

**PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DE ZONAS VULNERABLES A
EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RIO BOGOTÁ CON EL MÉTODO RUSLE POR MEDIO DE
HERRAMIENTAS SIG**

**CINDI NATALI SALGADO CORTES
MARIA VICTORIA PORRAS OCHOA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera ambiental

Director

Ing. Jhon Jairo Castañeda Fandiño

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
FACATATIVÁ
2020**

Facatativá, 07 de mayo de 2020

AGRADECIMIENTOS

Detrás de este logro hay grandes personas a las que queremos agradecerles infinitamente por apoyarnos de una u otra manera; a nuestros padres, familiares y amigos los amamos con el corazón porque siempre han estado a nuestro lado.

Queremos agradecer a la Universidad de Cundinamarca y a todos sus docentes, en especial a nuestro director el Ingeniero Jhon Jairo Castañeda por brindarnos los conocimientos, herramientas y motivación que fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto.

Por último, nos resta agradecer a todos los que estuvieron acompañándonos y fortaleciéndonos durante todo este proceso en el cual nos hemos esforzado enormemente y nos llena de emoción y alegría culminar.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
JUSTIFICACIÓN	11
OBJETIVOS	11
GENERAL	11
ESPECIFICOS	11
MARCO REFERENCIAL	12
METODOLOGÍA	17
Fase I	17
Fase II	17
Fase III	22
RESULTADOS Y ANÁLISIS	23
RUSLE	23
ESTRATEGIAS	27
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFIA	37
ANEXOS	43
Anexo 1: Factor R	44
Anexo 2: Factor K	45
Anexo 3: Factor LS	46
Anexo 4: Factor C	47
Anexo 5: Factor P	48
Anexo 6: Modelo metodológico obtenido en Model Builder ArcGIS 10.6.1	49

CONTENIDO DE IMÁGENES

Imagen 1 <i>Mapa de la cuenca del Río Bogotá</i>	12
Imagen 2 <i>Resultado método RUSLE para la cuenca del Río Bogotá</i>	23
Imagen 3 <i>Incorporación de abonos verdes en los cultivos</i>	28
Imagen 4 <i>Plan de rotación de cultivos</i>	29
Imagen 5 <i>Implementación de diversificación funcional en un terreno</i>	30
Imagen 6 <i>Revestimiento del suelo con mallas biodegradables</i>	31
Imagen 7 <i>Implementación de pastoreo controlado</i>	32

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 <i>Valores normalizados del índice NDVI.</i>	21
Tabla 2 <i>Valores del Factor C</i>	21
Tabla 3 <i>Valores del factor P</i>	21
Tabla 4 <i>Grados de erosión según el protocolo de erosión del IDEAM</i>	22
Tabla 5 <i>Clasificación de la tasa de erosión en la cuenca del Río Bogotá</i>	24

INTRODUCCIÓN

La pérdida de la capa laminar del suelo por factores climáticos o presencia de actividad antrópica es un problema a nivel mundial debido al aumento de la erosión del suelo, ha disminuido la productividad del recurso en la agricultura poniendo en riesgo a su vez la seguridad alimentaria mundial, se habla de una pérdida media mundial del 0.3 por ciento del rendimiento anual de los cultivos y si continua así para el 2050 se puede llegar a perder hasta el 10 por ciento de la producción en la agricultura según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para la alimentación y la agricultura (FAO & GTIS, 2015).

El cambio climático es otro factor que genera cambios en las características del suelo haciéndolo más tendiente a la rápida erosión natural o antrópica, poniendo en riesgo los bienes y servicios ecosistémicos que son esenciales para el desarrollo humano. En todos los países a nivel mundial se presentan fenómenos de erosión natural, y dependiendo del tipo de clima y topografía del territorio serán tendiente a determinado grado de pérdida de suelos, situación que se va agravando en relación con el desarrollo de la población. Los suelos son muy importantes a nivel mundial ya que son parte fundamental de la regulación climática, de la producción, el progreso económico y social, entre otros, por lo que se hace necesario la implementación de políticas internacionales que procuren la protección, manejo y gestión adecuada del recurso.

En el siglo XX se ha evidenciado que en Latinoamérica y el Caribe el suelo es el soporte de una población que crece rápidamente tanto demográficamente como económicamente, sin embargo, el recurso se ve afectado por malas prácticas agrícolas, ganaderas o de expansión urbana que aumenta la vulnerabilidad en las zonas con más riqueza en biodiversidad, bienes y servicios ecosistémicos.

En el caso específico de Colombia se ha visto una constante degradación del suelo por conflictos en su uso, variaciones climáticas, altitudinales, relieve, tipos de vegetación y material

parental (CAR, s. f.); la cuenca del Río Bogotá en los últimos años ha presentado un constante deterioro, por la pérdida de la capa del suelo en proporciones significativas; lo que ha traído consecuencias que afectan tanto al ambiente como el desarrollo óptimo del hombre, por lo que se ha decidido recopilar la información existente, que no ha sido analizada en conjunto con el fin de dar una mejor gestión y manejo a la cuenca y para ello se hará uso de herramientas de información geográfica.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta informática que permite el almacenamiento de datos georreferenciados y su análisis, con el fin de obtener informes de tipo gráficos que permitan de forma rápida y económica tener respuestas a una problemática o situación, a partir de las cuales se puede planear y tomar decisiones efectivas sobre un territorio (Olaya, 2014).

Actualmente estas herramientas se han implementado en el sector ambiental y de ordenamiento territorial ya que es sencillo y económico acceder a la información y así mismo procesarla, uniendo múltiples variables que permitan reducir la incertidumbre en un estudio; lo que permite en este trabajo identificar de forma asertiva las zonas vulnerables a la erosión en la Cuenca del Río Bogotá y la relación con los factores que intensifican este proceso natural. Existen varios modelos para predecir o estimar la erosión del suelo; en esta ocasión se aplica el método de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada o revised universal soil loss equation (RUSLE), en la que se involucran variables como precipitación, pendiente, composición del suelo, cobertura y usos del recurso basados en la ecuación universal de pérdida de suelo o universal soil loss equation (USLE), sin embargo, se presentan algunas correcciones a limitaciones con las que contaba dicho modelo, tales correcciones implican algunos algoritmos que explican cada factor de manera individual, mediante la informatización de cada uno (García, 2011).

El objetivo de este trabajo es identificar las zonas que son más vulnerables a erosión dentro de la cuenca del Río Bogotá y sus causas más relevantes con herramientas SIG con el fin de plantear una herramienta de gestión futura para la comunidad, diversas autoridades y demás actores involucrados.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Aproximadamente desde el año 1950 se ha visto un deterioro progresivo en la cuenca del Río Bogotá (Banco Mundial, 2012; Forero, 2018), evidenciado mayormente en la incorrecta gestión del recurso hídrico; sin embargo, no es el único que se ve afectado. Según la Secretaría Distrital de Planeación (2014) el recurso suelo también se ha visto afectado por: la alta densidad poblacional (MADS, 2016), el rápido desarrollo urbano (Banco Mundial, 2012), las fallas en el ordenamiento territorial y la falta de coordinación entre los involucrados que han buscado de forma separada mantener estable la economía de la región.

Debido a que la toma de decisiones dentro de la cuenca involucra muchas partes, se han tomado medidas aceleradas derivadas de la politización y división entre las mismas evitando que haya una política única en el país respecto a la situación de la cuenca; esta indiferencia se ve reflejada físicamente en el deterioro del ecosistema, la reducción en la disponibilidad del recurso hídrico y ha afectado la economía ya que los sectores productivos han disminuido su rendimiento por la pérdida de suelo.

La pérdida de la capa del suelo a lo largo de toda la cuenca ha aumentado en los últimos años por el desarrollo de diferentes actividades productivas pertenecientes al sector agropecuario, minero y turístico; en el Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica POMCA del Río Bogotá (CAR, 2006) se identifican las zonas vulnerables a erosión, sin embargo, no se define una tasa de pérdida del suelo, ni el uso y manejo que se le está dando en dichas zonas relacionado con sus propiedades de formación, de lo que surge la pregunta de investigación:

¿Qué estrategias pueden ser pertinentes para el manejo de la vulnerabilidad a erosión en la cuenca del Río Bogotá?

JUSTIFICACIÓN

La problemática del deterioro del recurso suelo en la cuenca se encuentra expuesta en la sentencia del Río Bogotá (Consejo de Estado, 2014) y en el POMCA (CAR, 2006); a pesar de esto, no se han identificado a fondo las áreas más afectadas y no se han generado controles en los causantes de esta problemática entre los cuales se destacan la agricultura, la expansión urbana, la ganadería, el turismo, entre otros, que a su vez se ven potencializados por los factores climáticos.

En relación con lo anterior se hace importante hacer el reconocimiento de zonas vulnerables a pérdida o degradación del suelo, generando estrategias o procesos que contribuyan al desarrollo óptimo de las diferentes actividades económicas dentro del territorio a mediano y largo plazo, involucrando los distintos actores y teniendo en cuenta los factores antrópicos, meteorológicos y de formación del suelo.

Esta investigación es útil como herramienta base para el desarrollo y ejecución de otros proyectos enfocados en la gestión y planeación de territorios, permitiendo el fortalecimiento de procesos encaminados a la conservación de los ecosistemas y recursos naturales.

OBJETIVOS

GENERAL

Proponer estrategias para el manejo de zonas vulnerables a la erosión con el método RUSLE por medio de herramientas SIG en la cuenca del Río Bogotá.

ESPECIFICOS

- Recopilar información existente del área de estudio.

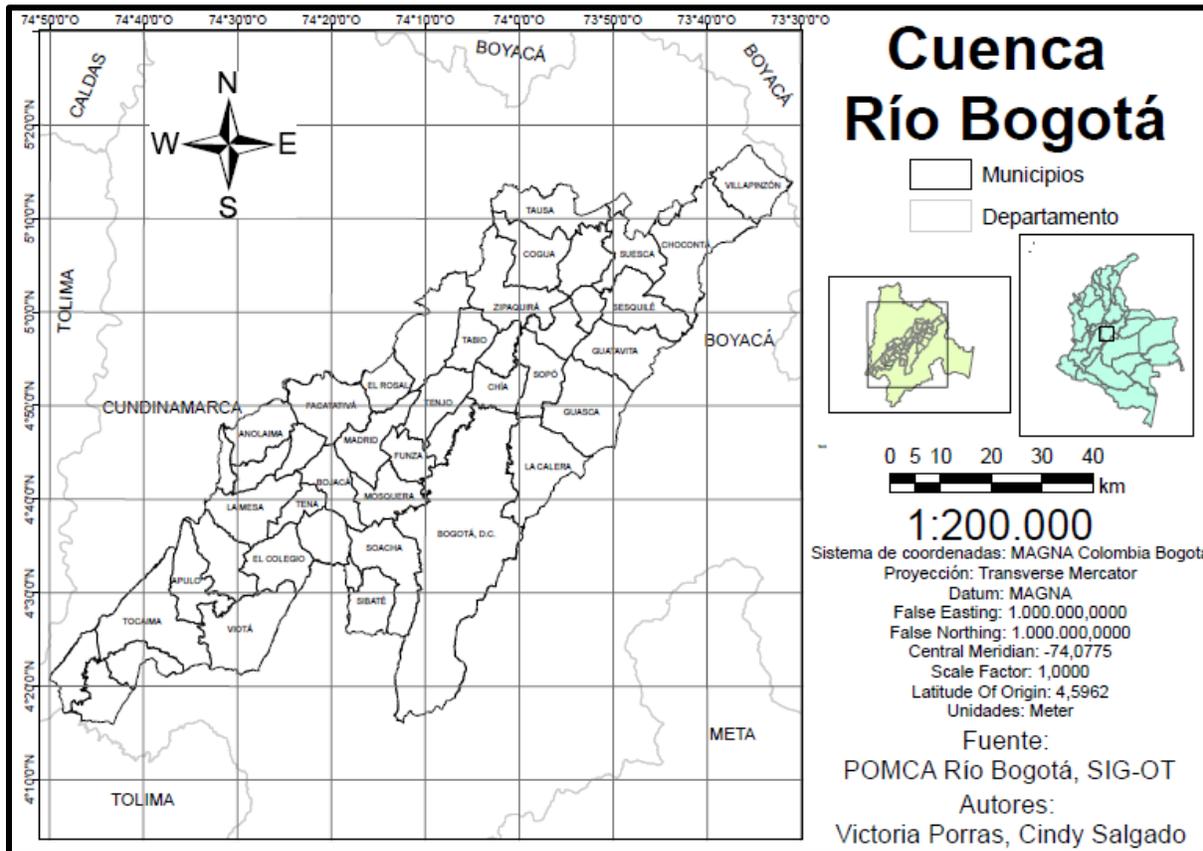
- Zonificar la vulnerabilidad de erosión en la cuenca teniendo en cuenta los factores del método RUSLE a través de sistemas de información geográfica.
- Plantear estrategias basadas en los resultados del modelo y el estado actual de la cuenca.

MARCO REFERENCIAL

El área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca media del Río Magdalena, nace a los 3300 msnm en el municipio de Villapinzón y desemboca a los 280 msnm en Girardot. Cuenta con un área superficial de 547608,21 Ha albergando 45 municipios cerca de la capital del país; es caracterizada por su variedad de paisajes, topografía y climas (CAR, 2006).

Imagen 1

Mapa de la cuenca del Río Bogotá



Fuente: Elaboración propia

La erosión del suelo es un fenómeno natural que causa pérdida de las propiedades del recurso debido a factores naturales, sin embargo, se ve acelerada por actividad antrópica (Fayas et al., 2019; Shin et al., 2019). Algunas de las causas naturales que influyen en la degradación del recurso son: las características de formación y pendiente como lo describen (Li et al., 2019) en la que resaltan como la composición edáfica del suelo, el comportamiento hidráulico y el gradiente de la pendiente pueden aumentar la erodabilidad del suelo, también influye la lluvia y la energía que pueda presentar el agua durante una tormenta según (Shin et al., 2019). Además, dentro de las causas principales de la erosión del suelo debidas a la actividad humana sobresalen la pérdida de cobertura vegetal y usos del suelo (Vijith et al., 2018), por ejemplo, sobre explotación por agricultura intensiva, minería, entre otros.

Según (Duque & Escobar, 2016) existen distintos tipos de erosión dependiendo de la causa, entre las que se destacan:

- Las provocadas por el agua, en donde se encuentran la saltación pluvial que se da por el impacto de las gotas de lluvia reduciendo la capa de infiltración, erosión laminar que arrastra de manera uniforme capas delgadas de suelo siendo una fuente importante de sedimentos, en surcos en la que el escurrimiento se concentra y forma pequeños canales pero se pueden corregir mediante perfilado y labranza, y en cárcavas que generan la formación de zanjas de gran profundidad y tamaño difíciles de controlar puede destruir laderas y su corrección resulta muy costosa, además puede llegar a alterar el relieve por la promoción de inestabilidades,
- Las de tipo interno causadas por el flujo subterráneo que debilita la estructura interna del suelo pudiendo generar manantiales, cárcavas y/o hundimientos,
- Erosión fluvial que se presenta en cursos de agua cuando la resistencia de los materiales es inferior a la fuerza del agua; dicha erosión se denomina socavación y

puede aumentar la profundidad del cauce (socavación de fondo) o ampliar el lecho del cauce (socavación lateral).

- Erosión por metabolismo, crecimiento o desarrollo de seres vivos (Bio-erosión),
- Erosión eólica que se da en el momento en el que la energía del viento vence la resistencia de las partículas del suelo,
- Y, por último, procesos de remoción en masa debidos al transporte directo de materiales por acción de la gravedad.

Adicional a esto se encuentra que la erosión del suelo se clasifica en grados de erosión la cual depende de la pérdida superficial del suelo. Se clasifica en:

- **Sin erosión:** Sin procesos de degradación del suelo por erosión; también se expresa como "Sin evidencia" (IDEAM et al., 2015).
- **Erosión ligera:** Se evidencia daño en los horizontes superficiales del suelo. Cuando la capa de suelo se adelgaza uniformemente no se hacen visibles huellas de surcos o inicios de cárcavas y las funciones bióticas originales se encuentran intactas (IDEAM et al., 2015).
- **Moderada:** Evidencia clara de remoción de los horizontes superficiales del suelo, presentándose surcos, terraceos y pequeñas cárcavas. Las funciones bióticas originales se encuentran parcialmente destruida y en la superficie se observan distintos colores de suelo como producto de la pérdida del horizonte superficial y la exposición de horizontes subsuperficiales (IDEAM et al., 2015).
- **Severa:** Horizontes superficiales completamente removidos y horizontes subsuperficiales expuestos. Pérdida casi total del horizonte orgánico-mineral. Se presentan surcos, cárcavas o terraceos de forma frecuente. Las funciones bióticas originales se encuentran ampliamente destruidas y la vegetación es escasa (IDEAM et al., 2015).

- **Muy severa:** Remoción de los horizontes subsuperficiales, presentando una red de surcos y cárcavas intrínsecos. Las funciones bióticas originales están completamente destruidas y no se presenta vegetación (IDEAM et al., 2015).

El fenómeno de erosión en el suelo se puede estimar mediante diferentes modelos matemáticos que consideran algunas variables y/o parámetros determinando causas y consecuencias de la erosión proporcionando resultados muy aproximados a la realidad, algunos modelos útiles para estimar la tasa de erosión son: USLE/RUSLE en el que se contemplan los factores erosividad de la lluvia, susceptibilidad de erosión del suelo, largo y grado de la pendiente, cobertura vegetal y manejo de cultivos y prácticas de conservación (FAO, s. f.); Erosion Productivity Impact Calculator o Calculadora del impacto de la productividad en la erosión (EPIC) que permite realizar estimaciones relacionadas con erosión, sedimentos y calidad de agua, su mayor diferencia con el método USLE/RUSLE es que maneja datos diarios disminuyendo los problemas en la estimación del factor de erosividad de la lluvia (Rojas, 2009); Soil loss equation model southern Africa o Modelo de estimación de pérdida de suelo para Sudáfrica (SLEMESA) que es una adaptación del modelo USLE al entorno africano teniendo en cuenta cultivos, clima, suelo y topografía (Breetzke et al., 2016), WATEM/SEDEM que es un modelo empírico-conceptual para predecir erosión y desplazamiento de sedimentos en la unión europea (Alatorre et al., 2013), entre otros. Dichos modelos en algunas ocasiones manejan los mismos datos, sin embargo, difieren a la hora de analizarlos dependiendo de la resolución tanto espacial como temporal que se requieran en los resultados (Andersen, 2016). El manejo de los datos para obtener los resultados del modelo que se emplee se facilita en cualquier programa de información geográfica, permitiendo realizar un análisis espacial que no es otra cosa que explotar datos espaciales mediante una colección de procesos (Olaya, 2014). Se han realizado diversos estudios y estimaciones a partir de diferentes modelos de predicción de erosión. Por ejemplo, (Moffat, 2015) realizó una investigación teórica en la Universidad de

Chile sobre la erosión hídrica basándose en un modelo matemático teniendo en cuenta la conservación de momentum y balance de masas para estimar e interpretar la posibilidad de erosión considerando gradientes hidráulicos y esfuerzo efectivo del suelo; (Wang et al., 2018) evaluó el rendimiento de cultivos teniendo en cuenta la pérdida de fósforo y suelo por acción de la escorrentía con el modelo EPIC en la región del Lago Erie (Norte América), (Konečná et al., 2019) evaluaron los posibles episodios hidrológicos y de erosión relacionados con el patrón de uso del suelo y manejo agrícola mediante WATEM/SEDEM; El método USLE se ha utilizado de manera más amplia: en Irán se utilizó para predecir el potencial de erosión y lograr un manejo adecuado de cuencas hidrográficas y uso potencial del suelo (Zare et al., 2017); en Jordania con ayuda de este método se observaron los impactos que ha causado el cambio en el uso del suelo y disminución de cobertura vegetal con un análisis multitemporal apoyado en imágenes satelitales (Alkharabsheh et al., 2013) y por último, en Turquía se calculó la tasa de erosión y se modeló con ayuda de ArcGIS 9.3 en la cuenca del arroyo Foldere con el fin de observar pérdida promedio anual y compararla con la tasa promedio del país dejando en evidencia la influencia de actividades antrópicas en el comportamiento de dicha tasa (Avcı et al., 2017).

En el caso de Colombia, (Ramírez & Hincapié, 2009) utilizaron el método USLE en el eje cafetero para determinar el riesgo a erosión, sin embargo, en este caso se descartaron los factores que involucran la cobertura vegetal y las prácticas de conservación con el fin de determinar la posible erosión en condiciones extremas y contemplando solo los factores naturales (lluvia, pendiente y composición del suelo); por otro lado, en la ciudad de Bogotá se utilizó para determinar las zonas de erosión hídrica con SIG y técnicas de teledetección (Castillo & Estrada, 2016).

La cuenca del Río Bogotá ha tenido un rápido crecimiento económico y demográfico desde la segunda mitad del siglo XX, a pesar de que toda la cuenca aporta el 31.7% al PIB nacional es una de las cuencas con los recursos (suelo, agua y aire) más degradados y contaminados (El

Espectador, 2016); es por esto que en los últimos años las diferentes autoridades ambientales y actores involucrados dentro de la cuenca han establecido diferentes estrategias para su recuperación, por ejemplo el Consejo de Estado (2014) propender a garantizar los derechos colectivos a un ambiente sano, salubridad pública y eficiente prestación de servicios públicos domiciliarios establecidos en los artículos 79, 88 y 365 respectivamente en la constitución política de 1991, para lograr dicho objetivo las autoridades deben encargarse de la descontaminación del río Bogotá y sus afluentes, basándose en el plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas que está reglamentado en el decreto 1076 de 2015.

METODOLOGÍA

Fase I

Se recolectó información cuantitativa y cualitativa de la zona de estudio; dicha información correspondía a:

- Datos mensuales de precipitación de 10 años de la red de estaciones hidrológicas de la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) y del IDEAM
- Características y composición del suelo, tomadas del mapa mundial de suelos del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA)
- Capas de cobertura y usos del suelo del Plan de Ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá
- Modelo de elevación digital del sensor ASTER
- Imágenes del satélite Landsat 8

Fase II

Se estimó la tasa de pérdida de suelo mediante la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), de la siguiente forma:

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

Donde:

A: Pérdida de suelo por unidad de área promedio anual $\left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}\cdot\text{año}}\right)$

R: Factor de potencial erosivo de la lluvia $\left(\frac{\text{MJ}\cdot\text{mm}}{\text{Ha}\cdot\text{h}\cdot\text{año}}\right)$

K: Factor de erodabilidad del suelo $\left(\frac{\text{Ton}\cdot\text{Ha}\cdot\text{h}}{\text{Ha}\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm}}\right)$

L: Factor de la longitud de la pendiente

S: Factor de inclinación de la pendiente

C: Factor de manejo agrícola y cobertura vegetal del suelo

P: Factor de prácticas de control de la erosión del suelo

Elaboración del modelo:

Luego de la obtención de los insumos se realizó un modelo, con la herramienta ModelBuilder del software ArcGIS 10.6 en el que se calcularon los factores como se muestra a continuación:

- Factor R:

El factor de erosión por lluvia se calculó con información promedio de precipitación de 2008 a 2018 con la siguiente ecuación:

$$R = 1,735 * 10^{\left(1.5 * \log_{10}\left(\frac{P_i^2}{P}\right) - 0,08188\right)} \quad (2)$$

Donde:

P_i = Lluvia mensual (mm)

P = Lluvia anual (mm)

Luego de calcular el factor R, se interpola con la herramienta Kriging de ArcGIS 10.6 como se cita en (Vijith et al., 2018)

- Factor K:

El factor de erodabilidad del suelo, relacionado con las propiedades del suelo; teniendo en cuenta el porcentaje de arenas, limos, arcillas y carbono orgánico. Se calculó siguiendo las recomendaciones de Sharpley & Williams (1990) como se cita en (TENG et al., 2019).

$$K = 0.1317 * \left(0.2 + 0.3 * e^{\left[-0.0256 * San \left(1 - \frac{Sil}{100} \right) \right]} \right) * \left(\frac{Sil}{Cla + Sil} \right) * \left[1 - \frac{0.25 * TOC}{TOC + e^{(3.72 - 2.95 * TOC)}} \right] * 1 - \left[\frac{0.7 * \frac{San}{100}}{SN_1 + e^{\left(22.9 * \frac{San}{100} - 5.51 \right)}} \right] \quad (3)$$

Donde:

San= Contenido en porcentaje de arena

Sil= Contenido en porcentaje de limo

Cla= Contenido en porcentaje de arcilla

TOC= Contenido en porcentaje de carbono orgánico

- Factor LS:

Es el factor relacionado con el largo y la magnitud de la pendiente, para calcularlo se procesó el modelo de elevación digital (DEM) mediante fill (relleno), slope (pendiente), flow direction (dirección del flujo) y flow accumulation (acumulación de flujo).

$$F = \frac{\frac{Sin\theta}{0.0896}}{3 * (Sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (4)$$

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

$$L = \frac{(A + 625)^{m+1} - A^{m+1}}{25^{m+2} * 22.13^m} \quad (6)$$

Para el caso del factor S, se tuvo en cuenta la siguiente condición (TENG et al., 2019):

$$\text{Si } \tan \theta < 0,09 \rightarrow 10,8 \text{ Sin}\theta + 0,03$$

$$\text{Si } \tan \theta \geq 0,09 \rightarrow 16,8 \text{ Sin}\theta - 0,5$$

Donde:

θ : Angulo de la pendiente (slope)

A: Acumulación del flujo (flow accumulation)

- Factor C:

El factor de cubierta y manejo depende de las actividades antrópicas; principalmente hace referencia a la cobertura vegetal que presenta el área de estudio y su capacidad para prevenir la erosión por la acción de las gotas de agua. (Castillo & Estrada, 2016). Este se calculó a partir de imágenes satelitales de Landsat 8 de marzo del 2020 con baja nubosidad y corrección atmosférica y por medio del software ArcGIS 10.6.1 se realizó el cálculo del índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) con la siguiente ecuación (Geo información, 2014):

$$NDVI = \frac{(PIR-VIS)}{(PIR+VIS)} \quad (7)$$

Donde:

NDVI: Índice normalizado de diferencias de vegetación

PIR: Banda Infrarrojo cercano (Banda 5)

VIS: Banda rojo visible (Banda 4)

Este proceso permite identificar de forma precisa la presencia o ausencia de vegetación, ya que la banda del infrarrojo cercano permite determinar los tipos y estado de la vegetación y a su vez delimitar los cuerpos de agua y el rojo visible determina la diferencia de especies vegetales dando como resultado la asignación de valores a cada píxel entre 1 y -1 en relación con la tabla 1 (Castillo & Estrada, 2016)

Tabla 1

Valores normalizados del índice NDVI.

Valores Normalizados	Clasificación
Valores tendientes a 1	Vegetación vigorosa y densa
Valores tendientes a -1	Escasa o nula vegetación

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, debido a la complejidad de determinar y encontrar información sobre este factor se realizó un proceso de condicionales en la calculadora ráster que permitió asignar con ayuda del ráster NDVI obtenido valores para el Factor C entre 0 y 1.5 relacionados (tabla 2).

Tabla 2

Valores del Factor C

Factor C	Clasificación
0	Cuerpos de agua
0 – 1.0005	Bosques
1.0005 – 1.0129	Zona urbana
1.0129 – 1.0417	Zonas de pastoreo
1.0417 – 1.05	Zonas de cultivos

Fuente: Elaboración propia

- Factor P:

El factor de prácticas de conservación en relación con las actividades antrópicas que contribuyen al control de la erosión, entre estas actividades se encuentran los cultivos y las áreas de reserva natural (Ibañez et al., s. f.). Para el cálculo del factor se tomó el ráster del índice NDVI y por medio de condicionales en la Calculadora Ráster, se asignaron valores como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

Valores del factor P.

Factor P	Clasificación
0.5	Cuerpos de agua
	Zona urbana
	Zonas de pastoreo

1	Zonas de cultivos Bosques
---	------------------------------

Fuente: Elaboración propia

- **RUSLE**

Para finalizar se realizó en la Calculadora Ráster la multiplicación de los factores R, K, LS, C y P con la ecuación 1 obteniendo así el modelo de erosión del suelo para la cuenca del Rio Bogotá.

La clasificación para el grado de erosión se muestra en la tabla 4, este se tomó del protocolo de erosión del IDEAM (IDEAM et al., 2015).

Tabla 4

Grados de erosión según el protocolo de erosión del IDEAM

Clasificación	Simbología	Grado de erosión
1		Sin erosión
2		Ligera
3		Moderada
4		Severa
5		Muy severa

Fuente: Elaboración propia

Fase III

Durante esta fase se realizó la revisión documental de los actos administrativos que influyen en los usos y actividades que pueden modificar la vulnerabilidad del suelo; esto con el fin de identificar los factores que generan el grado de erosión de cada área; entre estos factores se tuvo en cuenta:

- Usos actuales del suelo.
- Principales actividades económicas de las zonas críticas.
- Composición del suelo.
- Cobertura boscosa o zonas de protección

En relación con los factores a comparar se revisaron los siguientes actos administrativos:

- Plan de ordenación y manejo de la cuenta hidrográfica del Río Bogotá 2006.
- Planes de ordenamiento territorial de: Zipaquirá, Chía
- Planes Básicos de ordenamiento territorial de: Tocancipá
- Esquemas de ordenamiento territorial de: Tabio, Subachoque, Guatavita, Guasca, Gachancipá

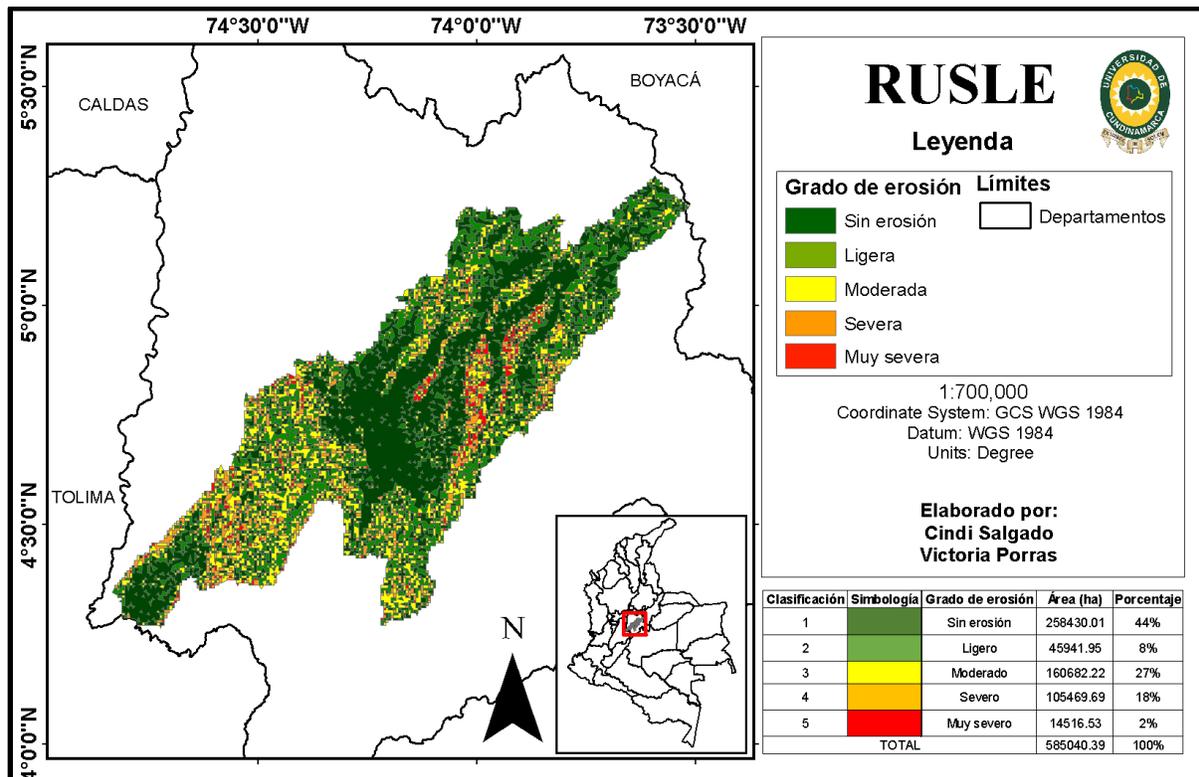
Los planes, planes básicos y esquemas de ordenamiento territorial a revisar se escogieron luego de obtener la tasa de erosión, según el grado por el que se vieran afectados los diferentes municipios. Estos documentos se revisaron de manera superficial para tener indicios de como su vocación de uso de suelo municipal podía influir en el resultado obtenido.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

RUSLE

Imagen 2

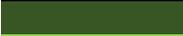
Resultado método RUSLE para la cuenca del Río Bogotá



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Clasificación de la tasa de erosión en la cuenca del Río Bogotá

Simbología	Grado de erosión	Tasa de erosión $\left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}\cdot\text{año}}\right)$	Área (Ha)	Porcentaje (%)
	Sin erosión	0 a 0.9127	258430.01	44
	Ligera	0.9127 a 2.1135	45941.95	8
	Moderada	2.1135 a 3.6507	160682.22	27
	Severa	3.6507 a 5.8122	105469.69	18
	Muy severa	5.8122 a 12.2490	14516.53	2
	Total		585040.39	100

Fuente: Elaboración propia

La cuenca del Río Bogotá presenta una alta vulnerabilidad de erosión del suelo y en general de todos sus recursos debido a la sobreexplotación, a la diferencia de actividades económicas, al crecimiento económico descontrolado y a la cantidad de habitantes que se encuentran en los 45 municipios que la conforman, incluyendo a la capital del país.

Actualmente se han planteado distintas estrategias de manejo de la cuenca, una de las más recientes es la Sentencia del Río Bogotá (Sentencia 2001-90479 de 24 de marzo de 2014) (Consejo de Estado, 2014) en la cual se estipulan una serie de medidas que buscan su protección, articulando esfuerzos, información, planeación y gestión de todos los municipios e involucrados en la cuenca; sin embargo, estas estrategias y medidas planteadas, han resultado poco efectivas en la conservación dentro de la cuenca ya que dichas estrategias no tienen una continuidad espacial ni temporal.

En la imagen 2 se evidencian los grados de erosión que se presentan en la cuenca del Río Bogotá, los cuales se distribuyen en un 52% de suelo sin erosión a erosión ligera y un 47% de moderada a muy severa, este último correspondiente a una tasa de pérdida del suelo entre 2.2 y 12.25 Ton/ Ha ·año (Tabla 5) encontrándose a lo largo de toda la cuenca distribuido aproximadamente de la siguiente forma:

- Cuenca alta: Zipaquirá, Tabio, Subachoque, Guatavita, Guasca, Sopó, Tocancipá, Gachancipá y Chía.
- Cuenca media: Bogotá, Cota, Bojacá, La Calera, Zipacón y San Antonio del Tequendama
- Cuenca baja: Anolaima, La Mesa, Tena, Apulo, Tocaima, Viotá y Cachipay

En general esta pérdida y grados de erosión se derivan de diferentes características específicas de cada área de la cuenca (alta, media y baja), que pueden favorecer aún más el aumento de la tasa de erosión.

En relación con los municipios nombrados anteriormente en los que se presenta un grado de erosión moderada a muy severa, existen zonas en las que se desarrollan actividades económicas como el pastoreo y la agricultura, muchas de estas realizadas de forma empírica, ya que hacen parte de las tradiciones culturales. Adicional a esto, como se corrobora con el factor P (Anexo 5) se trata de zonas donde se han talado bosques nativos para desarrollar dichas actividades, facilitando que la lluvia, tal como se determinó con el factor R (Anexo 1), el viento y otros factores climáticos provoquen la pérdida de la capa superficial del suelo, haciendo que cada vez sea más notoria favoreciendo si desestabilización e incrementando su vulnerabilidad.

En la cuenca alta se encontró que el grado de erosión del suelo es variado (imagen 2), sin embargo, algunas zonas presentan erosión de moderada a muy severa que están directamente relacionadas con la textura evaluada con el factor K (Anexo 2) el cual tiene un valor alto en dichas zonas. En los planes o esquemas de ordenamiento territorial de los municipios más afectados por erosión del suelo en esta cuenca estipulan que su vocación es de tipo agrícola, turístico, industrial, agroindustrial e incluso minera, sin embargo, a pesar de que cuentan con ecosistemas estratégicos, no se han generado acciones de protección ambiental significativas y por lo contrario el crecimiento ha sido desmedido.

Como se ve en el modelo obtenido (Imagen 2) la cuenca media es el área con menor afectación, sin embargo esto se debe a que así como se presenta en el factor C (Anexo 4) esta es una de las zonas de la cuenca que se encuentra mayormente urbanizada ya que los municipios se han centrado en crecer rápidamente debido a su cercanía con la capital, motivo por el cual determinó que allí la pérdida de suelo es irrelevante.

Por el contrario en la cuenca baja se determinó que presenta un grado de erosión entre moderado y severo, lo cual se encuentra estrechamente relacionado con que es una zona turística y muchas de las actividades que se realizan allí como caminatas, juegos extremos, senderismo, alpinismo, entre otras, generan un incremento en la probabilidad de la pérdida del suelo debido al desgaste y degradación que este sufre por el paso de los turistas y la instalación de infraestructura, por otro lado esta zona también presenta gran cantidad de monocultivos los cuales degradan el suelo haciendo que pierda sus propiedades para brindar servicios ecosistémicos acarreado un abandono de terrenos o generando grandes zonas de pastizales susceptibles a la erosión.

Adicional a lo mencionado anteriormente se encontró que en los actos administrativos no se evidencia la erosión como un factor importante o las medidas que se pueden tomar para mitigarla, por ejemplo, en el POMCA (CAR, 2006) se muestra la tasa de erosión de la cuenca y se identifica en qué lugares se da, Sin embargo, no se evalúan las consecuencias de la pérdida de este recurso no renovable, ni las estrategias y cambios tecnológicos que podrían adoptar las diferentes actividades para disminuir este fenómeno.

Además, en los planes, planes básicos o esquemas de ordenamiento territorial se encuentran algunos problemas, entre los que se resaltan que no se contempla la erosión como un limitante a la hora de determinar los usos del suelo y la forma de crecimiento y/o desarrollo económico que debería tener el territorio, como regla general en ninguno de estos municipios contemplan la parte ambiental como fuente de desarrollo económico, y a pesar de que los municipios

contemplan zonas de protección y conservación ambiental las medidas que se toman son individuales y no logran impactar en todo el territorio involucrado dentro de la cuenca. Otro problema encontrado en este tipo de documentos es que en casi todos los municipios son muy antiguos, a pesar de que la ley 388 de 1997 dicta que estos planes tienen una vigencia máxima entre 12 y 16 años y que se deben revisar cada 4 años para realizar las actualizaciones necesarias. Algunos llevan hasta 20 años y hasta ahora están comenzando el proceso de renovación, impidiendo evaluar la forma de crecimiento de los municipios en los últimos años y los cambios requeridos para generar estrategias de protección y conservación de ecosistemas estratégicos y recursos naturales a través de toda la cuenca.

ESTRATEGIAS

A continuación, se presentan las estrategias propuestas para contribuir con la prevención de la erosión en la cuenca del Río Bogotá, estas se presentan según los sistemas productivos que se desarrollan allí:

- **Agricultura:**

- ✓ **Aplicación de abonos verdes:**

Esta es una alternativa para evitar que el suelo este completamente desnudo en tiempos prolongados permitiendo su conservación y evitando que los factores climáticos generen erosión, al mismo tiempo mejora la fertilidad y la calidad permitiendo que en las próximas cosechas el suelo sea más productivo.

Consiste en agregar materia orgánica que ha pasado por un proceso de descomposición y que es rica en nutrientes, lo cual evitará que a futuro se utilicen fertilizantes u otros tipos de componentes para que las plantas crezcan.

(FAO & MADS, 2018)

Proceso:

1. Realizar un proceso de compostaje con la biomasa obtenida de las plantas que se tumban.
2. Dispersar el abono en el terreno de forma manual o mecánica.
3. Incorporar el abono verde al suelo, es decir se utiliza el abono que se encuentra en una etapa de descomposición en la cual es de color verde.

Imagen 3

Incorporación de abonos verdes en los cultivos



Fuente: (FAO & MADS, 2018)

✓ **Rotación de cultivos:**

Esta estrategia consiste en cultivar en un terreno distintos tipos de cultivos para evitar que el suelo pierda su fertilidad, permitiendo la diversificación de los sistemas productivos y contribuyendo a la protección del suelo evitando la erosión. Este es un sistema que puede alternarse de forma fácil cada año.

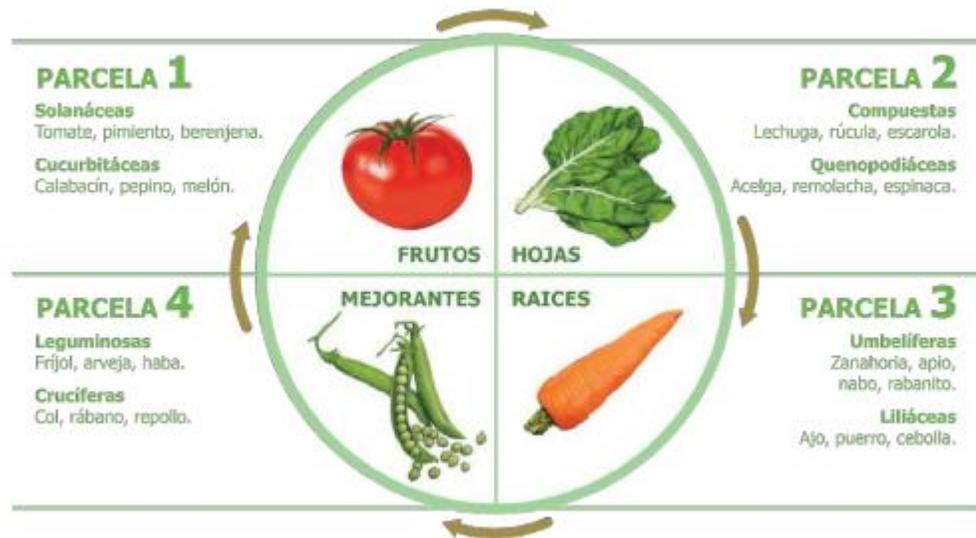
Proceso:

1. Dividir el área en parcelas similares.
2. Alternar anualmente los cultivos verificando que estos tengan requerimientos nutritivos distintos.

3. Realizar un plan de rotación teniendo en cuenta el tipo de suelo, las necesidades nutricionales de la planta y los periodos de cosecha.

Imagen 4

Plan de rotación de cultivos



Fuente: (FAO & MADS, 2018)

✓ Diversificación funcional:

Esta estrategia se basa en el aumento de especies que cumplen una función dentro de un agroecosistema, se tienen tres tipos de diversificación: la temporal, la espacial y la genética. Esta práctica sostenible permite mantener la cobertura vegetal de forma abundante evitando que se presente erosión en el suelo.

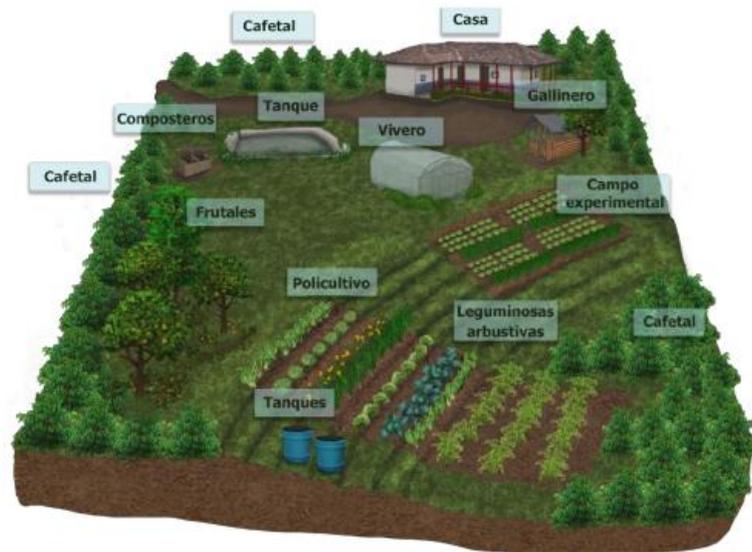
Proceso:

1. Sistemas agroforestales: Mezcla de cultivos de árboles junto con cultivos anuales.
2. Sistemas silvopastoriles: Incorporación de árboles en la producción pecuaria.

3. Sistemas agrosilvopastoriles: combinación de árboles leñosos o frutales con ganadería y/o cultivos en el mismo terreno.

Imagen 5

Implementación de diversificación funcional en un terreno



Fuente: (FAO & MADS, 2018)

- **Pastoreo:**

- ✓ **Recubrimiento para el control de la erosión:**

Se trata de una capa de fibras naturales procesadas las cuales son biodegradables. Estas se ponen temporalmente como una capa superficial del suelo para controlar la erosión y agilizar el proceso de fijación de la vegetación, pueden estar hechas de paja, viruta de madera, coco, polipropileno o una combinación formando mallas las cuales pueden ser adaptadas según requerimientos del terreno. Este sistema puede durar desde 3 meses hasta 3 años dependiendo del uso y el mantenimiento que se realice a los pastizales. En

caso de requerir un sistema con mayor durabilidad se deben utilizar mallas más resistentes, mezclando fibras naturales de mayor tiempo de degradación junto con materiales sintéticos (Díaz Mendoza, 2011). Se recomienda sembrar pasto de corte en lotes con elevada pendiente para evitar el pastoreo y reducir la erosión

Proceso:

1. Realizar la siembra de las semillas o brotes de pasto.
2. Extender el textil natral sobre el terreno y adaptarlo según las necesidades.
3. Realizar mantenimiento cada vez que el productor considere que es necesario.

Imagen 6

Revestimiento del suelo con mallas biodegradables



Fuente: (Díaz Mendoza, 2011)

✓ **Pastoreo controlado rotativo:**

Esta estrategia se basa en la rotación del ganado dentro de un terreno, el cual debe ser dividido en el número de secciones consideradas por el productor; estas deben estar separadas por medio de barreras, ya sean cercas o barreras

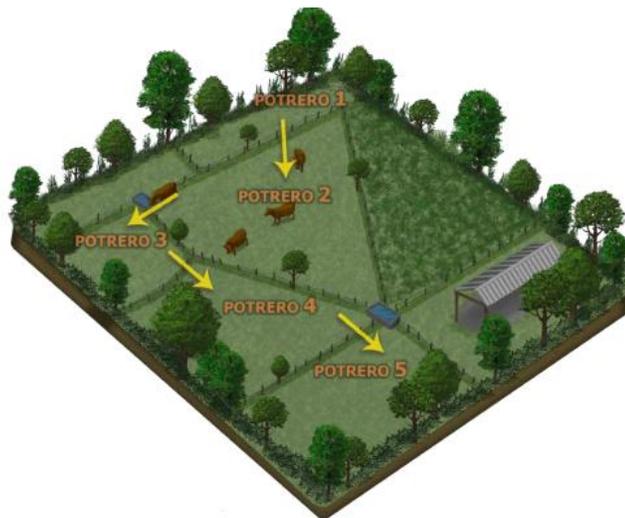
vivas. Esta práctica permitirá que el suelo no se compacte y que crezcan los pastizales beneficiando el crecimiento de la cobertura vegetal, reduciendo la erosión y dando paso a la conservación de los servicios ecosistémicos que este brinda a la actividad productiva. Estos productores se verán favorecidos con la aplicación de esta estrategia ya que evitara el sobrepastoreo y la distribución óptimas de alimento y nutrientes para el ganado (FAO & MADS, 2018).

Proceso:

1. Subdividir los lotes y planear las asociaciones entre pastos, gramíneas y leguminosas.
2. Concentrar una buena densidad de animales en uno o dos corrales teniendo en cuenta la calidad de pasto que cada uno necesita.
3. Determinar el tiempo de ocupación y descanso de cada lote.

Imagen 7

Implementación de pastoreo controlado



Fuente: (FAO & MADS, 2018)

- **Turismo:**

- ✓ Zonificar el espacio destinado al turismo dependiendo del tipo de suelo, en suelos que sean más frágiles o que ya estén más desgastados se pueden realizar actividades que no generen tanta demanda del recurso y no propendan a su erosión o generar áreas de protección y conservación que sirvan como rutas para caminatas ecológicas.
 - ✓ Manejar grupos adecuados de visitantes con el fin de no exceder la capacidad de carga de un ecosistema.
 - ✓ Generar áreas de protección (como PNN) y que un porcentaje de las entradas económicas sea destinado a la conservación del área.
 - ✓ Diseñar y operar mediante una infraestructura que sea autosostenible.
- **Minería:**

Prevenir la erosión del suelo mientras se desarrolla esta actividad es imposible, sin embargo, existen algunas opciones para adoptar una vez el área se deja en abandono para tratar de contrarrestar la erosión hídrica o eólica que son las que más afectan este tipo de suelo. Cabe aclarar que para lograr una recuperación “completa” del área, se deben tener en cuenta 5 etapas principales (Montes de Oca-Risco & Ulloa-Carcassés, 2013): Edáficas, topográficas, geotécnicas, hídricas y ecológicas, sin embargo, en este caso solo se tendrá en cuenta la primera etapa que busca devolver las propiedades físicas y químicas al suelo para que este sea capaz de soportar vegetación, lo cual se puede lograr a partir de los siguientes pasos:

- ✓ Proporcionar nutrientes al suelo: esto se puede lograr mediante suministro de suelo natural de otro lugar, abonos o material biodegradable tal como biolodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Facilitar el crecimiento y propagación de especies pioneras que “sean capaces de modificar física o químicamente el hábitat, modulando la disponibilidad de recursos para otras especies” (Arranz González et al., 2019), con la distribución

de semillas de estas especies. En este caso se recomienda empezar con la siembra de leguminosas que tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico y aportan materia orgánica mejorando la fertilidad del suelo (Ruiz Álvarez & Molina López, 2014) y otras especies nativas de la cuenca del Río Bogotá (Van Der Hammen, 1998) se recomiendan: Ciro (*Baccharis bogotensis*), Hayuelo (*Dodonaea viscosa*), Laurel de Monte (*Myrica parvifolia*), entre otros que son capaces de soportar condiciones adversas en el suelo y durante su crecimiento van a proporcionar estructura y nutrientes al suelo para que este sea más favorable a otras especies nativas.

- ✓ Realizar seguimiento al crecimiento y sobrevivencia de los ejemplares sembrados, los que no hayan logrado sobrevivir deben ser reemplazados con el fin de no dejar descubierto el suelo en esa zona.
- ✓ La siembra de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas puede contribuir a la meteorización de las rocas, ayudando a la génesis de nuevo suelo en la zona abandonada.
- ✓ En este caso en específico se recomienda que el proceso se inicie lo más cerca posible al momento de abandono de la mina, ya que requiere periodos de tiempo largos para la recuperación del suelo.

CONCLUSIONES

- El proceso de recopilar la información georreferenciada para el modelo fue sencillo, debido a que las bases de datos están disponibles en la red de forma gratuita. Además el uso de herramientas SIG permite el análisis de dicha información de forma rápida y económica garantizando la obtención de resultados confiables.
- La evaluación de la tasa de erosión por medio del método RUSLE permitió identificar las zonas más vulnerables generando una herramienta base para la planificación,

ordenamiento, gestión territorial y desarrollo productivo; teniendo en cuenta que el suelo es un recurso no renovable y actualmente es uno de los más afectados.

Adicionalmente, el método permite ser aplicado en cualquier área de estudio, considerando las condiciones específicas tanto naturales como antrópicas que generan influencia en la pérdida del suelo.

- Los municipios que se encuentran en la cuenca, centrados en el desarrollo económico y social siguen avanzando sin tener en cuenta el aspecto ambiental o los usos potenciales del suelo, por lo que se hace importante el planteamiento de estrategias respecto a la gestión y el manejo del recurso suelo enfocado en el desarrollo de las actividades productivas de forma sostenible.
- El desarrollo de este tipo de proyectos permite la generación de herramientas útiles para la gestión y manejo adecuado de los recursos, contribuyendo a su conservación y proyectando el sistema económico dentro de un modelo sostenible.

RECOMENDACIONES

- Realizar las revisiones y actualizaciones de los planes, planes básicos y esquemas de ordenamiento territorial como lo estipula la normativa vigente y basar los planes de desarrollo de cada administración en torno a esos planes.
- Adoptar medidas de conservación y protección conjuntas entre varios municipios para lograr continuidad espacial, así mismo que las medidas sean para protección de todos los recursos en conjunto y no uno en específico (por ejemplo, solo agua).
- Establecer como prioridad los ecosistemas estratégicos de los municipios y basar el desarrollo económico en torno a ellos y no al contrario como se viene haciendo actualmente.
- Promover que los pequeños, medianos y grandes productores adopten dentro de su sistema medidas de conservación e implementen buenas prácticas ambientales que

contribuyan a la reducción de la tasa de pérdida de suelo, logrando menos impactos y mayor productividad.

- Velar en cada municipio que el uso real del suelo este acorde con su uso potencial y de no ser así, adoptar medidas para reducir el impacto de la actividad realizada.
- Generar cubierta vegetal sobre todo en áreas en donde se encuentre suelo totalmente desnudo, además de garantizar que dicha cubierta vegetal sea endémica y que le aporte propiedades al suelo y a los microorganismos que habitan allí.
- Utilizar los resultados obtenidos aquí como herramienta para la planeación territorial, en base al conocimiento de que zonas son más vulnerables y en que zonas se requiere una actuación inmediata.
- Buscar alternativas a la cultura extractiva del país y de la cuenca para lograr el crecimiento económico a partir del cuidado y conservación de recursos naturales.

BIBLIOGRAFIA

- Alatorre, L. C., Beguería, S., Lana-Renault, N., & Navas, A. (2013). Modelización espacialmente distribuida de la Erosión y el transporte de sedimento en cuencas de montaña del Pirineo Aragonés: Retos para la calibración y validación. *Cuadernos de investigación geográfica*, 39(2), 287-314.
- Alkharabsheh, M. M., Alexandridis, T. K., Bilas, G., Misopolinos, N., & Silleos, N. (2013). Impact of land cover change on soil erosion hazard in Northern Jordan Using Remote Sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 912-921.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.101>
- Andersen, J. (2016). *Erosion risk mapping Evaluating the effects of high resolution topographic data in erosion modelling*. Aalborg University.
- Arranz González, J. C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R., Fernández Naranjo, F. J., Vadillo Fernández, L., & Alberruche del Campo, E. (2019). *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/guiarehabilitacioninstalacionesresiduosminerosabandonadas2019_tcm30-496582.pdf
- Avcı, V., Sunkar, M., & Toprak, A. (2017). Malatya Kuzeydoğusunda Ballı ve Memikan Dereleri Arasındaki Sahanın Erozyon Duyarlılık Analizi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2017(27), 769-799. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.329256>
- Banco Mundial. (2012). *Gestión Integral de Agua Urbanas Estudio de Caso Bogota*. <http://siteresources.worldbank.org/INTLAC/Resources/257803-1351801841279/BogotaEstudiodeCasoESP.pdf>

- Breetzke, G. D., Koomen, E., & Critchley, W. R. S. (2016). GIS-Assisted Modelling of Soil Erosion in a South African Catchment: Evaluating the USLE and SLEMSA Approach. *Intech, I(Tourism)*, 21. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- CAR. (s. f.). *Diagnóstico por erosión*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b9045459a4e5.pdf>
- CAR. (2006). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>
- Castillo, J. R., & Estrada, J. L. (2016). *Determinación de zonas de erosión hidrica a partir de la ecuacion universal de la pérdida del suelo (R.U.S.L.E), Sistemas De Informacion Geografica y tecnicas de teledeteccion en la ciudad de Bogota D.C Para el año 2013* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3042/1/LizarazoSalcedoIvanAlberto2016.pdf>
- Consejo de Estado. (2014). *Sentencia Rio Bogota Consejo De Estado* (pp. 1-232).
- Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83(2007), 5–71. http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero_articulo?codigo=2875596&orden=0
- Díaz Mendoza, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales , no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e investigación*, 31(3), 80-90. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a09.pdf>
- Duque, G., & Escobar, C. (2016). Erosión de suelos. En *Geomecánica* (pp. 122-135). Universidad Nacional de Colombia.
- El Espectador. (2016). *Río Bogotá: una multimillonaria riqueza que se desaprovecha*. <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/rio-bogota-una-multimillonaria-riqueza-se->

desaprovecha-articulo-647460

FAO. (s. f.). *Tema 1: Predicción de la erosión de suelos*. Recuperado 25 de septiembre de 2019, de <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S03.htm>

FAO, & GTIS. (2015). *Estado mundial del recurso suelo, resumen tecnico*.
<http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>

FAO, & MADS. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*. <http://www.fao.org/3/i8864es/I8864ES.pdf>

Fayas, C. M., Abeysingha, N. S., Nirmanee, K. G. S., Samaratunga, D., & Mallawatantri, A. (2019). Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in KELANI river basin in Sri Lanka. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>

Forero, R. A. M. (2018). *Río Bogotá: Recomendaciones Para La Revisión General Del POT*.
[http://veeduriadistrital.gov.co/sites/default/files/files/Publicaciones 2018/Rio Bogota recomendaciones para la revisión general del POT VF \(26 nov 18\)\(1\).pdf](http://veeduriadistrital.gov.co/sites/default/files/files/Publicaciones%202018/Rio%20Bogota%20recomendaciones%20para%20la%20revisi%253Bn%20general%20del%20POT%20VF%20(26%20nov%2018)(1).pdf)

García, J. L. (2011). *Modelos de erosión 2 Modelos paramétricos. Proceso erosivos-Primera parte* (p. 93). Universidad Politécnica de Madrid.
https://imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/dr_jose_garcia_procesos_erosivos/procesos_erosivos_modelos_2.pdf

Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. M. (s. f.). *LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE)*.

IDEAM, U. D. C. A., & MADS. (2015). *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión*.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023647/Protocolo-erosion.pdf>

- Konečná, J., Karásek, P., Beitlerová, H., Fučík, P., Kapička, J., Podhrázská, J., & Kvítek, T. (2019). Using WaTEM/SEDEM and HEC-HMS models for the simulation of episodic hydrological and erosion events in a small agricultural catchment. *Soil and Water Research*, 2019(1), 1-12. <https://doi.org/10.17221/202/2018-swr>
- Li, T., Li, S., Liang, C., He, B., & Bush, R. T. (2019). Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation. *Catena*, 178(March), 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.008>
- MADS. (2016). *Política Para la Gestión Sostenible del Suelo*. http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Moffat, R. (2015). Aplicación de un modelo hidromecánico de erosión interna asociado al esfuerzo en la fracción fina del suelo. *Obras y proyectos*, 17, 39-44.
- Montes de Oca-Risco, A., & Ulloa-Carcassés, M. (2013). Recuperación De Áreas Dañadas Por La Minería En La Cantera Los Guaos, Santiago De Cuba, Cuba. *Luna Azul*, 37, 74-88. <https://doi.org/10.17151/luaz.2013.37.6>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Pacheco, H., Marcano, A., & Cartaya, S. (2014). *Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Mirando VRSS-1*.
- Ramirez, F. A., & Hincapié, E. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de caldas 1. *Cenicafé*, 60(2), 173-189. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)173-189.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)173-189.pdf)
- Rojas, R. (2009). Capítulo 5: Métodos de estimación de la erosión y sedimentos. En *Hidrología aplicada al manejo de cuencas* (pp. 69-89).

<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/manualhid.pdf>

Ruiz Álvarez, E., & Molina López, D. L. (2014). Revisión de literatura sobre beneficios asociados al uso de coberturas leguminosas en palma de aceite y otros cultivos permanentes. *Palmas*, 35(1), 53-64.

Secretaría Distrital de Planeación. (2014). *Aproximación A Las Implicaciones Del Fallo del Consejo de Estado Sobre el Río Bogotá*.

http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/aproximacion_a_las_implicaciones_del_fallo_del_consejo_de_estado_sobre_el_rio_bogota.pdf

Shin, J. Y., Kim, T., Heo, J. H., & Lee, J. H. (2019). Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea. *Catena*, 176(July 2018), 125-144.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.005>

TENG, H. fen, HU, J., ZHOU, Y., ZHOU, L. qing, & SHI, Z. (2019). Modelling and mapping soil erosion potential in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2), 251-264.

[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62045-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62045-3)

Van Der Hammen, T. (1998). *Plan ambiental de la cuenca alta del Río Bogotá*.

<http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33796/28263.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vijith, H., Hurmain, A., & Dodge-Wan, D. (2018). Impacts of land use changes and land cover alteration on soil erosion rates and vulnerability of tropical mountain ranges in Borneo.

Remote Sensing Applications: Society and Environment, 12, 57-69.

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.003>

Wang, Z., Zhang, T. Q., Tan, C. S., Taylor, R. A. J., Wang, X., Qi, Z. M., & Welacky, T. (2018).

Simulating crop yield, surface runoff, tile drainage and phosphorus loss in a clay loam soil

of the Lake Erie region using EPIC. *Agricultural Water Management*, 204(March), 212-221.

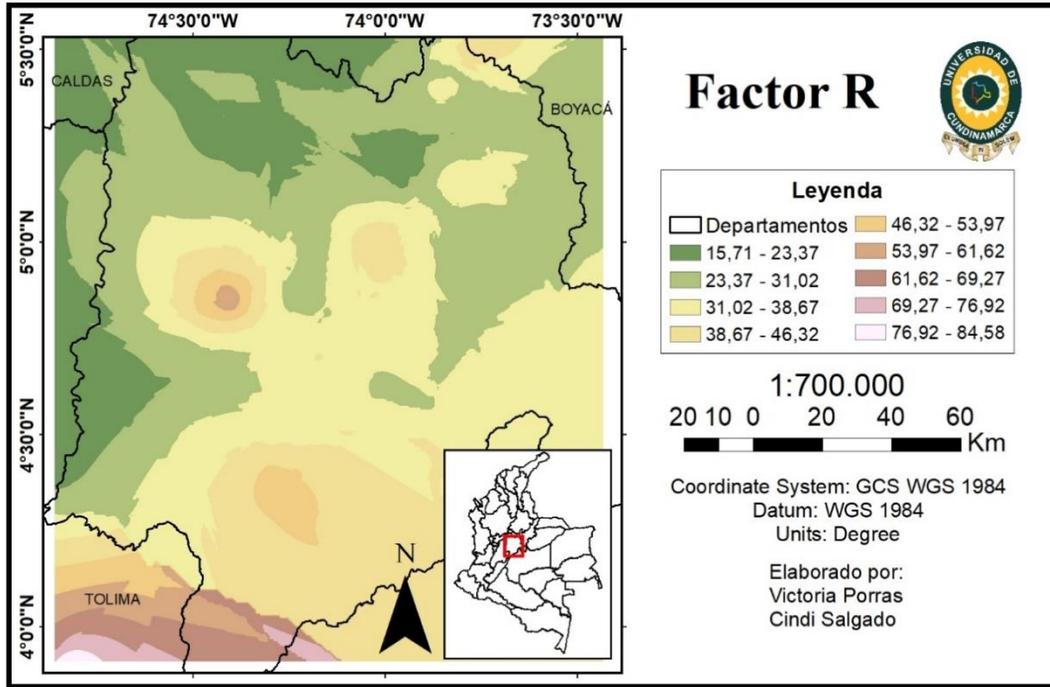
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.021>

Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, 67(June), 558-

572. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028>

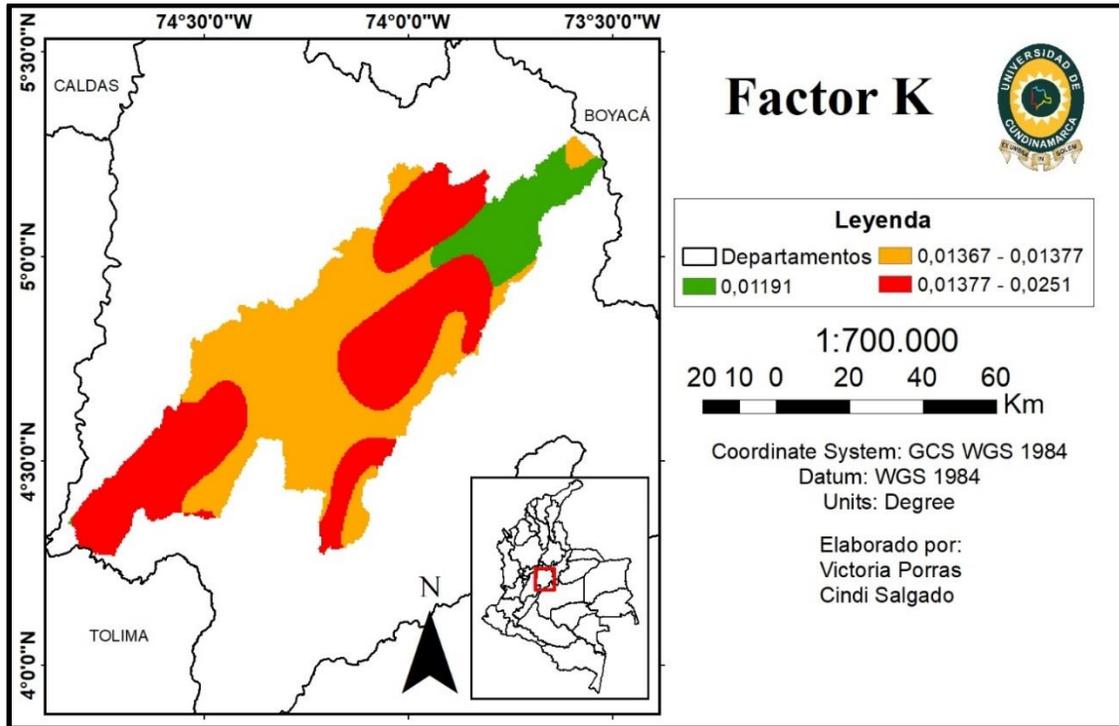
ANEXOS

Anexo 1: Factor R



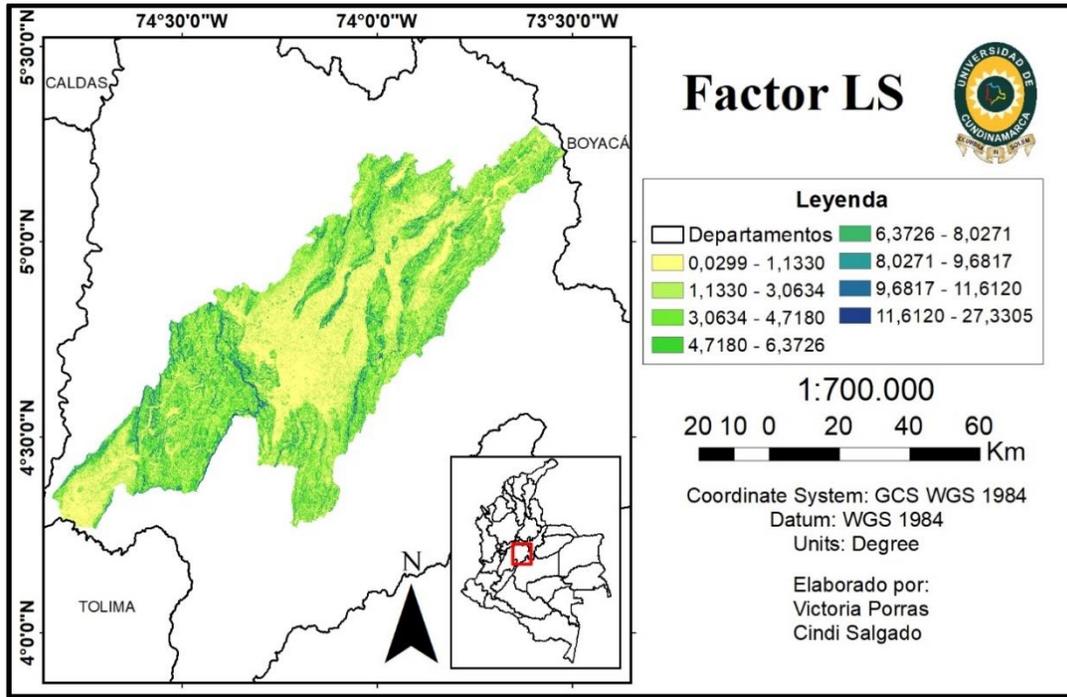
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Factor K



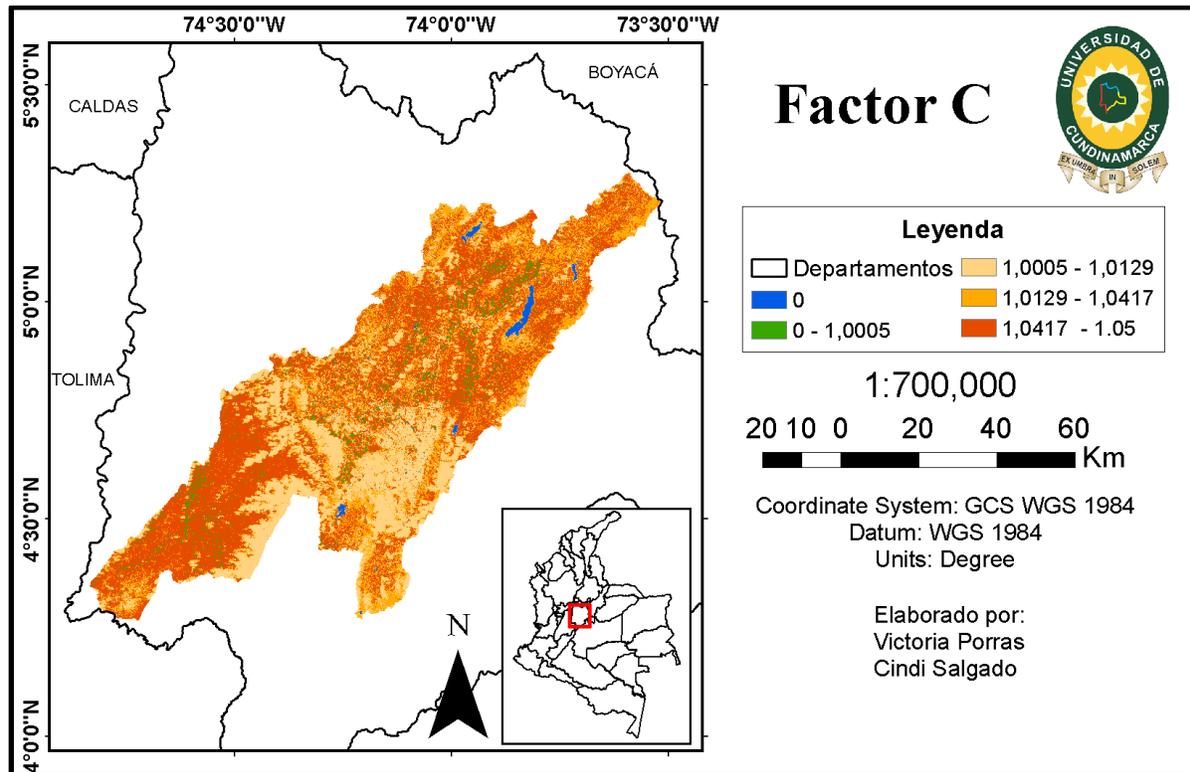
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Factor LS



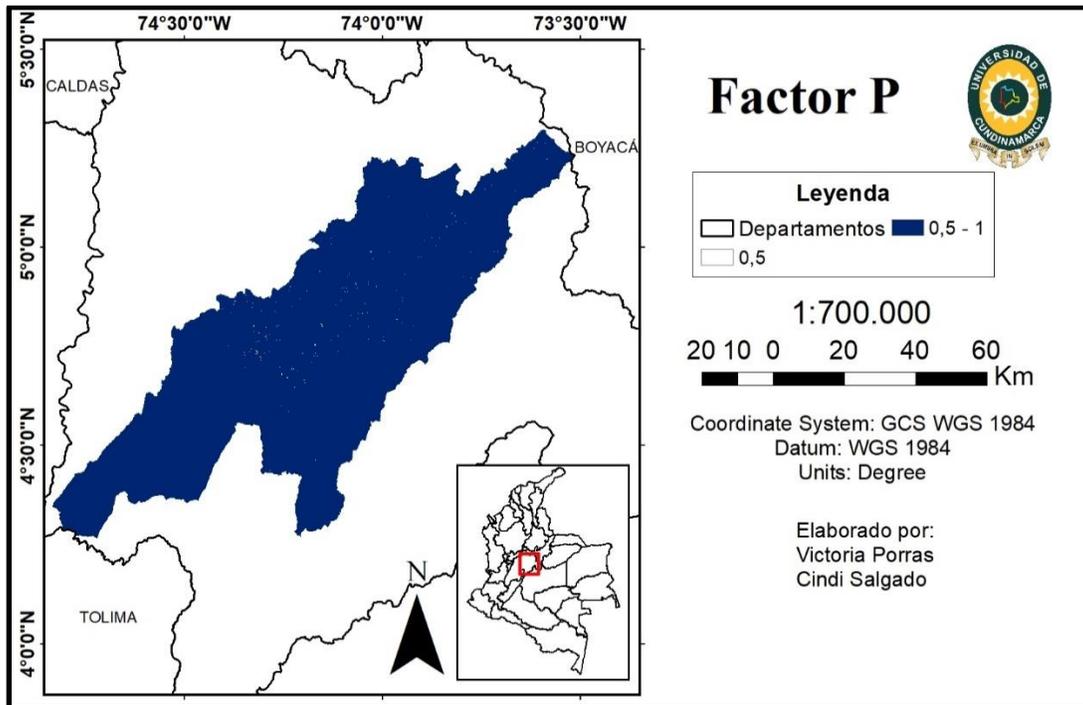
Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Factor C



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Factor P



Fuente: Elaboración propia

