit.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

- Estimar la tasa de pérdida de suelos por erosión y generar un mapa de pérdida de suelos en la cuenca del embalse de la Copa, a partir de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona de páramo correspondiente a la cuenca a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos.
- Evaluar el índice de erosividad de la lluvia y el índice de erodabilidad del suelo en la cuenca del embalse de la Copa (Boyacá).
- Elaborar mapas de erosión hídrica, erodabilidad del suelo y potencial erosivo por cobertura del suelo, de la cuenca del embalse de La Copa con la ayuda de un sistema de información geográfica (SIG).

6. MARCO TEÓRICO

6.1. CUENCA HIDROGRÁFICA

Resultado de la precipitación se produce un flujo superficial y subsuperficial hacia una gran cantidad de corrientes tributarias, las cuales al unirse van formando quebradas y ríos. El área total que drena hacia el río principal y sus tributarios se le denomina cuenca de drenaje. Suárez³⁸ muestra que el concepto de cuenca o microcuenca es básico en el análisis y diseño de obras para el control de la erosión.

Según el Código Nacional de los Recursos Naturales y el Decreto 1729 del 2002, una cuenca u hoya hidrográfica corresponde al área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar. La cuenca la delimita la línea divisoria de aguas o el divorcio de aguas, la divisoria de aguas corresponde a las alturas máximas que se encuentran alrededor del curso hídrico y sirven de límite demarcador externo entre dos cuencas colindantes. Estas líneas divisorias departen la precipitación que cae sobre un área determinada y la dirige a una u otra cuenca.

6.1.1. Pendiente de una cuenca

La pendiente de la cuenca es un factor muy importante para definir el momentum de una avenida de agua y el momentum a su vez refleja la magnitud de la avenida. Se requiere analizar tanto la pendiente del canal principal como la pendiente de los taludes y de los canales secundarios. Por esta razón es esencial para el análisis,

³⁸ SUÁREZ, D. Control de la Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda. 2001. ISBN 958-33-2734-4

que se describan las diferentes pendientes y no se resuma la información en un solo dato de la pendiente del canal principal. En ocasiones, según Suárez³⁹, se divide la cuenca en subcuencas y se calculan las pendientes de cada subcuenca. Las cuencas de mayor pendiente tienen una respuesta más rápida que las de menor pendiente.

6.1.2. Longitud de la cuenca

Suárez⁴⁰ reporta que la longitud de la cuenca se define usualmente, como la distancia medida a lo largo del canal principal de drenaje desde la salida de la cuenca hasta la divisoria de aguas en el extremo superior de la cuenca. El canal principal debe seguir la línea de mayores caudales.

6.1.3. Patrones de drenaje

Los patrones de drenaje son los ajustes que presentan las vías de drenaje, permanentes y transitorias que contribuyen a evacuar las aguas superficiales de la cuenca. Estos patrones son elementos compuestos para cuyos análisis se requieren tener en cuenta el relieve, la distribución de la vegetación y las condiciones estructurales de la zona.

Los patrones de drenaje fueron agrupados en cuatro categorías por Way y Botero citados por Londoño⁴¹ teniendo en cuenta el carácter de los procesos genéticos predominantes en ellos. Las categorías son: erosionales, deposicionales, especiales e individuales y se muestran a continuación:

³⁹ SUÁREZ. Op. Cit.

⁴⁰ Ibid.

⁴¹ LONDOÑO, Carlos. Cuencas Hidrográficas. Universidad Del Tolima, 2001.

- **Patrones de drenaje erosionales**

Son aquellos que, predominantemente, están causando procesos de erosión en la zona en la cual se presentan. A este grupo pertenecen los siguientes: dendrítico, pinnado, paralelo, subparalelo, radial, anular, trellis, rectangular y angular.

- **Patrones de drenaje deposicionales**

Son aquellos que se desarrollan en superficies donde los procesos dominantes son los sedimentarios, los más comunes son: reticular y distributivo.

- **Patrones de drenaje especiales**

Son aquellos que, por sus características tan particulares, no se pueden incluir en los otros grupos, entre estos se tienen: el multibasinal y el artificial.

- **Patrones de corrientes individuales**

De la dinámica de las corrientes individuales se derivan fenómenos geomorfológicos importantes y de acuerdo con la forma de su alineamiento en planta, los cauces naturales pueden clasificarse en: rectos, meándricos y cauces trenzados.

6.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO

Según López⁴² la degradación del suelo es una de las mayores amenazas al bienestar de la humanidad, esta afirmación se sostiene en la base de hechos como el crecimiento poblacional humano, las expectativas de calidad de vida y la escasez

⁴² LÓPEZ, R. Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación. Serie: Suelos y Clima SC-75. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela, 2002.

de recursos naturales. El suelo es un recurso limitado, de cuyo uso inapropiado, y de la implementación de pobres prácticas de manejo, resulta la degradación del suelo, manifestándose en una amplia gama de expresiones como lo son: la erosión hídrica, eólica, compactación, deterioro de la estructura, agotamiento de nutrientes, acidificación, salinización del suelo, entre otros. Alonso et al⁴³. mencionan que el suelo es un recurso que tiene una velocidad de degradación rápida pero su tasa de formación y regeneración son extremadamente lentas, por tanto, la degradación del suelo seguirá siendo un problema mundial importante para el siglo XXI debido a su impacto negativo sobre la productividad agronómica, el medio ambiente y su efecto en la seguridad alimentaria y la calidad de vida. Sin embargo, Lal⁴⁴ reporta los impactos sobre la degradación del suelo en la productividad son fácilmente enmascarados por el uso de insumos adicionales y la adopción de tecnologías mejoradas lo que ha llevado a algunos a cuestionar los efectos negativos de la desertificación.

Alonso et al⁴⁵. determinaron que la degradación del suelo está determinada por dos factores principales: deterioro físico y deterioro químico. El primero está intervenido por los cambios climáticos que conllevan a fuerte evaporación por altas temperaturas y aridez, distribución irregular de las precipitaciones y alteraciones en los periodos lluvia/sequias. Los cambios no climáticos están intervenidos por la erosión hídrica y eólica, la retención de la humedad y pérdida de componente más finos que componen el espesor y la aireación para la retención de la humedad y la infiltración que afecta permeabilidad, siendo esto la estructura del suelo.

En el caso del deterioro químico, los factores que intervienen según Alonso et al⁴⁶. son la salinización y alcalinización de suelos y aguas, reducción de fertilidad y

⁴³ ALONSO, Javier. et al. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Editum, 2011.

⁴⁴ LAL. Op. Cit.

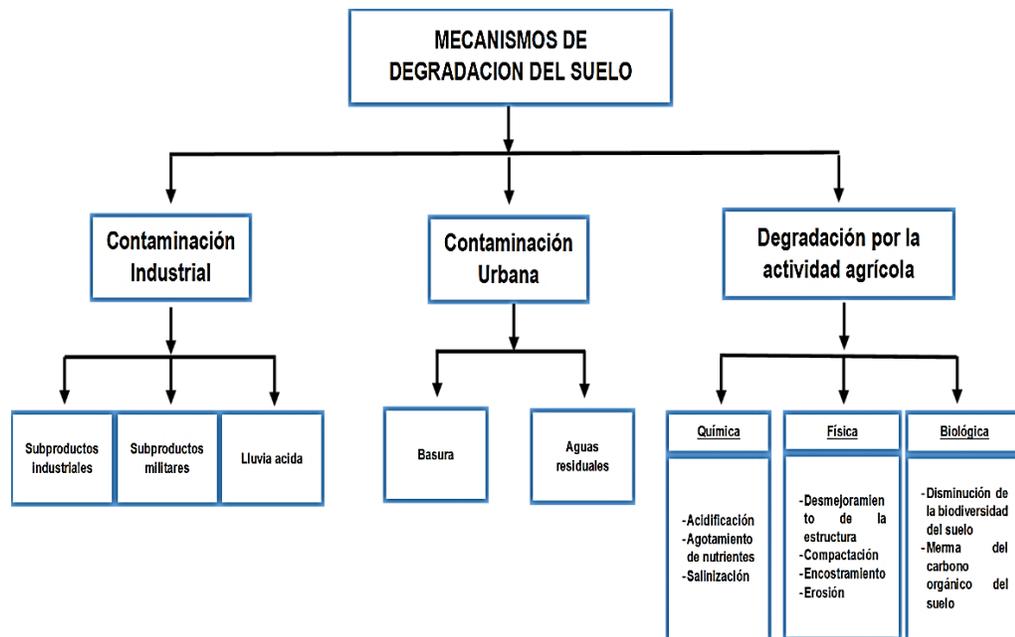
⁴⁵ ALONSO. Op. Cit.

⁴⁶ Ibid.

contaminación del suelo (toxificación) en la que actúan los productos fitosanitarios, fertilizantes, metales pesados, acidificación a causa de procesos como lluvia ácida y minería, residuos orgánicos de origen urbano y radioactividad.

Lal⁴⁷ clasifica la degradación de suelo diferente al descrito anteriormente, en el que considera que existen dos razones principales: la natural, debida a la acción de los procesos de formación del suelo y la antropogénica, debida a la acción del hombre; así mismo dentro de la acción antropogénica para la degradación del suelo tres condiciones importantes, que se describen en la Figura 1. Sobre esta acción antrópica López⁴⁸ considera que la contaminación de origen industrial es extremadamente severa en varios países en desarrollo e industrializados. La degradación asociada a la agricultura puede ubicarse en tres amplias categorías según su naturaleza química, física o biológica.

Figura 1. Mecanismos antropogénicos de degradación del suelo. Tomado de: Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación.



Fuente: López (2002)

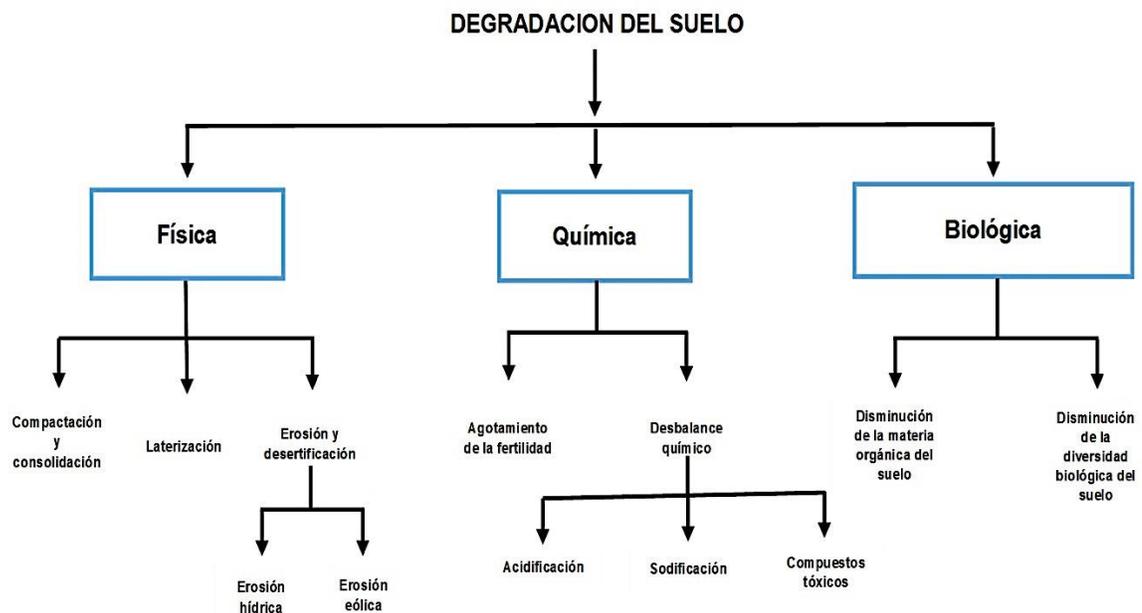
⁴⁷ LAL. Op.Cit.

⁴⁸ LÓPEZ. Op. Cit.

6.2.1. Procesos de degradación del suelo

Según López⁴⁹, los procesos de degradación del suelo son fenómenos dinámicos y frecuentemente interactuantes causantes de los cambios que resultan en la disminución de la calidad de los suelos. Se manifiestan de diversas maneras lo que ha dado lugar al establecimiento de diferentes tipos de degradación de suelos. Lal⁵⁰ y Steward (citado por López⁵¹), agrupan los procesos de degradación del suelo en tres tipos principales: degradación física, química y biológica (Figura 2). Cada uno de estos tipos incluye diferentes procesos de degradación, entre estos la erosión, el cual es el principal punto de estudio en este proyecto.

Figura 2. Tipos y procesos de degradación del suelo. Tomado de: Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación



Fuente: López (2002).

⁴⁹ LÓPEZ. Op. Cit.

⁵⁰ LAL. Op. Cit.

⁵¹ LÓPEZ. Op. Cit.

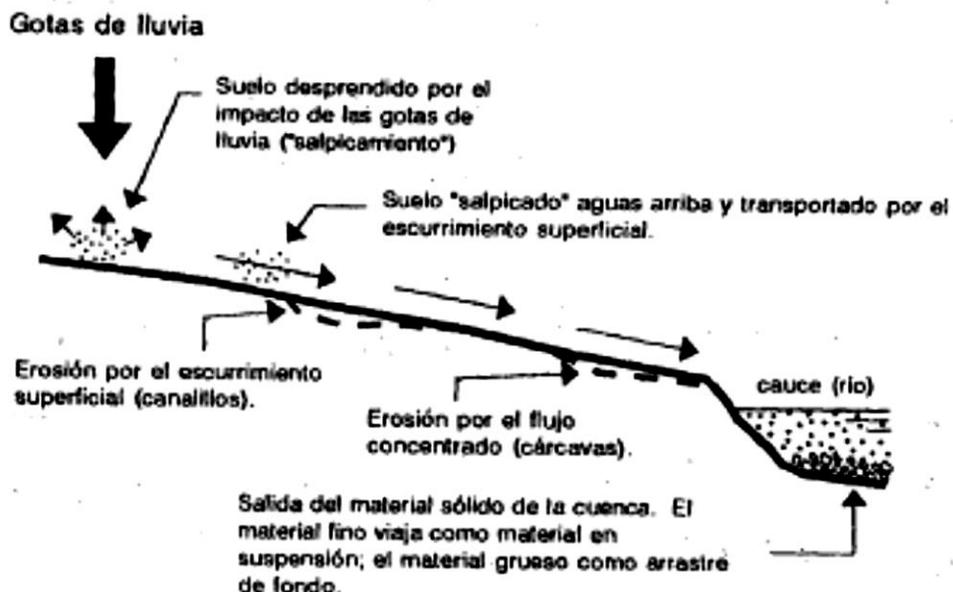
6.2.2. El proceso de erosión del suelo

Gracia⁵² considera que la pérdida de suelo en cuencas ocurre en tres fases principales: la remoción de partículas del suelo, el transporte, y el depósito de material sólido (sedimento). El sedimento viaja de las partes más altas de las cuencas hacia las más bajas. En algunos casos, el material sólido llega hasta los océanos, o bien se deposita en zonas interiores de la cuenca o en los embalses.

- **Remoción de partículas del suelo**

La remoción o erosión de las partículas del suelo se puede clasificar de la siguiente manera: erosión laminar, de canalillos, en cárcavas, en canales. (Figura 3). El proceso de erosión y una descripción más detallada de los tipos de erosión se describen en la sección 6.2.3.

Figura 3. Proceso de erosión en cuencas. Tomado de Manual de Ingeniería de Ríos



Fuente: Gracia (1996).

⁵² Gracia. Op. Cit.

- **Transporte de material sólido**

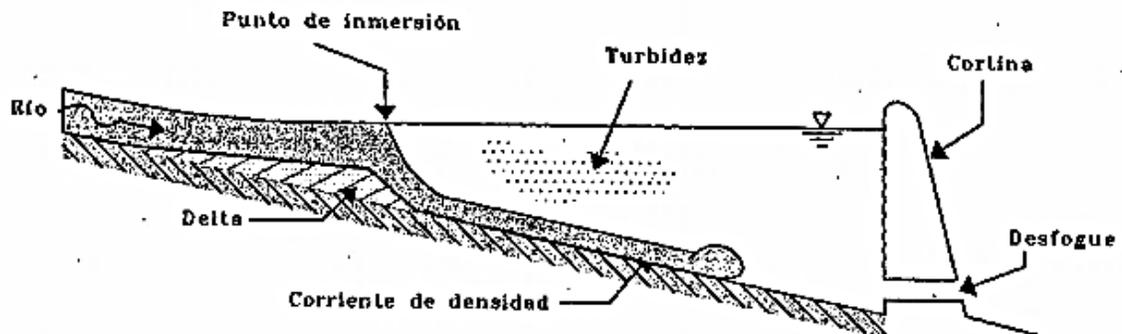
Existen dos formas básicas de transporte de sedimentos: de fondo y en suspensión. En la primera se transportan principalmente las partículas gruesas que provienen de la erosión de canales. En la segunda, se transporta el material fino proveniente tanto de la erosión laminar como de los canales; este material fino está constituido en muchos casos por material de lavado, este material de lavado se mueve siempre en suspensión, por lo cual su concentración es función del gasto líquido, este material puede abandonar la cuenca en cada evento lluvia-escurrimiento, esto no sucede con el material de fondo ya que este solo recorre pequeñas distancias en cada avenida.

- **Sedimentación**

Gracia⁵³ comenta que al interponer un obstáculo a un río, como es el caso de una presa, se origina un estancamiento, por lo cual el sedimento transportado se comporta según el siguiente mecanismo (Figura 4): al entrar la corriente al embalse, el material grueso se depositará según la disminución de la velocidad del agua por el efecto de ampliación del cauce y el crecimiento del tirante, formando en la “cola” del vaso una acumulación de sedimento grueso denominado delta. El sedimento más fino continuara hacia adentro del vaso como una corriente de densidad, para posteriormente al detenerse, depositarse en el fondo de este.

⁵³ GRACIA. Op. Cit.

Figura 4. Esquema general del comportamiento del sedimento dentro de un embalse. Tomado de Manual de Ingeniería de Ríos, capítulo 18 (Sedimentación en embalses).



Fuente: Gracia (1996).

La sedimentación antropogénica, según Ongley⁵⁴ es un problema mundial que suele estar especialmente asociado a la agricultura. Si bien no hay cifras mundiales, es probable que la agricultura, en sentido amplio, sea la causante de gran parte del aporte mundial de sedimentos a los ríos, lagos, estuarios y, finalmente, a los océanos. La contaminación provocada por los sedimentos tiene dos dimensiones principales; la primera es la dimensión física: pérdida de la capa arable del suelo y la degradación de la tierra como consecuencia de la erosión laminar y por cárcavas, que dan lugar a niveles excesivos de turbidez en las aguas receptoras y a repercusiones ecológicas y físicas en lugares alejados, los lechos de ríos y lagos, en donde se produjo la deposición. La segunda es la dimensión química: la parte de los sedimentos constituida por limo y arcilla (< 63 mm) es transmisora primaria de productos químicos adsorbidos, especialmente fósforo, plaguicidas clorados y la mayor parte de los metales, que son transportados por los sedimentos al sistema acuático.

⁵⁴ ONGLEY, E. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje-55). GEMS/Water Collaborating Center Canada Center for Inland Waters, 1997. 21-37.

6.2.3. Erosión

Según Villa⁵⁵ la erosión es un conjunto de procesos en la superficie de la corteza terrestre que producen pérdida física del subsuelo cultivable en grado variable. Esta erosión puede ocurrir de manera natural cuando se manifiestan las fuerzas de la gravedad en áreas montañosas o cuando el suelo queda expuesto por acción del agua o del viento. Aunque como ya se mencionó con anterioridad, las acciones humanas inciden sobre la dinámica hídrica y cambiando los procesos internos del suelo.

Suárez⁵⁶ define la erosión como el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. Es decir que la erosión del suelo es el proceso mediante el cual la superficie de la tierra es desgastada por la acción del viento, el agua, el hielo y la gravedad. La erosión natural o geológica es un factor en la creación de las características topográficas de la Tierra tal como la conocemos hoy en día. La erosión acelerada ocurre cuando la superficie de la tierra es perturbada y la vegetación se elimina por cualquiera de las fuerzas naturales o las actividades humanas. Expuesto, el suelo sin protección se somete luego a una rápida erosión por la acción del viento o el agua según el Departamento de manejo ambiental⁵⁷.

La erosión en cuencas, según Gracia⁵⁸, se debe principalmente a las lluvias y a los escurrimientos, reduciendo la productividad de las zonas de cultivo y conlleva a la pérdida de las características del suelo. Además, el sedimento producido degrada la calidad del agua y es un transporte de contaminantes químicos. La pérdida por erosión ocurre en tres fases: la remoción de las partículas, transporte y depósito del material sólido (o sedimento).

⁵⁵ VILLA. Op. Cit.

⁵⁶ SUÁREZ. Op. Cit.

⁵⁷ Department of Environmental Management. Soil Erosion and Sediment Control Handbook. 1989. Rhode Island State Conservation Committee.

⁵⁸ GRACIA. Op. Cit.

Rodríguez⁵⁹ describe el proceso de erosión se puede dividir en tres fases. La primera es el desprendimiento de partículas o porciones de roca madre o bien la rotura de los agregados del suelo. Este desprendimiento se produce habitualmente por la mera acción de la gravedad o con la ayuda de fuerzas como la acción del viento, del agua o del hielo; mientras que la rotura de agregados del suelo se produce por el impacto de las gotas de lluvia o granizo. En la segunda fase, las porciones y partículas desprendidas son transportadas por la acción de los agentes erosivos, principalmente por la gravedad, el agua y el viento. Durante su transporte, las partículas pueden actuar a su vez como agentes abrasivos que al impactar sobre la roca o el suelo provoca el desprendimiento de nuevas partículas o la rotura de otros agregados del suelo. Por último, en la tercera fase, se produce la deposición de las partículas cuando la energía de los agentes de transporte no es suficiente para seguir arrastrándolas o cuando éstas son retenidas en las irregularidades del terreno o por la vegetación. Cada una de estas fases está controlada por multitud de factores como el clima, la litología, la pendiente o los seres vivos y se rige por las leyes físicas que determinan el comportamiento de los distintos agentes que intervienen.

- **Erosión hídrica**

La erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras, según Bifani (1984, citado por Santacruz⁶⁰) es responsable de la erosión de 440 millones de hectáreas de tierras de las 747 millones que sufren erosión en Asia; de 227 millones de hectáreas de los 497 millones que son afectadas por este fenómeno en África;

⁵⁹ RODRÍGUEZ, Juan. Geomorfología de un sector de la cuenca de Almazán (Soria): procesos de erosión de suelos y planteamiento de escenarios ante el cambio climático. 2008. Tesis Doctoral. Universidad Complutense De Madrid.

⁶⁰ SANTACRUZ, G. Estimación de la Erosión Hídrica y su Relación con el Uso de Suelo en la Cuenca del Rio Cahoacán, Chiapas, México. Aqua-LAC, 2011. 3(1):45 – 54.

de 123 millones de hectáreas de 243 millones en América del Sur; de 115 millones de 219 millones en Europa, 106 en América del Norte y América Central. La erosión hídrica se puede dar de diferentes formas, los principales tipos de erosión hídrica son: erosión por gotas de lluvia, erosión laminar, erosión en surcos o canales, erosión en cárcavas, erosión en corrientes de agua, y erosión en masa.

- **Erosión por gotas de lluvia**

Según Sudas (citado por Vega y Pizarro⁶¹) el primer paso en el proceso de erosión hídrica comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie con una energía suficiente como para desplazar partículas de material sin consolidar, dando lugar al proceso denominado erosión por salpicadura o erosión por gotas de lluvia. Para Suárez⁶² la erosión gotas de lluvia ocurre por el impacto de las gotas sobre una superficie desprotegida, este impacto genera el desprendimiento y la remoción de capas delgadas de suelo. El golpe de las gotas de agua rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y parte fluye sobre la superficie.

Cruse et al. (citado por Parlak⁶³) comentan que el tipo de desprendimiento de suelo por el impacto de la lluvia depende de varias características del flujo hidráulico, incluyendo el tamaño y la masa de las gotas de lluvia, la velocidad de caída, la energía cinética y el ángulo de impacto de la gota.

⁶¹ VEGA y PIZARRO. Op. Cit.

⁶² SUÁREZ. Op, Cit.

⁶³ PARLAK, Mehmet; PARLAK, Altingul. Measurement of splash erosion in different cover crops. Turkish Journal of Field Crops, 2010. 15(2): 169-173.

- **Erosión laminar**

Valcarcel⁶⁴ explica que la erosión laminar consiste en la remoción de delgadas capas más o menos uniformes de suelo sobre una superficie. Es la forma menos perceptible del flagelo erosivo y, por ello, la más peligrosa. Cuando la infiltración es menos que la intensidad de la lluvia, el agua se acumula en la superficie del terreno y empieza a escurrir, esto produce un flujo superficial que arrastra a las partículas sueltas. Según Gracia⁶⁵ la erosión laminar aporta principalmente material fino que será transportado en los ríos como “carga de lavado” hasta salir de la cuenca o llegar a un embalse. Al continuar la acción de la lluvia y al mismo tiempo ocurrir el flujo se genera turbulencia, aumentando la capacidad de erosión. El flujo de agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimento. Por otro lado, Suárez⁶⁶ reporta que las áreas de cultivos no permanentes son extraordinariamente susceptibles a la erosión laminar al igual que los suelos sin vegetación y los sujetos a sobre pastoreo de ganado.

- **Erosión en surcos**

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Suárez⁶⁷ comenta que, al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión (Figura 5), formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles, pero poco a poco se van volviendo más profundos. Gracia⁶⁸ comenta que, en este tipo de erosión, el aporte de

⁶⁴ VALCARCEL, Ricardo. Estudio de los Procesos Erosivos en una Microcuenca: Zona Central de España - Puebla De Valles (Guadalajara). ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES. 1989. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

⁶⁵ GRACIA. Op. Cit.

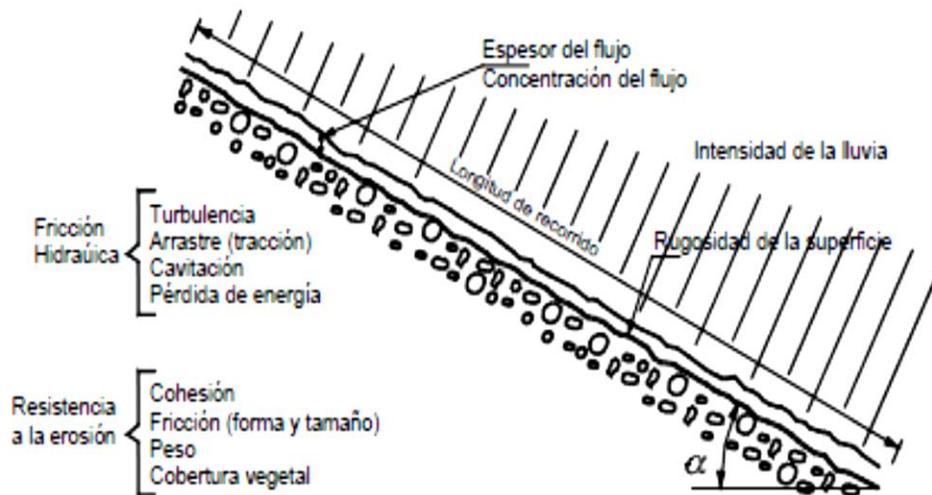
⁶⁶ SUÁREZ. Op. Cit.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ GRACIA. Op. Cit.

sedimentos depende de la capacidad erosiva de la corriente y de la resistencia del material del cauce.

Figura 5. Elementos que intervienen en la formación de surcos. Tomado de: Control de Erosión en Zonas Tropicales



Fuente: Suárez (2001).

Suárez⁶⁹ observó que a medida que la profundidad de los surcos va aumentando, los flujos adquieren velocidades cada vez mayores, La energía de este flujo concentrado empieza desprender partículas de suelo incorporándolas al flujo, convirtiendo estos microflujos concentrados en las rutas preferenciales de los sedimentos.

- **Erosión en cárcavas**

Cuando los surcos son de dimensiones tales que no desaparecen con el laboreo normal del suelo, se denominan cárcavas, estas van desde pequeños agrietamientos de unos cuantos centímetros hasta las grandes barrancas que en su

⁶⁹ SUÁREZ. Op. Cit.

salida pueden alcanzar varios metros de ancho y profundidad; en las cárcavas se presentan continuos deslizamientos de las paredes de los márgenes y, por consiguiente, una pérdida acelerada de suelo, según Gracia⁷⁰.

Suárez⁷¹ denomina cárcava a un canal de erosión con una sección superior a un pie². Estos canales ya no pueden ser eliminados con prácticas agrícolas, las cárcavas tienen una mayor capacidad de transporte de sedimentos que los surcos, debido a que las tasas de flujo son mayores. Las cárcavas actúan como cauces de concentración y transporte de agua y sedimentos, en este proceso una cárcava con cauce en V captura a las vecinas y va transformando su sección de una V ampliada a U. Al inicio las cárcavas son en V, pero generalmente terminan con forma en U. Las cárcavas son canales mucho más largos que los surcos, estas transportan corrientes concentradas de agua durante e inmediatamente después de las lluvias.

- **Erosión en corrientes de agua**

La erosión en corrientes de agua para Suárez⁷² se define por las corrientes de agua son volúmenes de agua en movimiento, los cuales debido a la fuerza tractiva de la corriente pueden producir el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas de suelo o sedimentos tanto en el fondo como en la ribera de la corriente. Así mismo Duque⁷³ La fuerza tractiva del agua vence la resistencia de los materiales, produciéndose procesos de socavación lateral y de fondo. Los procesos movilizan además de arcillas y limos, otros materiales como arenas, gravas, cantos y bloques, en las formas de acarreo y disolución, suspensión y acarreo de fondo. Los volúmenes movilizados por erosión fluvial son altos, en cauces erosionados.

⁷⁰ GRACIA. Op. Cit.

⁷¹ SUÁREZ. Op. Cit.

⁷² Ibid.

⁷³ DUQUE, Gonzalo. Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. 2003.

Los procesos de erosión en los ríos son muy complejos y obedecen a fenómenos hidráulicos y geomorfológicos, en los cuales interviene una gran cantidad de variables, algunas de los factores a tener en cuenta en la erosión de corrientes de agua son: La profundización del cauce, la inestabilidad lateral de la corriente, la sedimentación, el transporte de sedimentos, las olas producidas por el viento, los deslizamientos en la ribera de las corrientes, la dinámica fluvial y los efectos de la intervención antrópica según Suárez⁷⁴.

- **Erosión en masa**

Según Duque⁷⁵ incluyen los fenómenos de desprendimiento transporte y deposición de grandes masas de suelo por acción de la fuerza del agua en movimiento. Es causada por movimientos rápidos a muy rápidos de mezclas viscosas de agua y materiales térreos, que avanzan a lo largo de los cauces o sobre las depresiones del terreno y valles de salida de las corrientes. Según Gray y Sotir en 1996 (citados por Suárez⁷⁶), el fenómeno de erosión en masa incluye los siguientes tipos de movimientos: la reptación, los flujos de tierra, los flujos de lodo, los flujos de detritos, los flujos hiperconcentrados, y las avalanchas.

⁷⁴ SUÁREZ. Op. Cit.

⁷⁵ DUQUE. Op. Cit.

⁷⁶ SUÁREZ. Op. Cit.

7. METODOLOGÍA

7.1. MARCO ESPACIAL

La información del marco espacial fue obtenida del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Toca – Boyacá. Aquí se hace una descripción general de la cuenca del embalse de la Copa incluyendo sus subcuencas y microcuencas, también se describen aspectos generales del municipio de Toca.

7.1.1. Cuenca del embalse de La Copa

La cuenca del embalse de La Copa está conformada por los municipios de Siachoque, Toca, Tuta, Chivata, Pesca, Rondon y Soraca; de la cual más del 50% pertenece al municipio de Toca; las aguas de la cuenca convergen en el embalse de La Copa. El Embalse de la Copa fue construido en 1.984 por el HIMAT y fue inaugurado en 1989; se ubica aguas abajo de la confluencia del Río Chorrera y el Río Cormechoque. La cuenca cubre un área aproximada de 32.600 ha. y 307 Km² aproximadamente. Recibe las aguas de las cuencas hidrográficas de los Ríos Siachoque, Cormechoque, Toca, Tuta, Chorrera y las quebradas de Tuaneca, Tocavita, La Raiba y Leonera.

El embalse de La Copa suministra agua para riego a los municipios del Alto Chicamocha (Paipa, Duitama, Sogamoso, Tibasosa y Nobsa). La administración del embalse se encuentra a cargo de la Asociación de Usuarios del distrito de Riego del Alto Chicamocha.

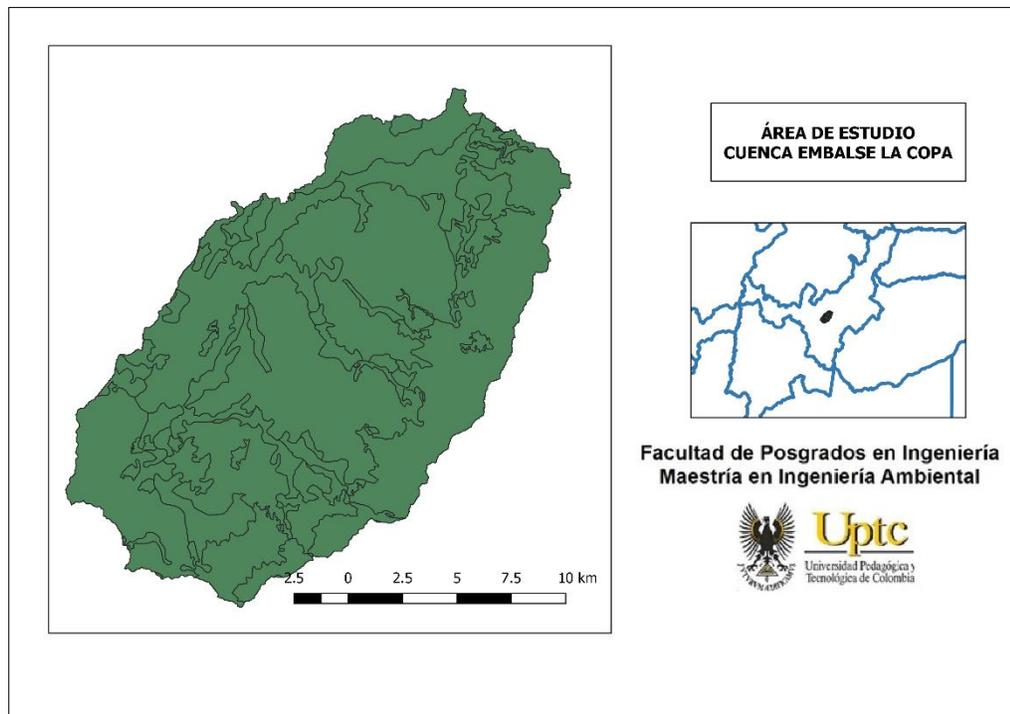
Debido a la actividad agrícola intensa (papa, cebolla, cebada y trigo) y aguas residuales municipales el ecosistema se ha catalogado como altamente frágil al deterioro de la calidad del agua como consecuencia de la eutrofización.

Otras características del embalse son:

- ✓ Dirección dominante W-E
- ✓ Humedad relativa media 77%
- ✓ Temperatura media 14.5°C 14.7 °C
- ✓ Capacidad potencial 70 Mm³
- ✓ Volumen útil 55 Mm³
- ✓ Profundidad máxima 33.5 m

La cuenca del embalse de La Copa (figura 6) está ubicada sobre una altiplanicie formada por un ramal de la cordillera oriental llamado Cordillera magistral, en el sector nororiental del departamento de Boyacá, se encuentra entre los pisos térmicos frío y páramo, la topografía en la cuenca es plana a ligeramente ondulada; dentro de los principales accidentes geográficos cabe citar el cerro de Rativa, El Alto de La Copa, Alto de Santo Eccehomo, el Páramo de la Cortadera, el Cerro de Tibamoa, la Serranía de las Cruces, El alto de Mesitas y el Páramo de Vergara. Las subcuencas más representativas son las de los ríos Grande (Cormechoque), Toca y Chorrera, y como desagüe del embalse de La Copa se forma el río Tuta que pertenece a la cuenca del Chicamocha.

Figura 6. Área de estudio de la Cuenca del Embalse la Copa en el departamento de Boyacá, Colombia



- **Clima**

El clima es un factor básico para la evaluación y planificación del ambiente en cuanto regular el uso, conservar los recursos naturales y lograr la sostenibilidad de los servicios que presta la cuenca. Para esta información se tomaron Datos del IDEAM, de las estaciones de San Pedro, Garrocho, El Hotel, Casa Amarilla, San Cristóbal y La Copa, con periodos de registro desde 1971 hasta 1999.

- ✓ Temperatura media: 14°C a 15°C
- ✓ Humedad relativa: el promedio de humedad varía entre 75 y 78%.
- ✓ Evaporación: la evaporación media es de 1296.6mm.

- ✓ Precipitación: La precipitación pluvial anual es de 1747.9mm (estación Garrocho-parte alta del municipio de Toca) siendo la mayor precipitación mensual en octubre y noviembre, y la menor en diciembre y enero.

- **Flora**

- ✓ Rio Chorrera: las actividades del sector son agricultura y pastoreo, y su vegetación está compuesta por chilcos, tunos, moras, mortiños helechos, jarillas, curubas y toronjas nativas entre otras.
- ✓ Quebrada Paso Grande: la vegetación es diminuta, se observan cultivos de papa, zonas de pastoreo, vegetación nativa algunos reductos de tuno, encenillo, jarilla, romero y algunas hierbas, raque, cacique, espino y algunos líquenes entre otros.
- ✓ Quebrada De Raiba: está quebrada solo vierte sus aguas a la represa de La Copa en época de lluvias fuertes, por lo demás está quebrada ha desaparecido. Algunas plantas como bejuco, yarumo, quiche, aliso, chilco, cacique, chilca, cortadera, savila, encenillo, entre otros.
- ✓ Rio Toca: la vegetación predominante es de raque, espino, encenillo, Tobo, aliso entre otras. Se observan las márgenes del río marcadas por la frontera agrícola y gran parte de la vegetación es exótica. Se encuentran eucaliptos, vegetación nativa (laurel) gran parte del terreno se dedica a pastoreo y rastrojos y cultivos.
- ✓ Embalse de La Copa: existe desaparición total de la vegetación nativa y exótica, solo se limita algunos ejemplares y en su mayor parte son rastrojos. Este embalse se convirtió en una empresa de servicios como la pesca (trucha arcoíris).
- ✓ Zona de Páramos: presenta amenaza debido a la ampliación de la frontera agrícola, las quemadas y la falta de reglamentación de estos sectores.

7.2. DISEÑO METODOLÓGICO

7.2.1. Definición de hipótesis

Los suelos en la cuenca del Embalse de la Copa se encuentran en un avanzado y constante deterioro debido a la erosión por las inadecuadas prácticas de cultivo y la devastación de la cubierta vegetal favorece la pérdida de suelo.

7.2.2. Recopilación de información existente

La obtención de datos es el primer paso para el estudio y planificación integral de una cuenca hidrográfica, la información existente para la cuenca hace referencia a información climática como la precipitación, vientos, evaporación, temperaturas, humedad; esta información se obtuvo de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio. También se obtuvo información cartográfica en formato shapefile de la provincia centro del departamento de Boyacá, con el fin de realizar la delimitación de la cuenca del embalse de La Copa, esta información fue suministrada por la Corporación autónoma regional de Boyacá (Corpoboyaca). Se obtuvo fotografías aéreas del IGAC e imágenes satelitales de la zona de estudio (imágenes de sensores remotos), además del estudio general de suelos escala 1:100.000 del IGAC realizado en el 2005 y el mapa de cobertura, Corin Land Cover realizado por el ministerio de Ambiente en el año 2010.

7.2.3. Delimitación de la cuenca

Los datos cartográficos de este estudio fueron obtenidos a partir de shape files de la hidrología del Departamento de Boyacá, suministrados por la corporación autónoma regional de Boyacá (Corpoboyaca). Para el desarrollo de los procedimientos cartográficos se usó sistemas de información geográficos mediante el software ArcGis 10.1. La delimitación de la cuenca del embalse de La Copa se

llevó a cabo mediante la extensión ArcSWAT, la cual es una herramienta para la evaluación del suelo y el agua en cuencas hidrográficas. Una vez delimitada la cuenca, esta fue exportada en formato shapefile, el cual sirvió de base para toda la mapificación del proyecto.

7.2.4. Estudio pluviométrico

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

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

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

Fuente: IDEAM (2015)

7.2.5. Estudio cartográfico y de cobertura vegetal

Mediante el sistema de información geográfica (SIG) y a partir de los datos obtenidos de la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE), fueron obtenidos mapas de erosividad del suelo, erodabilidad del suelo, factor LS de longitud y grado de la pendiente, factor de cobertura y factor de prácticas de manejo, estos mapas finalmente se sobrepusieron para generar el mapa de pérdidas de suelo en la cuenca con el cual se pudo estimar la tasa de pérdida de suelos.

7.2.6. Detección de cambios en la cobertura vegetal en el páramo de La Cortadera

Se realizó un mapa base de la cobertura vegetal del páramo de La Cortadera utilizando fotografías aéreas de la cuenca, estas fotografías correspondieron a la época más actual disponible, año 2012. De la misma manera se contó con fotografías aéreas antiguas, la del año 1985 fue obtenida de Landsat 4-5TM, mientras que para el 2012 la imagen fue obtenida de Landsat 7 ETM.

Las fotografías aéreas son de escala 1:100.000, estas se les aplicó la digitalización con posterior creación de los polígonos, usando para esto los píxeles de las imágenes. Se generaron dos mapas, uno por año evaluado y sobre este se clasificaron las unidades del paisaje para realizar una sobreposición cartográfica y la cuantificación del páramo. Las unidades de paisaje que se clasificaron fueron la vegetación herbácea, la vegetación de páramo, las zonas abiertas con poca vegetación y agua.

7.2.7. Ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)

Para la estimación de la erosión hídrica se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) una variante de la ecuación USLE, la USLE estima las

pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un periodo representativo de años que se producen en una superficie de terreno debidas a la erosión superficial ante unas determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo, tal como lo describe González⁷⁷.

La ecuación RUSLE permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo, mediante la RUSLE se determinan sectores críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos tolerables, permitiendo además elegir la práctica de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable, como lo reporta Oñate-Valdivieso⁷⁸.

La expresión general de la RUSLE (1) es:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Dónde:

A: pérdida de suelo (t/ha/año).

R: Erosividad de la lluvia (MegaJoules mm/ha hr año)

K: Erosionabilidad del suelo (t/hr/MJ mm)

LS: es el factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente)

C: Factor por cubierta vegetal (adimensional).

P: Factor por prácticas de manejo (adimensional).

- **Factor de erosividad de la lluvia (R)**

Wischmeier y Smith⁷⁹ propusieron una ecuación para calcular la erosividad de la lluvia, denominada el factor R; el cual es definido como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en un tiempo de 30 minutos

⁷⁷ GONZÁLEZ, Marta. La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología, 1991. 5: 133-150.

⁷⁸ OÑATE-VALDIVIESO, Fernando. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. Revista electrónica de la REDLACH, Loja, Ecuador, 2004, 1(1): 27-32.

⁷⁹ WISCHMEIER y SMITH, Op. Cit.

(EI_{30}), como lo explica Suárez⁸⁰. Según Echeverri y Obando⁸¹ el EI_{30} es una medida de la manera de cómo se relacionan la intensidad de una tormenta con su energía, e indica como el desprendimiento de las partículas causado por la lluvia, es combinado con la capacidad de transporte de estas.

Los datos para calcular el factor R se obtienen de pluviogramas de registro diario, los cuales no se encuentran en la zona de estudio donde se tienen datos de precipitaciones mensuales; debido a esta dificultad para hallar el factor R, varios autores han propuesto métodos alternativos para definir la erosividad de la lluvia, algunos de ellos; como el índice de Fournier modificado (IFM) propuesto por Arnoldus⁸², tiene correlación con el factor R como lo reporto Ramírez⁸³, quien con este índice, estimo la erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas, similar al trabajo de Echeverry y Obando⁸⁴. Por otro lado; Oliver⁸⁵, propone el índice de concentración de las precipitaciones ICP, el cual a partir de datos mensuales y anuales es capaz de estimar la agresividad de las lluvias mediante la variabilidad temporal de las precipitaciones.

Con el fin de obtener una aproximación que permita determinar el factor R a partir del IFM, se utilizó la ecuación propuesta por Ramírez⁸⁶, (2), en la cual encontró una correlación ($r = 0,84$), entre el EI_{30} reportado por Rivera⁸⁷, en su estudio sobre la determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la

⁸⁰ SUÁREZ. Op. Cit.

⁸¹ ECHEVERRI, Leyder; OBANDO, Humberto. Erosividad de las Lluvias en la Región Centro-Sur del Departamento de Caldas, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, 2010. 63(1).

⁸² ARNOLDUS. Op. Cit.

⁸³ RAMÍREZ, F. Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad de Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué, 2006.

⁸⁴ ECHEVERRY y OBANDO. Op. Cit.

⁸⁵ OLIVER, John E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. The Professional Geographer, 1980. 32 (3): 300-309.

⁸⁶ RAMÍREZ. Op. Cit.

⁸⁷ RIVERA, J. Determinación de los Índices de Erosividad, Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risalda). Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia (Tesis Master Science), 1990.

zona cafetera central colombiana, y el Índice de Fournier Modificado propuesto por Arnoldus⁸⁸.

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

Donde:

R: Erosividad en $MJ*mm*ha^{-1}$

IFM: Índice de Fournier Modificado

El índice R se clasifico según lo propuesto por Rivera y Gómez⁸⁹, citado por Escobar y Obando⁹⁰: Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del factor R

Erosividad R (MJ.mm.ha⁻¹)	Clasificación
<1000	Natural
1000 – 2500	Muy Baja
2500 – 5000	Baja
5000 – 7500	Moderada
7500 - 10000	Alta
10000 - 15000	Muy Alta
15000 - 20000	Severa
>20000	Extremadamente Severa

Fuente: Rivera y Gómez, (1991), citado por Tafur y Obando, (2010).

⁸⁸ ARNOLDUS. Op. Cit.

⁸⁹ RIVERA, P.; GÓMEZ, A. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Cenicafé, 1991. 42 (2):37-52.

⁹⁰ ESCOBAR y OBANDO. Op. Cit.

- **Índice de Fournier modificado**

El índice de Fournier modificado o IFM es propuesto por Arnoldus⁹¹; este es una corrección del índice de Fournier (IF), en el cual solo se consideraba la precipitación del mes más húmedo del año; Arnoldus⁹² propone que sea tomada en cuenta la precipitación de todos los meses del año, el IFM caracteriza, según Velasco y Cortes⁹³, la agresividad de la precipitación.

Para el cálculo del Índice de Fournier Modificado se usó la ecuación propuesta por Arnoldus 1980, (3):

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (3)$$

Donde:

IFM: índice de Fournier modificado en *mm*

P_i: precipitación del mes *i* en *mm*.

P: precipitación total anual, en *mm*.

El IFM se calculó para cada año en cada una de las estaciones presentes en la zona de estudio, posteriormente se promedió el periodo de 20 años por estación dando como resultado el IFM para cada estación. Finalmente, este índice se clasificó de acuerdo a los rangos propuestos por Gabriels et al.⁹⁴ (Tabla 3).

⁹¹ ARNOLDUS. Op. Cit.

⁹² Ibid.

⁹³ VELASCO, I.; CORTÉS, G. Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. En Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes, (Murcia, 2009) = Advances in studies on desertification: contributions to the International Conference on Desertification in memory of professor Jo. Universidad de Murcia, 2009. 431-434.

⁹⁴ GABRIELS. Op. Cit.

Tabla 3. Categorías de clasificación para el índice de Fournier modificado en Latinoamérica.

Índice de Fournier Modificado (IFM)	Clasificación
0 – 60	Muy Bajo
60 – 90	Bajo
90 – 120	Moderado
120 – 160	Alto
>160	Muy Alto

Fuente: Gabriels et al. (2004).

- **Índice de concentración de las precipitaciones ICP**

Con el propósito de determinar la variabilidad temporal de las precipitaciones se utilizó la ecuación del ICP propuesta por Oliver⁹⁵; (4). El valor del índice de concentración de las precipitaciones proporciona un gran interés, teniendo en cuenta la importancia de la precipitación en la erosión del suelo, la cual, genera una dinámica más activa cuanto mayor es la concentración en el tiempo de las precipitaciones, según Jordán y Bellinfante⁹⁶. El ICP se calculó para cada año en el periodo de 1992 al 2011, posteriormente fue promediado para cada estación y clasificado según la tabla 4, propuesta por Gabriels et al⁹⁷.

$$ICP = \sum_1^{12} \frac{P_i^2}{P_t^2} * 100 \quad (4)$$

⁹⁵ OLIVER. Op. Cit.

⁹⁶ JORDÁN, Antonio; BELLINFANTE, Nicolás. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). Edafología, 2000, 7(3): 83-92.

⁹⁷ GABRIELS, D., et al. Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. Montevideo: Unesco, 2004.

Donde:

$ICP = \text{Índice de Concentración de las Precipitaciones } \%$

$P_i = \text{Precipitación mensual}$

$P_t = \text{Precipitación anual}$

Tabla 4. Clasificación del índice de concentración de las precipitaciones

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

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

- **Factor de erosionabilidad del suelo (K)**

Según Antezana⁹⁸ el factor K es una compleja propiedad que se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración.

Para cada suelo se mide la relación entre el peso de suelo perdido ($t. ha^{-1}$) y el número de unidades del índice de erosión pluvial correspondientes, en condiciones sin cultivo continuo. Con el conjunto de valores obtenidos se calcula el promedio de K para cada suelo, a partir del cual se establece una ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas. Los suelos

⁹⁸ ANTEZANA, J. Calibración de los factores de erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña. Taquiña, Bolivia: Centro de Levantamientos Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos, 2001.

generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena.

El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil del suelo en la pérdida de suelo. Los valores de K son asignados usando la ecuación del nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, %MO, código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil.

Renschler et al.⁹⁹ reportaron que los suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de K (0.05-0.15), porque ellos son resistentes al desprendimiento. Suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tiene valores bajos de K (0.05-0.2), debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles. Suelos de textura mediana (franco limoso) tienen valores de K moderados (0.25-0.4), porque son moderadamente susceptibles al desprendimiento y producen moderados escurrimientos.

Para el cálculo del factor de erodabilidad K se utilizó el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá del año 2005. A partir de dicho estudio y de los shapefiles de suelos del departamento de Boyacá, previa delimitación de la cuenca, se procedió a distinguir cada uno de los perfiles de suelo presentes en la cuenca; por medio de esta información se pudo corroborar las características físicas y químicas de estos perfiles; teniendo en cuenta datos como el porcentaje de carbono orgánico, el porcentaje de limo, de arcilla, y de arena, además de esto en la descripción de los perfiles de suelo se pudo identificar el tipo de estructura y la permeabilidad de los mismos.

⁹⁹ RENSCHLER, C et al. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk—rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain. *Catena*, 1999, vol. 34, no 3-4, p. 209-225.

El factor K, se calculó por medio de una variación de la ecuación presentada por Wischmeier y Smith¹⁰⁰, la cual fue propuesta por Abernethy (1986) (5):

$$K = \frac{2,1(L^2 + LA)^{1,14} (10^{-4})(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)}{100} 1,292 \quad (5)$$

Donde:

$$K = \text{Factor de Erodabilidad} \frac{t * ha * h}{tm * mm * ha}$$

L = % de Limo

A = % de Arena

a = % de materia orgánica

b = clasificación de la estructura

c = clasificación de la permeabilidad

Con el fin de hallar el porcentaje de materia orgánica a partir del porcentaje de carbono orgánico se utilizó el factor de Vam Bemmelen según Lunt¹⁰¹ (6):

$$\%MO = \%CO * 1.724 \quad (6)$$

Donde:

MO = materia orgánica

CO = Carbono orgánico

La clasificación de la estructura y la permeabilidad del suelo (tablas 5 y 6), está dada según lo establecido por Renscheler et al¹⁰²..:

¹⁰⁰ WISCHMEIER y SMITH. Op. Cit.

¹⁰¹ LUNT, Herbert. The carbon-organic matter factor in forest soil humus. Soil Sci, 1931, 32 (27): e33.

¹⁰² Renscheler et al. Op. Cit.

Tabla 5. Clasificación de la estructura del suelo

Estructura	Tipo
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular gruesa
4	Bloques

Fuente: Renscheler et al. (1999).

Tabla 6. Clasificación de la permeabilidad del suelo

Textura clase	Permeabilidad código	Conductividad hidráulica saturada [mm/hr]	SCS Grupo Hidrológico de suelo
Arcilla, franco arcilloso	6	<1	D
Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	5	1-2	C-D
Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	4	2-5	C
Franco limoso, franco	3	5-10	B
Areno francoso, franco arenoso.	2	10-60	A
Arena	1	>60	A

Fuente: Renscheler et al. (1999).

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm, superiores del suelo y los de permeabilidad a todo su perfil. Los valores más elevados calculados para K son de 0.92 y corresponden a suelos en que la fracción limo más arena muy fina, representa virtualmente la totalidad de la muestra y es nulo el contenido de materia orgánica.

- **Factor de longitud y pendiente (LS)**

El factor LS integra la pendiente media de la ladera y su longitud, considera el efecto de la topografía sobre la erosión. La pendiente (S) refleja la influencia de la gradiente de la pendiente en la erosión ya que el potencial de erosión incrementa con la

pendiente, la longitud (L) se define como la distancia horizontal entre el punto donde inicia el escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente al grado de producir la sedimentación o hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un curso bien definido.

- **Longitud de la pendiente (L)**

La longitud de pendiente se define como la distancia horizontal desde el origen de un flujo hasta el punto, donde el gradiente de la pendiente se reduce lo suficiente como para que la deposición comience y el escurrimiento llega a ser concentrado en un canal definido. Para su cálculo se utilizó la fórmula propuesta por Renscheler¹⁰³ et al. (7):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m \quad (7)$$

Donde:

L = Factor de longitud de pendiente

λ = Longitud de la pendiente [metros]

m = Exponente de la longitud de la pendiente

22.13 = Longitud de parcela unitaria RUSLE

La longitud de pendiente λ , es la proyección horizontal, no la distancia paralela a la superficie del suelo. Para el cálculo del factor LS, se utilizó una longitud constante de pendiente igual a 100 metros.

El exponente de longitud de pendiente **m**, determina la relación entre erosión en surcos (causada por flujo) y erosión entresurcos (causado por impacto de gotas de lluvia) Antezana⁹⁹, puede ser calculado con la siguiente ecuación (8):

¹⁰³ Renscheler et al. Op. Cit.

$$m = 0,1342 * LN(\theta) + 1,192 \quad (8)$$

Donde:

m = Exponente de la longitud de la pendiente

θ = Angulo de pendiente [%]

- **Inclinación de la pendiente (S)**

La inclinación de la pendiente refleja la influencia de la gradiente de la pendiente en la erosión. El potencial erosivo aumenta a medida que la pendiente aumenta. Para pendientes mayores a 5 metros se debe usar las siguientes ecuaciones, según Renscheler et al.¹⁰⁴ (9):

$$\begin{aligned} S &= (10,8 * \text{sen}\theta + 0,03) \text{ Cuando } S < 9\% \\ S &= (16,8 * \text{sen}\theta - 0,5) \text{ Cuando } S \geq 9\% \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

S = Inclinación de pendiente [%]

θ = Angulo de pendiente [°]

El factor de longitud y pendiente (LS) es el producto de la multiplicación de la longitud de la pendiente por la inclinación de la pendiente. Los rangos de pendiente se establecieron según lo propuesto por el IGAC en el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá del año 2005, para el que se creó la tabla 7.

¹⁰⁴ Ibid.

Tabla 7. Rangos de pendiente en el departamento de Boyacá propuesto por el IGAC

Pendiente (%)	Topografía
0-3	Plana, plana-cóncava
3-7	Ligeramente inclinada y ondulada
7-12	Moderadamente inclinada, ligeramente quebrada y moderadamente ondulada
12-25	Fuertemente inclinada, moderadamente quebrada y fuertemente ondulada
25-50	Ligeramente empinada, fuertemente quebrada y ligeramente escarpada
50-75	Moderadamente empinada y escarpada
>75	Fuertemente empinada y moderadamente escarpada

Con el fin de obtener la pendiente en porcentaje de la cuenca, se generó en el software SIG ARCGIS 10.1 un modelo de elevación digital a partir de la cuenca previamente delimitada y con la ayuda del shapefile de curvas de nivel del departamento de Boyacá, suministrado por la corporación autónoma regional de Boyacá (Corpoboyaca). Una vez se ha obtenido el DEM correspondiente a la cuenca, este se reclasificó para mostrar las pendientes en porcentaje; posterior a esta reclasificación se exportó el raster a formato shape convirtiéndolo a un mapa de polígonos el cual sirvió de base para representar el factor LS hallado mediante la fórmula propuesta por Renscheler et al¹⁰⁵.

- **Factor por cubierta vegetal (C)**

El factor C es usado para reflejar el efecto de los cultivos y prácticas de manejo en las tasas de erosión. Este factor mide como el potencial de pérdida de suelo será distribuido en el tiempo durante la construcción de actividades, rotación de cultivos, y otros esquemas de manejo según Antezana¹⁰⁶. Para la determinación del factor por cubierta vegetal se utilizó el mapa de coberturas corin land cover realizado en el año 2010 por el Ministerio de Ambiente, realizando a su vez una verificación supervisada en campo, se analizó cada una de las coberturas definidas y se otorgó

¹⁰⁵ RENSCHERLER et al. Op. Cit.

¹⁰⁶ ANTEZANA. Op. Cit.

un valor relativo de factor C, en base a lo reportado en diferentes fuentes bibliograficas, Tabla. 8, teniendo en cuenta que la susceptibilidad a la erosión es menor si se conserva la cobertura vegetal original y estableciendo una escala de susceptibilidad a la erosión de 0 a 1 siendo (1) el mayor grado de susceptibilidad, y (0), el menor grado de susceptibilidad, como lo reportan Ceballos y Toro¹⁰⁷.

Tabla 8. Valores de susceptibilidad a la erosión, Factor C para cada tipo de cubierta del suelo.

Tipo de cobertura	Factor C	Fuente bibliográfica
Tierras desnudas y degradadas	1	Pacheco, et. al, 2014
Mosaico de pastos y cultivos	0,435	Pacheco, et. al, 2014
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,435	Pacheco, et. al, 2014
Plantación forestal	0,0055	Galvis, 2008
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	0,01	Galvis, 2008
Tejido urbano discontinuo	1	Salazar, 2012
Pastos limpios	0,13	Salazar, 2012
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,13	Salazar, 2012
Cuerpos de agua artificiales	0	Pacheco, et. al, 2014
Arbustal abierto	0,01	Galvis, 2008
Granado con cobertura de malas hierbas	0,08	Galvis, 2008
Mezcla de pasto y leguminosas	0,004	Galvis, 2008
Frutales	0,525	Pacheco, et. al, 2014
Espacios con vegetación escasa	0,9	Pacheco, et. al, 2014
Tejido urbano continuo	1	Pacheco, et. al, 2014
Terrenos regados permanentemente	0,507	Salazar, 2012
Zonas de extracción minera	1	Salazar, 2012
Sabana o pradera herbácea sobrepastada	0,1	Pacheco, et. al, 2014

Fuente: Pacheco et al. (2014); Galvis (2008) y Salazar (2012).

¹⁰⁷ CEBALLOS, Darney; TORO, Luis. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el Municipio de Anorí, Antioquia, Colombia. Gestión y Ambiente, 2012, 15(3): 51-63.

- **Factor por practicas de manejo (P)**

El factor P, según Oñate- Valdivieso¹⁰⁸, considera las pérdidas del suelo con respecto a las prácticas de labranza en pendiente, tendientes a disminuir esta pérdida. Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento influyen directamente en la conservación o no del suelo. Para las prácticas de soporte de tierras cultivadas, generalmente incluye cultivo a nivel, cultivos en faja y terrazas.

Para calcular el Factor P se identificaron los sitios con presencia de medidas de conservación del suelo, otorgándose el valor de 1 a los sectores carentes de medidas conservacionistas, el factor P varía según la pendiente y sus valores pueden obtenerse en la tabla 9, como lo sugiere Suárez¹⁰⁹.

Tabla 9. Factor P de practicas de conservación. Tomado de: Control de Erosión en Zonas Tropicales

Pendiente %	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Terrazas
1-2	0.60	0.30	0.12
3-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

Fuente: Suárez (2001).

¹⁰⁸ OÑATE-VALDIVIESO. Op. Cit.

¹⁰⁹ SUÁREZ. Op. Cit.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

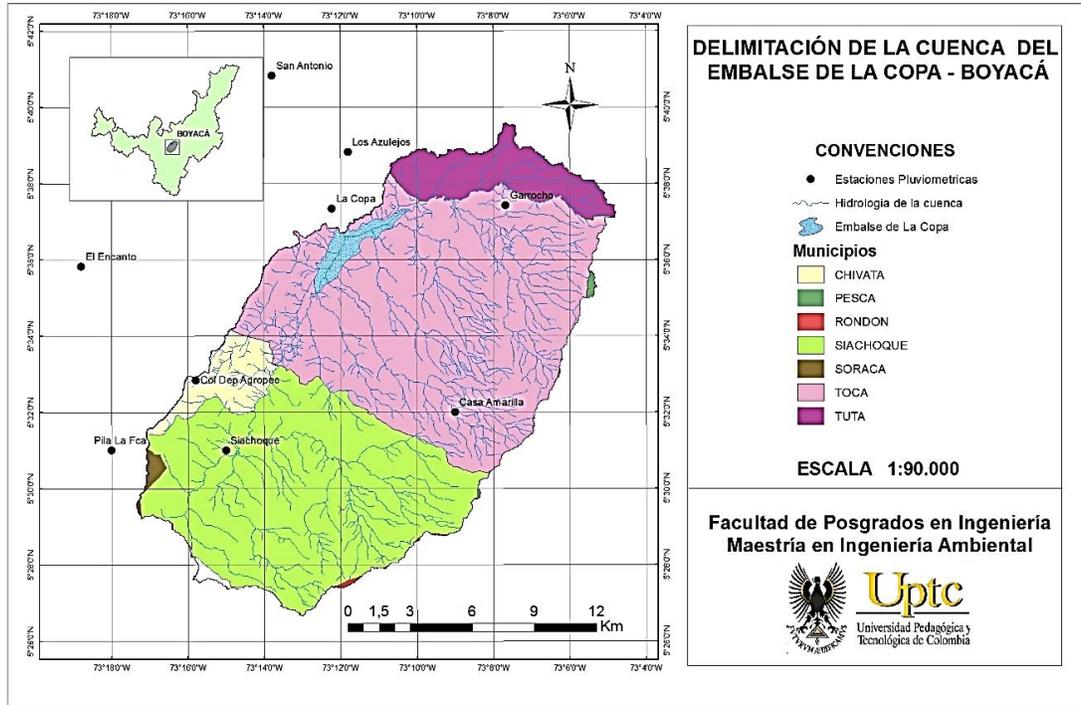
8.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7, se muestra la cuenca del embalse de la Copa, resultado de la delimitación mediante el software ArcSWAT; además de esto se puede observar la ubicación de cada una de las estaciones pluviométricas presentes en la zona, si bien no todas están posicionadas dentro del área de la cuenca, las nueve estaciones fueron tenidas en cuenta para realizar el análisis de interpolación por medio del método determinístico del inverso de la distancia (IDW), ya que este método, permite obtener el valor de una variable en un punto determinado del espacio, conociendo el valor de esta misma variable en otros puntos del espacio reportado por Bosque (2000) citado por Paredes et al¹¹⁰.

El área total de la cuenca delimitada es de 31.065 hectáreas de las cuales el 50.62% pertenece al municipio de Toca, el 37.20% al municipio de Siachoque, el 7% al municipio de Tuta, el 4.15% al municipio de Chivata, el 0.40% al municipio de Soracá, el 0.19% al municipio de Pesca y el 0.13% al municipio de Rondón.

¹¹⁰ PAREDES, Cutberto. et al. Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 2013, 2013 (82): 118-130.

Figura 7. Cuenca del embalse de la Copa-Boyacá delimitada en ArcSWAT.



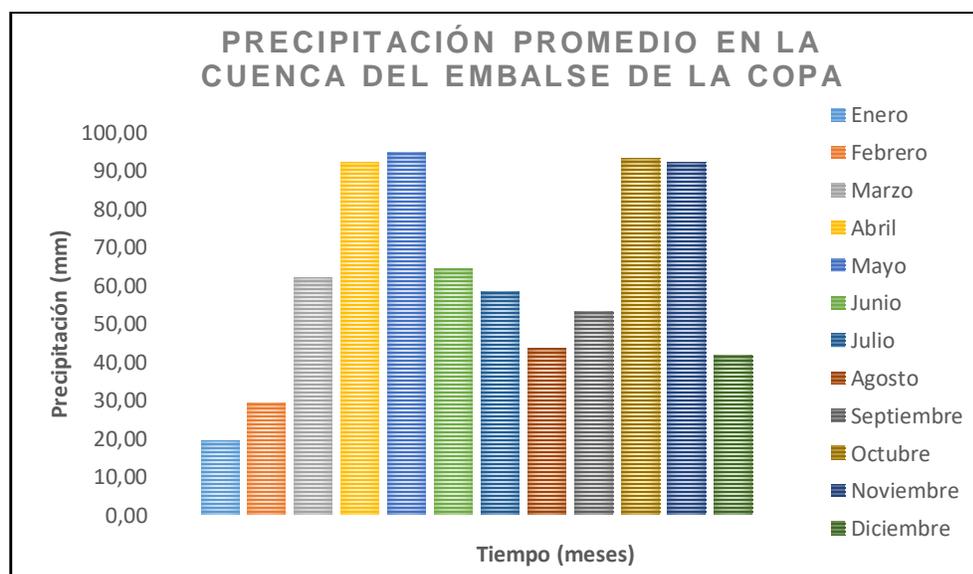
8.2. ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

Se puede evidenciar que la precipitación promedio anual en la cuenca oscila entre los valores de 558 mm hasta 880 mm; para poner en contexto estos valores, Ojeda et al.¹¹¹, en su informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia, establecen que la precipitación promedio anual en el 88% del país, es superior a los 2000 mm, con un promedio anual cercano a los 3000 mm en la totalidad del territorio nacional; mientras que la precipitación promedio anual a nivel de Suramérica es de 1900 mm y a nivel global es de 900 mm; estos datos demuestran que la precipitación promedio anual para la cuenca del embalse La Copa es baja, evidenciando una escasa intensidad de las lluvias durante todo el año.

¹¹¹ OJEDA, B., et al. Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. En Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. Global Water Partnership, 2000.

El comportamiento de las precipitaciones en la cuenca presenta un régimen bimodal como puede verse en la Figura. 8, donde se evidencian dos periodos húmedos correspondientes a los meses de abril – mayo y octubre – noviembre con precipitaciones promedio mensual entre los 91 y 94 mm de lluvia; el resto del año corresponde a un periodo relativamente seco con precipitaciones que oscilan entre los 19 y 64 mm. Este comportamiento bimodal está dado por la confluencia de los vientos Alisios del Norestre y del Sureste en la ZCIT (zona de confluencia intertropical), esta se desplaza latitudinalmente según el movimiento del Sol, pero con un retraso de dos meses.

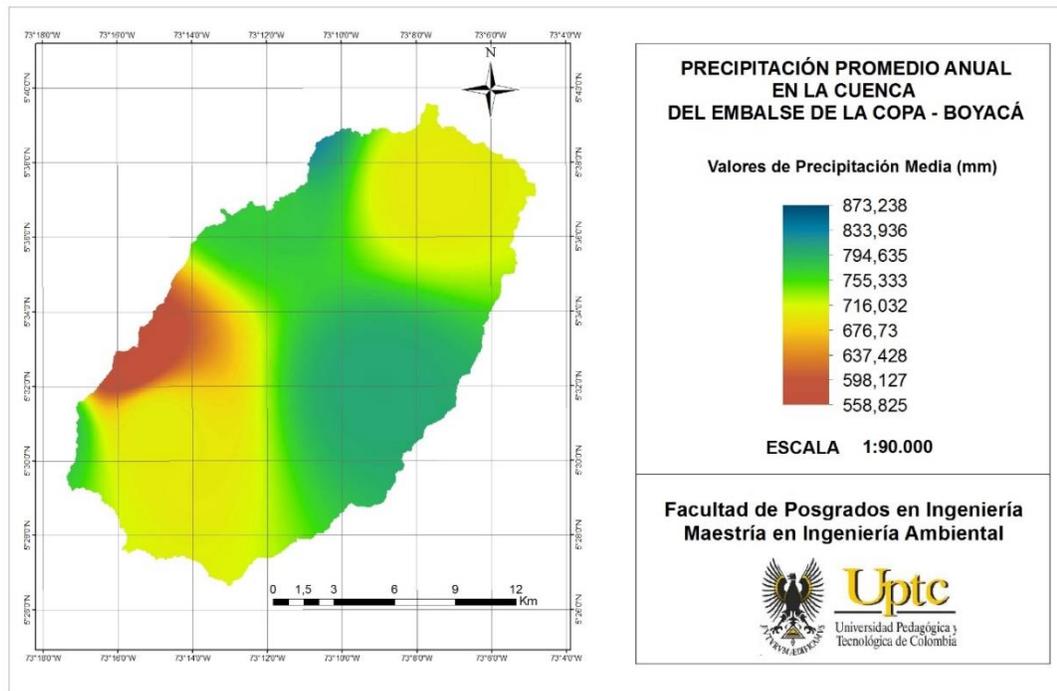
Figura 8. Precipitación promedio mensual en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá. Fuente: Datos pluviométricos IDEAM.



La Figura 9, muestra la distribución de las precipitaciones a lo largo de la cuenca realizado mediante la interpolación del inverso de la distancia (IDW), se observa que la zona de mayor precipitación corresponde al municipio de Toca, específicamente en las veredas de Raiba, Centro, Tuaneca y parte de la vereda de Cunuca, de igual manera se presentan altas precipitaciones en la vereda Cormechoque Arriba del municipio de Siachoque, en la vereda Rominquirá del

municipio de Soracá y en la vereda La Hacienda del municipio de Tuta; mientras que la zona de menor precipitación en la cuenca corresponde al municipio de Chivata vereda Siatoca. Las zonas donde se presentan las mayores precipitaciones en la cuenca están ubicadas sobre el páramo de la Cortadera el cual se caracteriza por lluvias frecuentes de escasa intensidad.

Figura 9. Distribución de la precipitación media anual de la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá



La ZCIT pasa sobre Colombia dos veces cada año, conllevando al comportamiento bimodal en la zona sur y centro del país, mientras que las lluvias presentan un comportamiento monomodal en la región Caribe según Corporación Andina de Fomento¹¹². La precipitación en Colombia se clasifica por regiones, la Pacífica es la de mayor precipitación, alcanzando los 12.700 mm, en contraste con la región más

¹¹² Fomento Corporación, Corporación Andina de Fomento. El fenómeno el niño 1997-1998: memoria, retos y soluciones: Colombia. 2007

seca que es la península de La Guajira con lluvias anuales cercanas a los 350 mm; la región Cundiboyacense muestra cantidades aproximadas entre los 800 a 1000 mm anuales, como lo reportan Jaramillo-Robledo y Chaves-Córdoba¹¹³. Además, Barry¹¹⁴ observó que la lluvia en las regiones montañosas está influenciada por la convección, la convergencia ciclónica y el componente orográfico, haciendo que la precipitación máxima este entre los 1300 y 1500 msnm y disminuya a medida que aumenta la parte alta de la montaña como lo comentan Jaramillo¹¹⁵ y Huth et al¹¹⁶.

8.3. CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL EN EL PÁRAMO LA CORTADERA

Villa¹¹⁷ resalta la importancia de describir la cobertura vegetal y sus cambios en el tiempo se hace importante porque según el tipo de vegetación, su localización o manejo influyen directamente en la erodabilidad del suelo, razón por la que se revisaron dos momentos en el tiempo en la cobertura vegetal en la zona del Páramo La Cortadera, revisando 1985 y 2012.

Se encontró que en los dos años evaluados existen cambios en la vegetación de páramo y herbácea (figura 10), mostrando un importante aumento posiblemente por cultivos y manejo pecuario en la zona similar a lo encontrado por Moreno y Valenzuela¹¹⁸ en el Páramo la Cortadera, Boyacá. Lo anterior puede explicar que

¹¹³ JARAMILLO, Álvaro.; CHAVES, Bernardo. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. 2000.

¹¹⁴ BARRY, Roger Graham. Mountain weather and climate. Psychology Press, 1992. (Routledge physical environment series).

¹¹⁵ JARAMILLO, R. Características climáticas de la zona cafetera. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Chinchiná (Colombia). Centro Nacional de Investigaciones de Café, 1988.

¹¹⁶ HUTH, Radan; NEMESOVA, Ivana; KLIMPEROVÁ, Nina. Weather categorization based on the average linkage clustering technique: An application to European mid-latitudes. International Journal of Climatology, 1993, 13(8): 817-835.

¹¹⁷ VILLA. Op. Cit.

¹¹⁸ MORENO, Claudia; VALENZUELA, Sergio. Metodología evaluación impacto ambiental (EIA) de actividad agropecuaria, Páramo La Cortadera, veredas Butaga, Chaguata y Puerta Chiquita, Municipio de Pesca, Boyacá. 2017

para el año disminuir 2012 pareciera disminuir la zona abierta con poca vegetación (figura 11 y 12), sin embargo, esta vegetación no es propia del páramo. Según Barrera y Monroy¹¹⁹ la vegetación de páramo en La Cortadera se está viendo gravemente afectada por las producciones ganaderas, principalmente de bovinos, porque el ramoneo y pisoteo conllevan a la pérdida de la vegetación natural, en especial porque La Cortadera es un páramo seco.

En la figura 10 se puede observar que la vegetación herbácea ha aumentado el doble de lo existente en el año 2012, si bien, en la vegetación natural de páramo este tipo de vegetación es habitual, según el estudio realizado por Barrera y Monroy¹²⁰, el aumento se debe al manejo de producción de ganadería bovina dentro de La Cortadera. Manejo que ha sido extendido a la mayoría de los páramos andinos por la adaptación del ganado vacuno a este tipo de ecosistema, según Molinillo y Monasterio¹²¹. Esto puede verse en la disminución de la vegetación propia de páramo vista desde el año 1985 hasta el 2012, como se ve en la figura 10 y al comparar las figuras 11 y 12.

Figura 10. Cambio de cobertura vegetal, comparando los años 1985 y 2012 en el Páramo La Cortadera, Boyacá.

¹¹⁹ Barrera, Héctor; Monroy, Juan. Análisis del impacto de la explotación bovina sobre el ecosistema del páramo la cortadera Toca Boyacá. 2012. Tesis Doctoral.

¹²⁰ Ibid.

¹²¹ MOLINILLO, Marcelo; MONASTERIO, Maximina. Patrones de vegetación y pastoreo en ambiente de Páramo. *Ecotropicos*, Sociedad Venezolana de Ecología, 2002. 15(1): 19-34

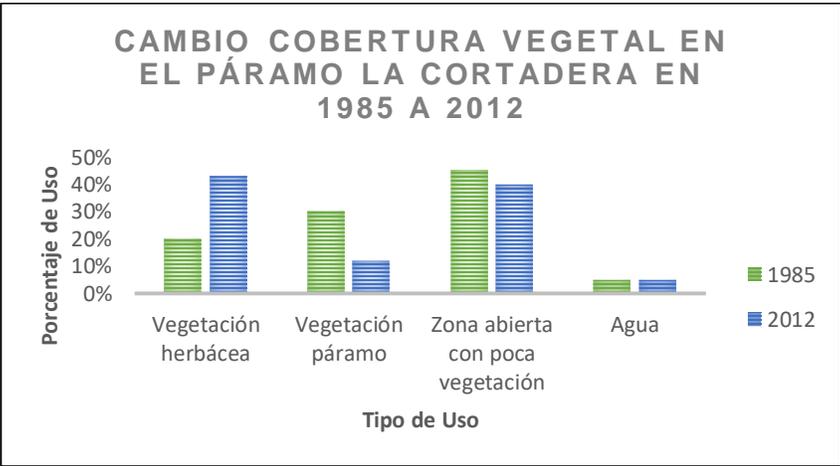


Figura 11. Imagen satelital del Páramo La Cortadera – Boyacá en 1985

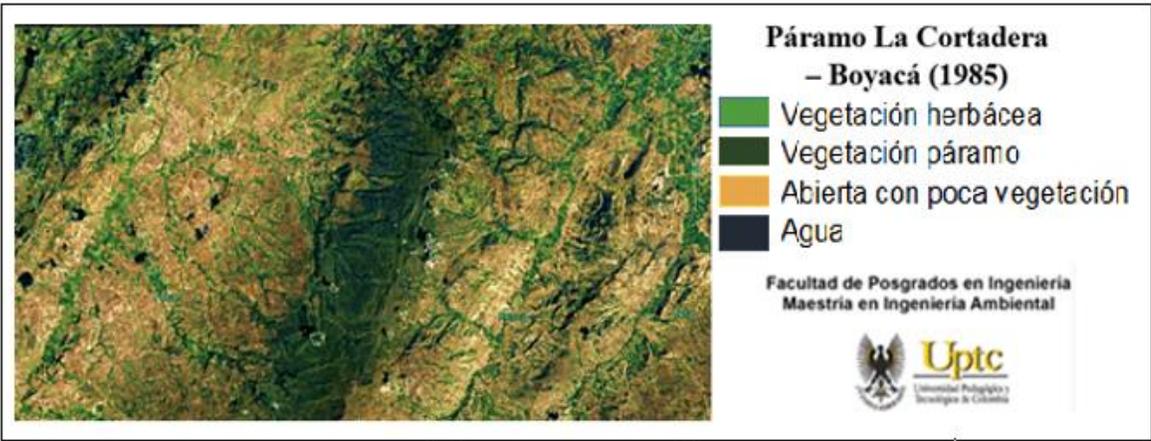
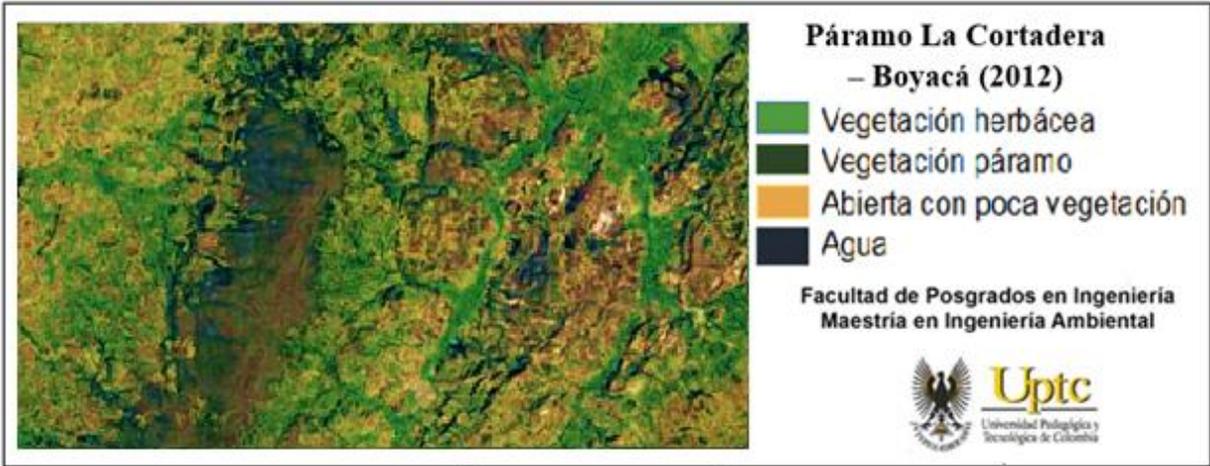


Figura 12. Imagen satelital del Páramo La Cortadera – Boyacá en 2012



8.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELOS REVISADA (RUSLE)

La ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) tuvo como variables en esta investigación la precipitación promedio anual, el índice IFM, el factor R, el índice ICP, el factor K, el factor LS, el factor C y el factor P; la multiplicación de los cinco factores tiene como resultado la medición de la pérdida de suelo medida en toneladas por hectárea por año. De esta manera se cuantificó la erosión en el Cuenca del Embalse La Copa, lo anterior porque en Colombia se estima que el 40% del suelo en área continental sufre de erosión, en la que el 2,9% se clasificó como erosión severa, el 16,8% cuenta con una erosión moderada y el 20% con erosión ligera en el territorio nacional; en Boyacá el IDEAM-U.D.C.A.¹²². reportan que este embalse aporta significativamente a estas cifras al mostrar el 72,1% de magnitud de degradación y el 6,8% de área departamental afectada de forma severa.

8.4.1. Índice de Fournier modificado

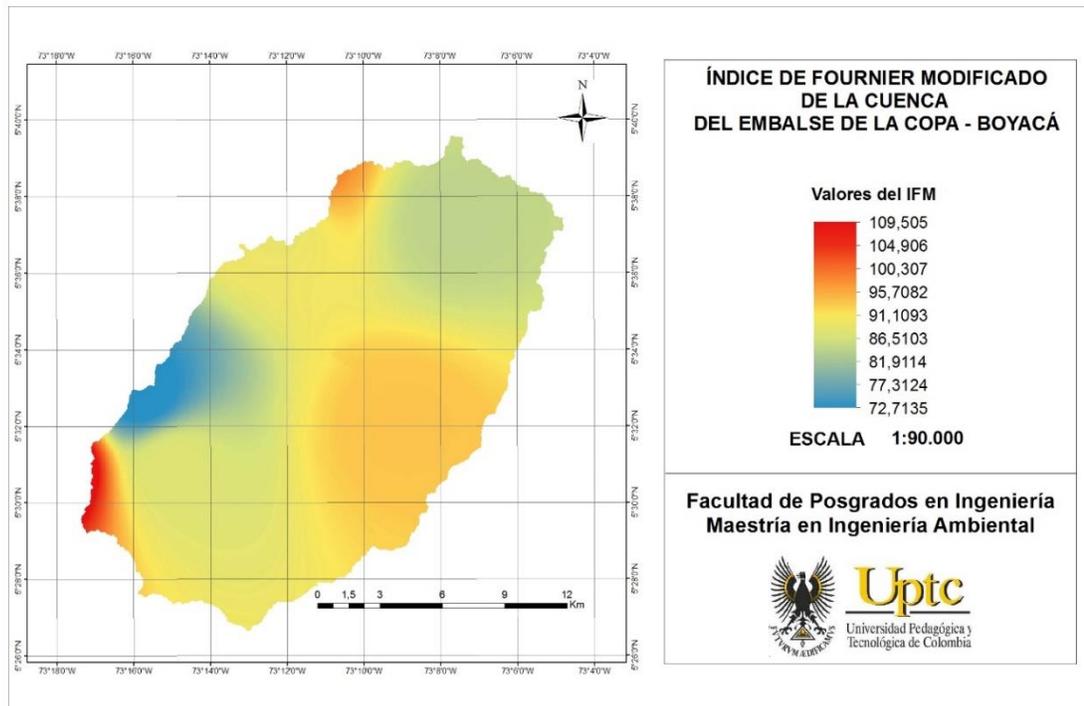
La agresividad de la precipitación en la cuenca estimada con el IFM se expone en la Figura 13; la cual muestra valores de agresividad de la precipitación que van desde 72 hasta 109; el valor más alto del IFM se presentó en el municipio de Soracá (vereda Rominquirá), y una pequeña parte de la vereda Tirga del municipio de Siachoque; este valor en área representa menos del 0.50% de la cuenca, otros valores altos del IFM se presentaron en el municipio de Tuta (vereda La Hacienda), en los municipios de Toca (parte de las veredas Raiba, Centro y Tuaneca) y Siachoque (vereda Cormechoque arriba), estos valores oscilan entre 95 y 100 para

¹²² IDEAM, U.D.C.A. Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia-2015. IDEAM – MADS. Bogotá D.C., Colombia., 62pp. Publicación aprobada por el IDEAM, diciembre de 2015, Bogotá D.C., Colombia.

Tuta y entre 91 y 95 para los municipios de Toca y Siachoque veredas previamente mencionadas.

Los valores más bajos del IFM se observaron en el municipio de Chivata donde estuvieron entre 72 y 76. Teniendo en cuenta las categorías de clasificación del IFM para Latinoamérica propuestas por Gabriels et al.¹²³, se puede observar que la totalidad de la cuenca entra en dos de estas categorías, moderado y bajo; siendo los municipios de Soracá, Siachoque, Toca y Tuta en las veredas mencionadas líneas arriba las que tienen un riesgo moderado de erosión causado por la agresividad de la lluvia; mientras que en el resto de la cuenca la agresividad de la lluvia es baja.

Figura 13. Distribución espacial del IFM en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.



¹²³ GABRIELS et al. Op. Cit.

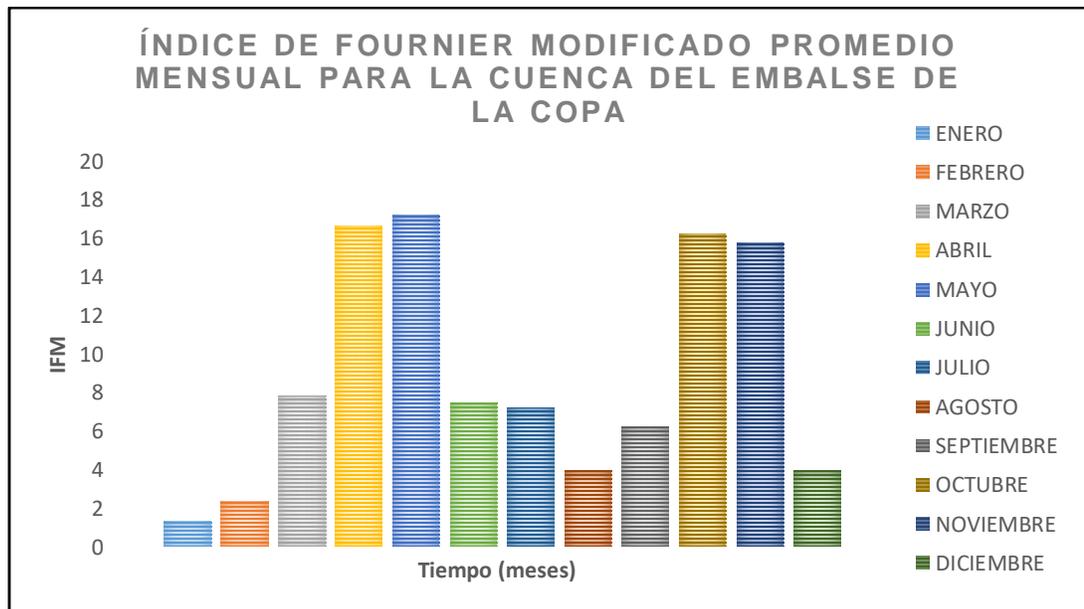
Como lo reportan Rey et al.¹²⁴, los mayores niveles de agresividad climática se dan durante los meses de mayor precipitación; siendo para la cuenca del embalse de La Copa, como se observa en la Figura 14, los meses de abril, mayo, octubre y noviembre los que presentan un IFM más alto, presentando un comportamiento muy semejante a la precipitación promedio, tanto en intensidad como en su distribución espacial.

Es importante aclarar que las zonas con potencial erosivo moderado exceptuando Tuta (vereda La Hacienda) se encuentran a una altitud mayor a los 2900 msnm, llegando inclusive a los 3500 msnm en zona de páramo; mientras que las zonas con potencial erosivo bajo se encuentran a una altitud menor a los 2800 msnm; esto en parte coincide con las afirmaciones de Velazco y Cortes¹²⁵, ellos señalan que el riesgo de erosión se incrementa a medida que la altitud aumenta, lo cual significa que la vulnerabilidad a la erosión causada por la lluvia está influenciada en gran medida por el relieve.

Figura 14. Promedio mensual del índice de Fournier modificado (IFM) para la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.

¹²⁴ REY, Juan C., et al. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela: IV. región los Andes. Bioagro, 2012. 24(2): 115-120.

¹²⁵ VELAZCO y CORTES. Op. Cit.



8.4.2. Factor R

Como era de esperarse, los resultados del factor R, Figura 15, muestran que existe una marcada correlación con el índice de Fournier modificado ya que el factor R fue estimado a partir del IFM; Ramírez¹²⁶ encontró con un nivel de significancia del 0.05 que el IFM explica la variación del EI_{30} , lo cual valida la utilización del IFM para obtener una aproximación del factor R cuando no se cuenta con registros de precipitaciones diarias.

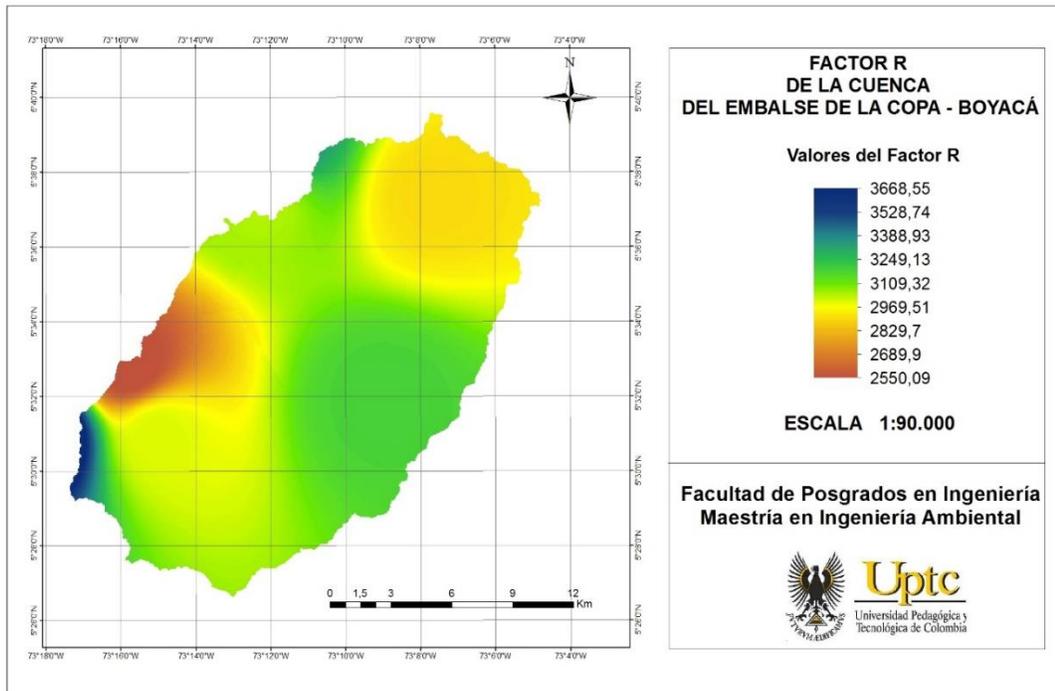
Tanto el IFM como el factor R presentan una distribución espacial muy similar siendo las zonas próximas a las estaciones Pila la Fca., Los Azulejos y Casa Amarilla las que obtuvieron un valor de R más alto; y la estación Col. Dep. Agropec., ubicada en Chivata la que presentó un valor más bajo del factor R. Los valores del factor R oscilaron entre los 2550 [$MJ*mm*ha^{-1}$] y los 3675 [$MJ*mm*ha^{-1}$], según la

¹²⁶ RAMÍREZ, F. Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad de Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué, 2006.

clasificación del factor R (tabla 10), estos valores determinan que la totalidad de la cuenca del embalse de La Copa presenta un bajo riesgo de erosividad; sin embargo, es importante aclarar que tanto el IFM global como el Factor R global no explican de manera total las diferencias en el efecto que la erosividad produce sobre la pérdida de suelo por erosión en la cuenca, por lo cual Ramírez et al.¹²⁷, sugieren analizar la distribución temporal y espacial de la erosividad de la lluvia a lo largo del año.

Figura 15. Distribución espacial del factor R en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.

¹²⁷ Ramírez, O., Hincapié, G., Sadeghian, K. y Pérez, G. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 2007. 58(1), 40-52.



En la tabla 10 se evidencian los resultados de la investigación en cuanto a pluviometría y erosividad de la lluvia se refiere, aquí se muestra, la precipitación promedio anual en milímetros para cada una de las estaciones, de la misma manera el índice de Fournier modificado en milímetros; el Factor R en $[MJ*mm*ha^{-1}]$, y el índice de Concentración de las Precipitaciones en porcentaje; estos índices son el resultado del promedio anual para un periodo de 20 años comprendido entre 1992 y 2011. Esto apoya lo reportado por Pérez¹²⁸ quien para Colombia encontró relación entre el factor R y la precipitación media y en los resultados del presente estudio se observa el patrón que entre mayor sea la precipitación el factor R también aumenta como se ve en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la investigación pluviométrica, índices IFM, ICP y Factor R

¹²⁸ PÉREZ. Op. Cit.

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

8.4.3. Índice de Concentración de las precipitaciones

La Figura 16 muestra que la distribución de las precipitaciones en la cuenca, hallada mediante el índice de concentración de las precipitaciones, oscila entre el 11% y el 14%, según estos resultados la distribución es moderadamente estacional como lo comenta Gabriels et al.¹²⁹ esto indica que las precipitaciones se distribuyen durante varios meses del año, esto se puede apreciar mejor en la Fig.8, en la que a pesar de observarse un régimen bimodal de las precipitaciones, también se observa un marcado periodo de transición entre las dos épocas más húmedas el cual comprende los meses de junio a septiembre, este periodo representa aproximadamente el 30% de las precipitaciones del año; mientras que los dos periodos más húmedos representan el 50% de las precipitaciones totales del año. Los valores más altos del ICP (12-13.8%) se encontraron en los municipios de Siachoque, Chivata y Soracá respectivamente; mientras que Toca, Tuta, Pesca y

¹²⁹ GABRIELS. Op. Cit.

Rondón presentaron los valores más bajos de ICP, en el rango del 11%. Según Rey et al.¹³⁰ en los Andes venezolanos el ICP fluctuó entre 11 y 14% entendiendo que las lluvias son moderadamente estacionales. Para el presente estudio, se interpreta que el hecho de que las precipitaciones se distribuyan en varios meses del año, indica que las lluvias al ser menos concentradas pueden tener un bajo efecto erosivo durante ese intervalo de tiempo.

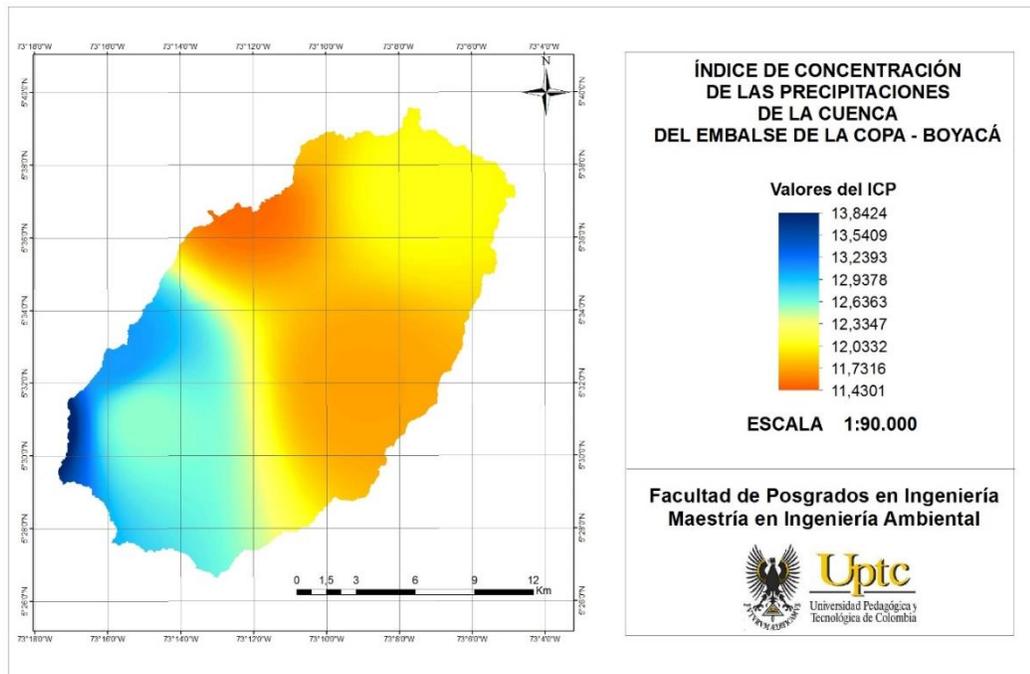
El ICP mostró mayor índice hacia la zona sur y occidente del Embalse La Copa, mientras que para la zona norte se encontró el ICP con menor valor. Esto implica, que, aunque la distribución de las precipitaciones es bimodal en la zona, como ya se había descrito, por las características accidentadas del lugar, el área con mayor precipitación está en mayor riesgo de movimientos de masa, como lo explican Rey et al.¹³¹. Se podría suponer que, bajo las condiciones actuales de precipitación en el embalse, la zona donde hay mayor ICP puede generar erosión laminar, en surcos y canales, ya que según Buitrago¹³² la precipitación se considera un factor que favorece dichos procesos.

Figura 16. Distribución espacial del ICP en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.

¹³⁰ REY et al. Op, Cit.

¹³¹ Ibid.

¹³² BUITRAGO. Op. Cit.



8.4.4. Factor K

En la figura 17 se muestra el factor K osciló entre 0 y 0,436, mostrando los valores más altos cerca de la zona en donde se encuentra el embalse. Según Smulyan¹³³ este factor muestra la predicción de la pérdida de suelo por la susceptibilidad de este frente a la erodabilidad de la lluvia y la escorrentía. El resultado en el factor K es mayor al considerado por Rivera y Gómez¹³⁴ y Leihner et al. como erodabilidad natural que oscila entre 0,0008 y 0,0086 por lo que la probabilidad de la pérdida de suelo en el embalse La Copa será superior a la natural.

El embalse La Copa muestra el factor K mayor hacia la zona occidental a lo largo de norte y sur. Según Nájera et al.¹³⁵ la erodabilidad está supedita a la textura del

¹³³ SMULYAN, Marilyn. Application of the RUSLE erosion equation to the San Pedro Creek Watershed in Pacifica, California using ArcGIS 9.3. 1. 2011.

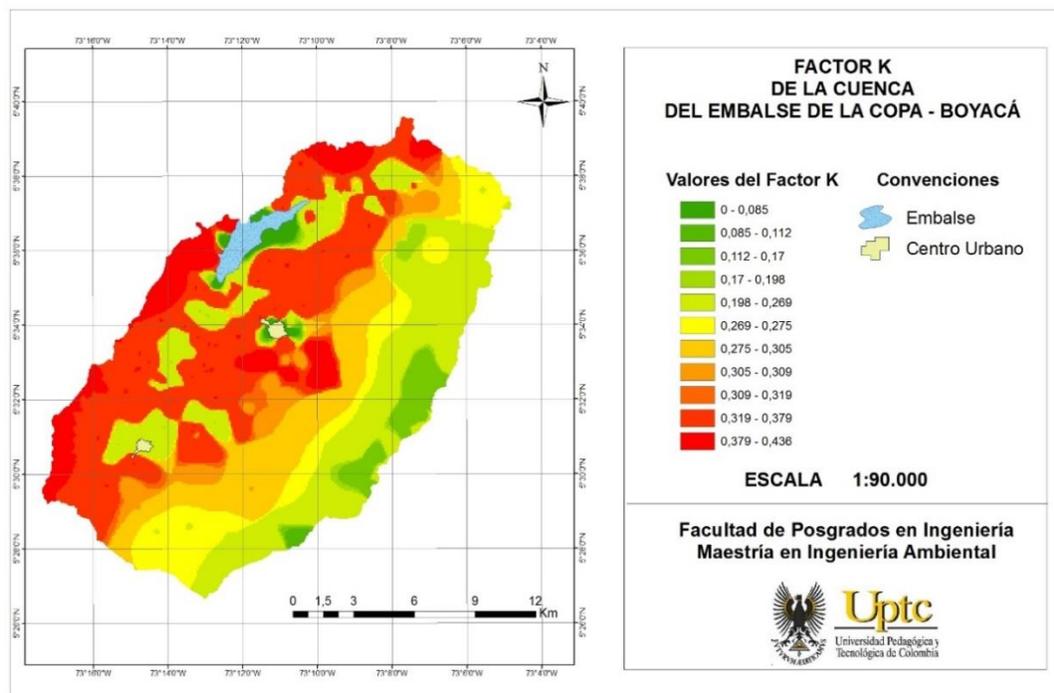
¹³⁴ RIVERA y GÓMEZ. Op. Cit.

¹³⁵ NÁJERA, Oyolsi, et al. Riesgos de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. Cultivos tropicales. 2016. 37(2): 45-55

suelo, en la que la materia orgánica y la profundidad del suelo le confieren diferentes niveles de susceptibilidad a la acción de la lluvia, lo que podría explicar la diferencia del factor K en el embalse La Copa.

Según lo explicado en el párrafo anterior, la zona que se ve de tonalidad verde la erodabilidad es baja, por lo que debe ser suelos de textura franca o franco arcillosa, profundo y con alto material orgánico, mientras que el suelo de rojo intenso son suelos de textura arenosa o franca arenosa, poco profunda y con bajo contenido en materia orgánica, según lo descrito por Nájera et al.¹³⁶

Figura 17. Distribución espacial del factor R en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.



8.4.5. Factor LS

¹³⁶ Ibid.

Se obtuvo el factor de longitud de la pendiente que, según Villa, representa el efecto de la longitud de la pendiente en la erosión, en la que se tuvo en cuenta el origen de la escorrentía superficial a lo largo de la vía de flujo hacia donde se deposita el suelo desprendido. En el Embalse La Copa, la zona central es la que mostró el Factor LS más bajo, como se ve en las figuras 18 y 19, concordando con la mayor erodabilidad del embalse (figura 17).

En la tabla 11 se observa cuanta proporción de área del embalse La Copa puede afectar la topografía sobre la erosión por la pendiente media de la ladera y su longitud, en esta tabla se muestra que cerca del 67% del área se clasifica entre bajo y moderado, y alrededor del 30% está clasificada entre alta y muy alta. La figura 18, permite ver de forma cualitativa el factor LS en el que no hay un patrón claro en la topografía, sin embargo, el área oriental es quien parece obtener las clasificaciones alta y muy alta más frecuentes del área de estudio. Es necesario resaltar que el factor LS afecta de forma significativa la pérdida de suelo por erosión hídrica (Rivera-Toral *et al.*, 2010).

Los resultados obtenidos por Nájera *et al.*¹³⁷ varía en la clasificación de clase LS difiere en la encontrada en el embalse La Copa, en el que obtuvo mayor extensión de superficie en la clasificación moderado y muy fuerte, sin embargo, en los dos estudios el patrón de la clasificación LS fue similar, en la que bajo, moderado y mayor fueron los que obtuvieron los mayores valores.

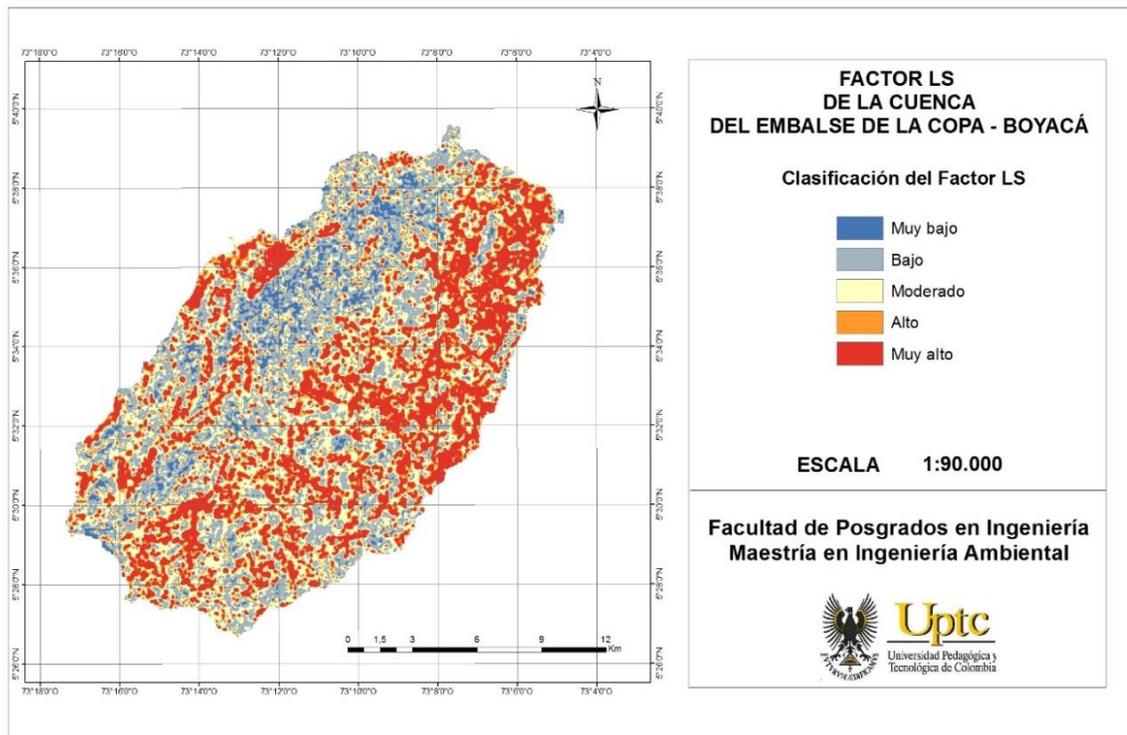
Tabla 11. Factor LS para la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá; de acuerdo a la clasificación propuesta por Ramírez e Hincapie (2009).

Valor del Factor LS	Clasificación del Factor LS	Área (%)
---------------------	-----------------------------	----------

¹³⁷ NÁJERA *et al.* Op. Cit.

0 a 1,5	Muy bajo	2,90109418
1,6 a 3,0	Bajo	32,3203381
3,1 a 5,0	Moderado	34,6233055
5,1 a 7,0	Alto	12,2186207
Mayor a 7,0	Muy alto	17,9366415

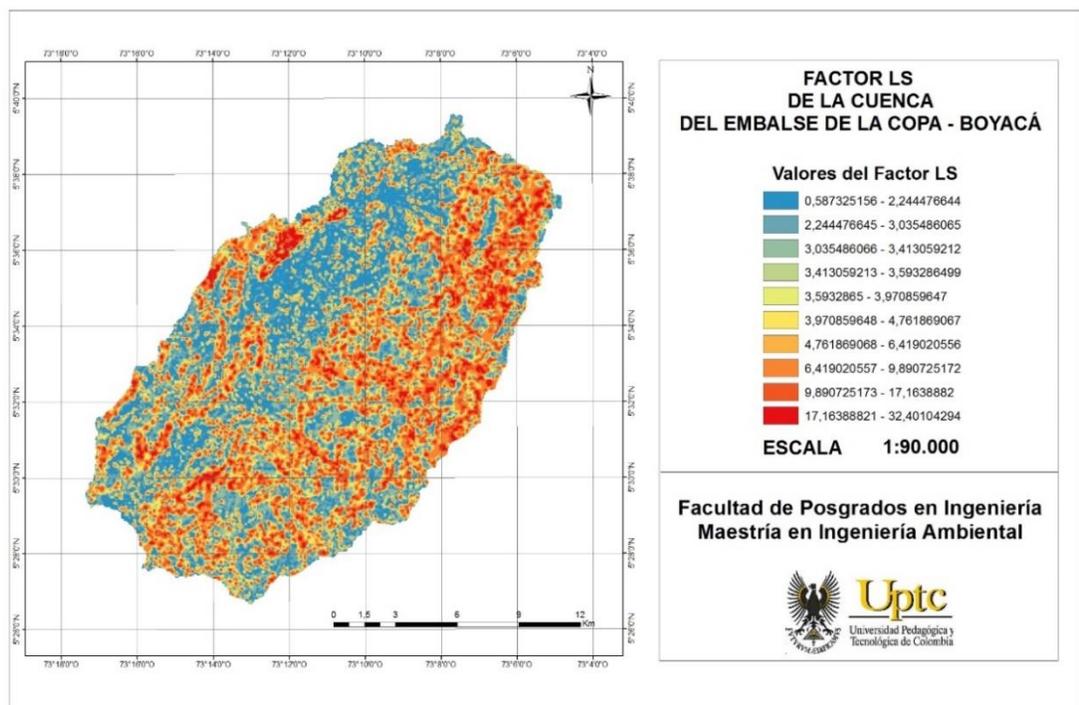
Figura 18. Distribución espacial del facto LS (cualitativo) en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá



La figura 19 muestra en la cuenca del embalse La Copa los resultados del factor LS el cuál no muestra un claro patrón dentro del área de estudio. Esto puede deberse a que el origen del suelo en la zona centro occidente, centro y oriente del departamento de Boyacá, tiene un estilo estructural de fallas inversas que se asocian a pliegues anticlinales, que en ocasiones se presentan invertidos, además cuenta con amplios sinclinales de dirección Noreste como lo describe el Instituto

geográfico Agustín Codazzi¹³⁸. Según Wischmeier y Smith¹³⁹ y Ramírez e Hincapié¹⁴⁰ la velocidad del flujo de la escorrentía se acelera por pendientes fuertes, llevando a que la capacidad de filtración del suelo se vea comprometida, por lo tanto, el poder de erosión del agua será mayor, según lo anterior, el factor LS demuestra vulnerabilidad de erosión en la cuenca del embalse La Copa por la topografía propia del área.

Figura 19. Distribución espacial del factor LS (cuantitativo) en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.



8.4.6. Factor C

¹³⁸ Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá, Tomo II. Departamento administrativo nacional de estadística Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2005. 159pp.

¹³⁹ WISCHMEIER y SMITH. Op. Cit.

¹⁴⁰ Ramírez, O.; Hincapié, G. Riesgo a la Erosión en la Zona Cafetera Central del Departamento de Caldas. Cenicafe, 2009. 60(2): 173-189

Se tuvo en cuenta la superficie del Embalse La Copa incluyendo la cobertura completa con rocas, vegetación viva, criptógamas y residuos de plantas, con tamaño mínimo requerido de material para no ser removido por la escorrentía como lo sugiere Villa¹⁴¹. Bajo estas condiciones en la figura 20 permite observar que la zona oriental de sur a norte parece ser la que menos susceptibilidad de erosión tiene en el área de estudio, sin los cuerpos de agua artificiales, teniendo en cuenta que es una zona de plantación forestal y el factor C, según Ceballos y Toro¹⁴² al calcular que lugares con cobertura vegetal la probabilidad de erosión será menor que los lugares que han sido modificados drásticamente por actividades antrópicas.

La figura 21 permite conocer la cantidad de hectáreas comprometidas en cada tipo de cobertura y el porcentaje a que equivale en el área de estudio, en ese sentido el 56% de la cuenca del embalse La Copa el valor del factor C es de 0,435 y lugares con tierras desnudas, degradadas o con tejido urbano el factor C es de 1, esto porque dicho factor refleja el efecto de cultivos y manejo del suelo dentro de las tasas de erosión. Este resultado es similar a lo encontrado en otros estudios, en los que se encuentra una variedad de matriz del paisaje, tal como se obtuvo en el estudio de Villa¹⁴³.

La identificación del factor por cubierta vegetal se vuelve importante porque según Suárez¹⁴⁴ este elemento produce rugosidad al suelo, en el Embalse La Copa, junto al espejo de agua este elemento mostró ser el lugar con mayor proceso de áreas desnudas o degradadas, por tanto, siendo una de las áreas que mayores problemas pueden mostrar por degradación del suelo. Esto porque se puede acelerar la erosión al eliminar la vegetación ya que expuesto el suelo la acción del viento o el agua es directa como lo reporta el Departamento de manejo ambiental¹⁴⁵. Sin embargo,

¹⁴¹ VILLA. Op. Cit.

¹⁴² CEBALLOS y TORO. Op. Cit.

¹⁴³ Ibid.

¹⁴⁴ SUÁREZ. Op. Cit.

¹⁴⁵ Department of Environmental Management. Op. Cit.

como se ve en la figura 21 pastos, cultivos y espacios naturales fue el que obtuvo mayor cantidad de área dentro del factor C para el Embalse La Copa.

Figura 20. Distribución espacial del factor C en la cuenca del embalse de La Copa - Boyacá.

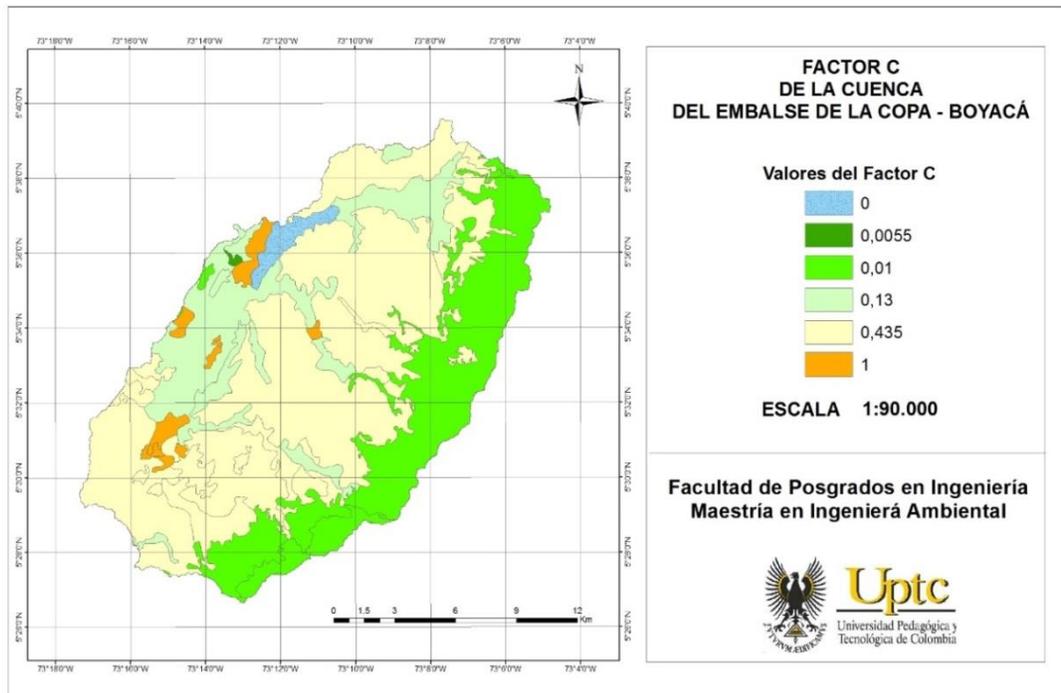
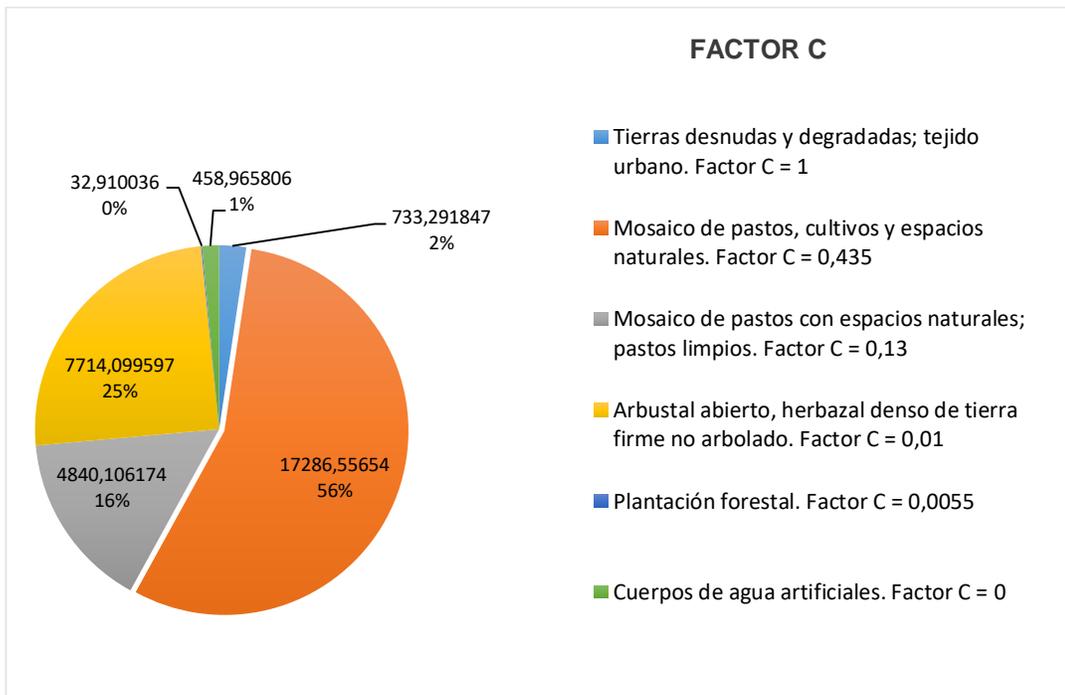


Figura 21. Área de hectáreas y en porcentaje del factor C de la cuenca del Embalse de La Copa-Boyacá



8.4.7. Factor P

El factor P permite conocer un rango de erosión al conocer la relación de pérdida de suelo en el lugar donde no se ha aplicado prácticas mecánicas de conservación de suelos. Según CORTOLIMA¹⁴⁶, si no se aplican prácticas de conservación el valor de P es igual a 1, lo cual fue lo encontrado en el presente estudio. Este resultado contrasta con el hecho de saber que dentro del Embalse La Copa se realizan actividades ganaderas y de cultivo.

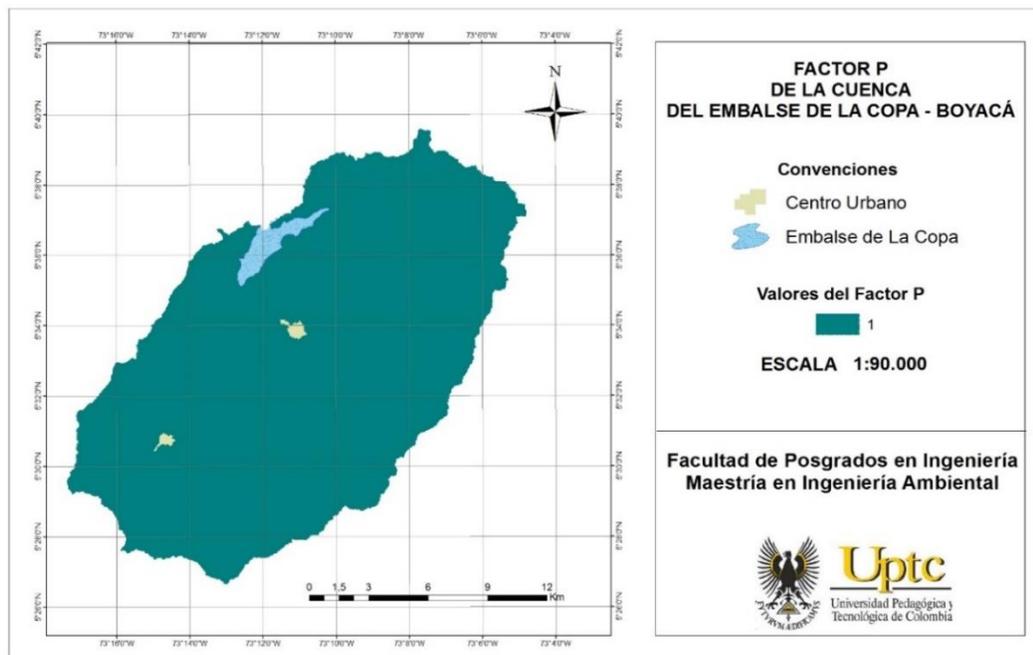
La figura 22 muestra que en la cuenca del embalse La Copa no se realiza ninguna práctica mecánica para conservar el suelo como serían contornos, terrazas, cultivos en fajas, entre otras, como lo explica CORTOLIMA¹⁴⁷, por lo que no se realiza ningún tipo de control a la erosión del suelo dentro del área de estudio. Este factor

¹⁴⁶ CORTOLIMA (agosto de 2013). POM, Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Totare. Obtenido de [https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf], revisado el 07/05/18

¹⁴⁷ Ibid.

P en estudios como los de Renard et al.¹⁴⁸ o Clérici y García-Préchac¹⁴⁹, consideran que este factor obtiene valores universales por la erosión causada en los procesos mecánicos de control de escurrimiento en los lugares en que se llevan a cabo, sin embargo, esos valores no aplican para este estudio porque toman el factor P con un valor de 0,5 mientras que en el presente estudio lo obtenido fue el doble.

Figura 22. Distribución espacial del factor P en la cuenca del Embalse de La Copa-Boyacá



8.4.8. Pérdida de suelo en la cuenca del Embalse de La Copa

¹⁴⁸ RENARD K. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook 703. 1997. USA

¹⁴⁹ CLÉRICI y GARCÍA-PRÉCHAC. Op. Cit.

La pérdida de suelo en el área de estudio muestra que el 76,11% de la cuenca del embalse de La Copa tiene una clasificación muy alta (tabla 11), resultado que está muy por encima de la siguiente clasificación, alta, la cual obtuvo el 6,45%, tan solo el 9,14% del área de la cuenca de la presente investigación muestra clasificaciones de pérdida de suelo de ligera a baja. Esta clasificación puede variar si se compara con la clasificación de CORTOLIMA¹⁵⁰, en la que la medición de la pérdida de suelo, se presentan cuatro ítems en el que se encuentran ligera, moderada, fuerte y severa, según esta clasificación, los resultados reportados en la tabla 12 continuarían, en su mayoría, dentro de la clasificación de fuerte a severa, entendiendo que la pérdida de suelo en el Embalse La Copa es alarmante.

Tabla 12. Pérdida de suelo de la cuenca del embalse de La Copa – Boyacá; de acuerdo a la clasificación propuesta por Pérez (2001).

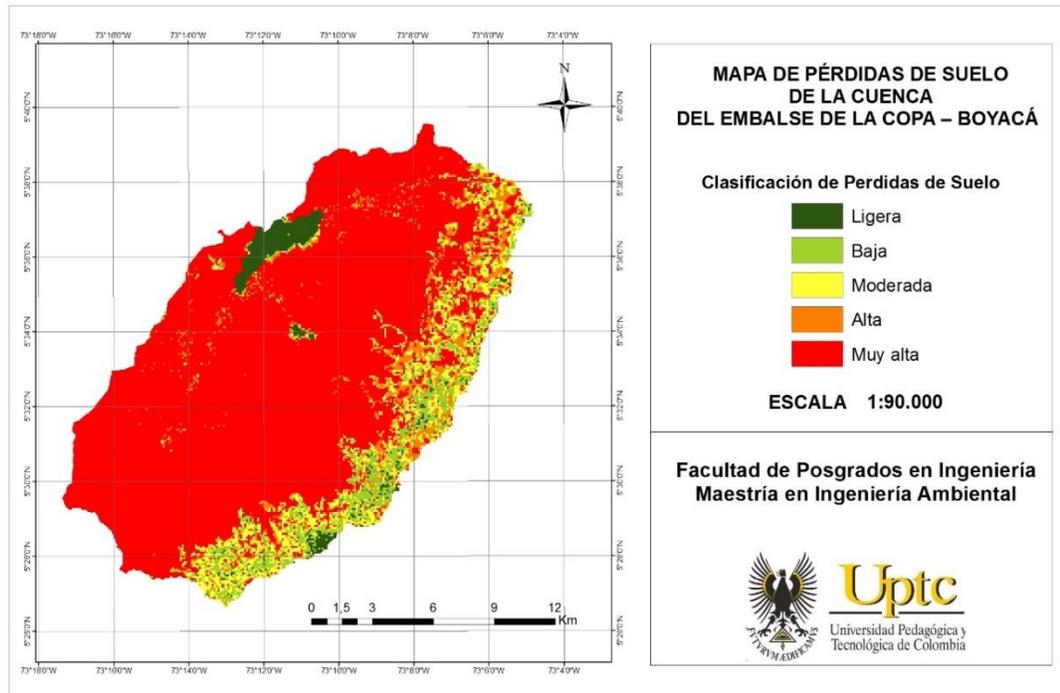
Pérdidas de suelo (t/ha/año)	Clasificación de pérdidas de Suelo	Área en Hectáreas	Área en porcentaje (%)
Menores de 10	Ligera	935,00	3,01
10 a 25	Baja	1905,79	6,13
26 a 50	Moderada	2576,12	8,29
51 a 100	Alta	2003,29	6,45
Mayores de 100	Muy alta	23645,74	76,11

En la figura 23 se puede observar gráficamente que la zona con clasificación moderada hacia ligera es el área en que se encuentran plantaciones forestales. Esto puede deberse, según Bautista¹⁵¹, a que la pérdida de suelo es la confluencia de diferentes factores, en los que la erosionabilidad no necesariamente influye de forma directa sobre dicha pérdida, como si lo hacen pendientes inclinadas y largas, altas intensidades de lluvias, cobertura de suelo y prácticas de manejo, como lo muestra el área de estudio.

¹⁵⁰ CORTOLIMA. Op Cit.

¹⁵¹ BAUTISTA, Claudia. Simulación de la pérdida de suelo de la parte baja de la microcuenca Quebrada Cune utilizando el modelo USLE. Trabajo de grado para optar por el título en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. 2015. Universidad de La Salle. 177pp.

Figura 23. Pérdida de Suelo de la cuenca del embalse de La Copa-Boyacá



La pérdida de suelo tiene como una de sus principales causas la degradación por erosión, para Colombia, según IDEAM-U.D.C.A.¹⁵² existen actividades antrópicas identificadas que ejercen presión directa sobre la degradación del suelo y se localizan en diferentes puntos importantes, para Boyacá aplican los territorios agropecuarios, en los que las zonas agrícolas (92,9%), las agropecuarias (88,2%) y ganaderas (77,3%) son la que mayor presión causan a dicha degradación, siendo estas actividades las que más riesgo afectan el Páramo La Cortadera según Barrera y Monroy¹⁵³ y según los resultados encontrados en el presente estudio en La Cuenca del embalse La Copa.

9. CONCLUSIONES

¹⁵² IDEAM-U.D.C.A. Op. Cit.

¹⁵³ BARRERA y MONROY. Op. Cit.

- El embalse La Copa tiene un comportamiento bimodal en lluvias encontrando los meses de abril-mayo y octubre-noviembre con precipitaciones de hasta 94 mm de lluvia, mientras que los demás meses son relativamente secos, sin tener meses de sequía absoluta. Se encontró que la parte del embalse que pertenece a los municipios de Toca, Soracá y Tuta son los que reciben la mayor precipitación, mientras que la zona del embalse que está en Chivata es el que menor precipitación recibe en el año.
- En el páramo La Cortadera se encontraron cambios evidentes de la cobertura vegetal en la que aumento el doble la vegetación herbácea, perteneciente principalmente a pastizales y cultivos para producción agropecuaria y se evidenció la reducción del 30% al 12% la vegetación propia del ecosistema de páramo, disminuyendo la prestación de servicio ecosistémico de La Cortadera
- En la cuenca del embalse La Copa en el departamento de Boyacá está comprometido el 76,11% del área total, hallando que se ha producido pérdida del suelo superior a 100 t/ha/año. Se encontró que dicha pérdida de suelo se debe principalmente por la baja cobertura vegetal, las pocas prácticas de manejo y las condiciones de longitud, pendiente propias de la zona Andina y porque la erosionabilidad del suelo es más alta de la que se espera de forma natural, especialmente en el área circundante al embalse, favoreciendo así la pérdida de suelo hallada en el área.
- La agresividad de la precipitación calculada por el IFM mostró ser baja encontrando valores que oscilaron entre 72 hasta 109, Tuta, Toca y Siachoque tuvieron valores moderados del IFM, y Soracá mostró el mayor valor, sin embargo, sigue siendo moderada la agresividad de precipitación en esta zona.
- La amenaza de erosividad en la cuenca para los años 1992 al 2011 fue bajo al mostrar un factor R entre 2550 $[MJ*mm*ha^{-1}]^1$ a 3676 $[MJ*mm*ha^{-1}]$, sin embargo, un seguimiento mensual permitirá conocer de forma más cercana la amenaza de erosividad en la cuenca La Copa
- Los valores del ICP se hallaron entre el 11% y el 14% muestran bajo riesgo de erosión en la cuenca del embalse La Copa, esto debido a que la lluvia en el

sector se distribuye durante todos los meses del año, aunque existe comportamiento bimodal de lluvia en el área.

- En toda el área de estudio no se encontraron prácticas de manejo que permitan la conservación del suelo y evite la erosión hídrica causada por actividades antrópicas o por causas naturales, esto, conlleva a que con el tiempo la erosión de la Cuenca del embalse La Copa sea alta y, por tanto, disminuya la calidad del suelo para producciones y para la permanencia de zonas naturales.
- Los mapas elaborados muestran que la erodabilidad del suelo y la erosión hídrica en el embalse La Copa no es alta en este momento, pero su potencial erosivo es importante porque cuenta con pocos procesos de conservación y manejo de suelo, además de pérdida de vegetación natural que se reemplaza por pastizales y monocultivos.

10. RECOMEDACIONES

- La cuenca del embalse de la Copa tiene zonas de importancia ambiental como ecosistema estratégico en la zona de Páramo. En ese sentido, se requiere zonificar la cuenca para lo cual, se debe crear un plan de manejo como un área de importancia ambiental.
- Caracterizar la población que está haciendo uso de la cuenca, tipo de explotación que realizan, manejo productivo y necesidades para implementar estrategias con esta comunidad, permitiendo que la cuenca tenga tiempo de recuperación en las áreas de interés para evitar de pérdida de suelo por erosión.
- Implementar una estrategia de recuperación de la vegetación propia de Páramo y de las zonas aledañas para permitir la retención de suelo.
- Continuar con el monitoreo de pérdida de suelo por erosión, pensando en escenarios de cambio climático que lleva a amplitud de precipitaciones y épocas secas, en especial en áreas de montaña alta.
- Implementar en la vigilancia estatal el uso de la ecuación universal que, aunque tiene limitantes, puede usarse como una herramienta que permite conocer variaciones dentro de un área específica, así como el apoyo de los SIG en este tipo de investigaciones y seguimientos.
- Utilizar el presente estudio como base para continuar monitoreando la cuenca del embalse de La Copa en especial en el área correspondiente a los municipios Toca, Soracá y Tuta que son en los que mayor pluviosidad se halló dentro de la cuenca y puede favorecer la erosión del suelo.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA MUNICIPAL DE TOCA. Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Toca, departamento de Boyacá, Colombia, 2004.

ALONSO, Javier. et al. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Editum, 2011.

ALVARADO, N.; LÓPEZ, P. V.; CASTILLO, F. Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica en Diferentes Sistemas de Producción Con Papa *Solanum tuberosum* L. Revista de Ciencias Agrícolas, 2009. Volumen XXVIII. Pags. 64-72.

ANTEZANA, J. Calibración de los factores de erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña. Taquiña, Bolivia: Centro de Levantamientos Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos, 2001.

AREKHI, Saleh, et al. Mapping soil erosion and sediment yield susceptibility using RUSLE, remote sensing and GIS (Case study: Cham Gardalan Watershed, Iran). J. Adv. Environ. Biol, 2012, 6(1): 109-124.

ARNOLDUS, H. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: De BOODS, T.; GABRIELS, D. (Eds.). Assesment of erosion. 1980. London, 125-132.

BARRERA, Hector; MONROY, Juan. Análisis del impacto de la explotación bovina sobre el ecosistema del páramo la cortadera Toca Boyacá. 2012. Tesis Doctoral.

BARRY, Roger Graham. Mountain weather and climate. Psychology Press, 1992. (Routledge physical environment series).

BAUTISTA, Claudia. Simulación de la pérdida de suelo de la parte baja de la microcuenca Quebrada Cune utilizando el modelo USLE. Trabajo de grado para optar por el título en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. 2015. Universidad de La Salle.177pp.

BUITRAGO, E. Desarrollo de un Modelo de Visualización de Erosión Hídrica en el Municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de Caso. 2011.Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Bogotá.

CASTAÑEDA, S., et al. Evaluación ecológico-hidrológica del plan de manejo de la Microcuenca del Río Talgua, Olancho. 2006. Tesis de Licenciatura. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana-2012.

CEBALLOS, Darney; TORO, Luis. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el Municipio de Anorí, Antioquia, Colombia. Gestión y Ambiente, 2012, 15(3): 51-63.

CLÉRICI, C. y GARCÍA-PRÉCHAC, F. Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de La Plata. Agrociencia, 2001. 5(1):92-103

Corporación autónoma regional de Boyacá (CORPOBOYACA). Plan de Ordenamiento Y Manejo De La Cuenca Alta Del Rio Chicamocha POMCA-RCH. Departamento de Boyacá, 2006. Colombia.

CORTEZ, A. et al. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. II. Región Noroccidental. Bioagro, 2011. 23(1), 13-18

CORTOLIMA (agosto de 2013). POM, Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Totare. Obtenido de [<https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files>

/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf], revisado el 07/05/18

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. Soil Erosion and Sediment Control Handbook. Rhode Island State Conservation Committee. 1989

DUQUE, E.; ESCOBAR, P. Mecánica de los Suelos. Universidad Nacional de Colombia. 2002.

ECHEVERRI, Leyder; OBANDO, Humberto. Erosividad de las lluvias en la Región Centro-Sur del Departamento de Caldas, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, 2010. 63(1).

Fomento Corporación, Corporación Andina de Fomento. El fenómeno el niño 1997-1998: memoria, retos y soluciones: Colombia. 2007

GABRIELS, D., et al. Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. Cazalac Org, 2004. 1-59.

GARCÍA, F. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (2ª Edición) Ministerio de Medio Ambiente, 2006. 311-336. EGRAF, Madrid.

GASPARI, Fernanda. y BRUNO, Juan. Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. Ecología Austral, 2003. 13:109-120.

GONZÁLEZ, Marta. La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología, 1991. 5: 133-150.

GRACIA, Jesús. Pérdida de suelo en cuencas. Capítulo 17 del Manual de ingeniería de Ríos. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. 1996

GRACIA, Jesús. Sedimentación en Embalses. Capítulo 18 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. 1996

HAZELTON, P.; MURPHY, B. Soil Physical properties. Interpreting soil test results: what do all the numbers mean, 2007. 5-29.

HUTH, Radan; et al. Weather categorization based on the average linkage clustering technique: An application to European mid-latitudes. International Journal of Climatology, 1993, 13(8): 817-835.

IDEAM, U.D.C.A. Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia-2015. IDEAM – MADS. Bogotá D.C., Colombia., 62pp. Publicación aprobada por el IDEAM, Diciembre de 2015, Bogotá D.C., Colombia.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá, Tomo II. Departamento administrativo nacional de estadística Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2005. 159pp.

JARAMILLO, Álvaro.; CHAVES, Bernardo. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. 2000.

JARAMILLO, R. Características climáticas de la zona cafetera. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Chinchiná (Colombia). Centro Nacional de Investigaciones de Café, 1988.

JORDÁN, Antonio; BELLINFANTE, Nicolás. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*, 2000, 7(3): 83-92.

LAL, Rattan. Soil quality and sustainability. En: R. Lal et al. *Methods for Assessment of Soil Degradation. Advances in Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 1998, 17-30pp.

LEIHNER, D. et al. 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. 1997. 227.

LONDOÑO, Carlos. *Cuencas Hidrograficas*. Universidad Del Tolima, 2001.

LÓPEZ, F. *Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de los Andes. 2002. Mérida, Venezuela.

LUNT, Herbert. The carbon-organic matter factor in forest soil humus. *Soil Sci*, 1931, 32 (27): e33.

MADERO, E.; BERGSMA, E. Erodabilidad y Erosión Hídrica Potencial en un Sector de la Cuenca del Rio Otun- Colombia. *Acta Agron* 1996. 46 –N°1/4.

MOLINILLO, Marcelo; MONASTERIO, Maximina. Patrones de vegetación y pastoreo en ambiente de Páramo. *Ecotropicos*, Sociedad Venezolana de Ecología, 2002. 15(1): 19-34

MORENO, Claudia; VALENZUELA, Sergio. Metodología evaluación impacto ambiental (EIA) de actividad agropecuaria, Páramo La Cortadera, veredas Butaga, Chaguata y Puerta Chiquita, Municipio de Pesca, Boyacá. 2017

NÁJERA, Oyolsi, et al. Riesgos de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. Cultivos tropicales. 2016. 37(2): 45-55

NEMIGA, A.; TREVIÑO, J. Modelos Espaciales Aplicados al Manejo de los Recursos Naturales: Una Propuesta en la Subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México. Universidad Autónoma Indígena de México. Ra Ximhai, enero-abril, 2008/Vol.4, Número 1.

OJEDA, B., et al. Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. En Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. Global Water Partnership, 2000

OLIVER, John. Monthly precipitation distribution: a comparative index. The Professional Geographer, 1980. 32 (3): 300-309.

ONGLEY, E. D. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje-55). GEMS/Water Collaborating Center Canada Center for Inland Waters, 1997, p. 21-37.

OÑATE-VALDIVIESO, Fernando. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. Revista electrónica de la REDLACH, Loja, Ecuador, 2004, 1(1): 27-32.

PAREDES, Cutberto. et al. Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 2013, 2013 (82): 118-130.

PARLAK, Mehmet; PARLAK, Altingul Ozaslan. Measurement of splash erosion in different cover crops. Turkish Journal of Field Crops, 2010. 15(2): 169-173.

PÉREZ G. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica. Tesis de Especialista en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. 2001. Bogotá.

PINEDA C. et al. Evaluación Física de Tierras de la Cuenca Alta del Río Guárico con Fines de Producción Sustentable de Agua. Agronomía Trop. 2006. 56(3): 385-414.

RAMÍREZ, F. A. Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad de Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué, 2006.

RAMÍREZ, O. et al. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. Cenicafé, 2007. 58(1), 40-52.

RAMÍREZ, O.; HINCAPIÉ, G. Riesgo a la Erosión en la Zona Cafetera Central del Departamento de Caldas. Cenicafe, 2009. 60(2): 173-189.

REKHI, S. et al. Mapping Soil Erosion and Sediment Yield Susceptibility using RUSLE, Remote Sensing and GIS. Advances in Environmental Biology, 2012. 6(1): 109-124. ISSN 1995-0756

RENARD, K. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook 703. 1997. USA.

REY, J. et al. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela: IV. región los Andes. *Bioagro*, 2012. 24(2): 115-120.

RIVERA, J. Determinación de los Índices de Erosividad, Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risalda). Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia (Tesis Master Science), 1990.

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

RIVERA, P. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. 1999. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia.

RIVERA, T. et al. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 2012. 46, 101-105.

RODRÍGUEZ, Juan. Geomorfología de un sector de la cuenca de Almazán (Soria): procesos de erosión de suelos y planteamiento de escenarios ante el cambio climático. 2008. Tesis Doctoral. Universidad Complutense De Madrid.

SANTACRUZ, G. Estimación de la Erosión Hídrica y su Relación con el Uso de Suelo en la Cuenca del Rio Cahoacán, Chiapas, Mexico. *Aqua-LAC*, 2011. 3(1): 45 – 54.

SMULYAN, Marilyn Hope. Application of the RUSLE erosion equation to the San Pedro Creek Watershed in Pacifica, California using ArcGIS 9.3. 1. 2011.

SUÁREZ, Jaime. Control de la Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda. 2001, ISBN 958-33-2734-4.

VALCARCEL, Ricardo. Estudio de los Procesos Erosivos en una Microcuenca: Zona Central de España - Puebla De Valles (Guadalajara). ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES. 1989. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

VEGA, T. Evaluación de la erosión hídrica superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo. 2008. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Talca, Chile.

VELASCO, I.; CORTÉS, G. Índices de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. En Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes, (Murcia, 2009)= Advances in studies on desertification: contributions to the International Conference on Desertification in memory of professor Jo. Universidad de Murcia, 2009. p. 431-434.

VILLA, Sebastián. Modelación de la Erosión Hídrica a Escala de Cuenca en la Zona Alta de la Quebrada La Garcia, Municipio de Bello, Antioquia. 2012. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.

WISCHMEIER, Walter & SMITH, David. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains: Guide for selection of practices soil and water consecration. In: Agricultural Handbook, 1965. 282, 47pp

ZINCK, Joseph. Suelos: información y sociedad. In: Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. México, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 2005. 9-19.