

**Determinación de la longitud, pendiente y cobertura vegetal de la cuenca del río Tona,
mediante la interpretación de fotografías aéreas del satélite Landsat 8.**

Sergio Andrés Alarcón Sánchez

Jhon Edwar Rodríguez Genes

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Civil

Director de proyecto

Andrés Almeyda Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta el último eslabón y cumplir con una de mis metas propuestas en la vida, por darme la sabiduría y tranquilidad necesaria para abordar todas y cada de las dificultades que atravesé a lo largo de este arduo camino universitario.

Quiero expresar mi más grande agradecimiento y admiración a mi madre, *Rosa Isabel Genes Soto*, pues este logro es tanto mío como de ella, a mi hermana *Alba Luz Rodríguez Genes*, mi hermano *Jose Luis Rodríguez Genes* y a mis sobrinos *Jeinner, Karol y Samuel*, quienes a la distancia siempre me brindaron el mayor de los apoyos, atención y admiración durante este ciclo.

Agradezco a mi novia, *Jennyfer Alexandra Mora Zayas*, una joven incondicional, quien a pesar de las adversidades ha tenido la paciencia suficiente para acompañarme, entenderme, escucharme, quererme y apoyarme durante mi estadía en mi etapa universitaria.

Muchas gracias a aquellos amigos que se cruzaron en mi camino mientras he tenido el grato privilegio de vivir esta hermosa etapa de mi vida, los amigos de estudio, los amigos de las clases, los amigos de los juegos, los amigos de la diversión el fin de semana, los amigos de la carrera, los amigos que nos regala el fútbol, a esos que conocí y con los que compartí en el LP, a todos ellos gracias por aparecer y acompañarme, especialmente a “*Los más hermosos*”, *Duván, Sergio, Camilo, Karina, Marcela, Carlos, Fabricio*.

También quiero extender mi agradecimiento a la familia Florez Pachecho, donde mi brindaron consejos, experiencias, conocimiento de vida, además del aporte masivo para que yo pueda hoy día cumplir uno de los tantos sueños que me planteé de niño.

Jhon Genes

Este objetivo en mi vida profesional no hubiera sido posible sin Dios en mi vida, porque siempre está en cada paso que doy y por haber puesto en mi camino personas que fueron mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre, por el gran amor y la devoción que tienes por tus hijos, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por haberme formado como un hombre de bien, y por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla.

A mi padre Rafael Alarcón Campo, por su apoyo incondicional mientras estuvo conmigo, este logro es para ti, no me alcanzan las palabras para demostrar mi gratitud y expresarte lo mucho que te quiero.

A mis hermanos Rafael y Mercedes que estuvieron pendientes y acompañándome a lo largo de este proceso brindándome constante ánimo y creer en mis capacidades y potencializarlas.

Muchas gracias a aquellos amigos con lo que compartí y viví momento agradables durante todo este tiempo.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco de Referencia	16
1.1. Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE-MUSLE).....	16
1.1.1 Factor C.....	17
1.1.2 Factor LS.....	17
1.2 Landsat	17
1.3 NDVI.....	18
2. Metodología	18
2.1 Fase I: Obtención de la imagen satelital	18
2.2 Fase II: Cálculo del factor topográfico de la cuenca del río Tona.	19
2.2.1 Factor L.....	19
2.2.2 Factor pendiente del terreno (Factor S).	22
2.2.3 Factor topográfico (LS).....	22
2.3 Fase III: Cálculo del factor C de la cuenca del río Tona.	22
3. Resultados y Discusión	25
4. Conclusiones	32
5. Recomendaciones	33
Referencias Bibliográficas	34

Apéndices.....	37
----------------	----

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Imagen satelital Landsat.	20
<i>Figura 2.</i> Mapa de pendientes.	21
<i>Figura 3.</i> Mapa de NDVI.....	26
<i>Figura 4.</i> Distribución espacial factor L.....	26
<i>Figura 5.</i> Distribución espacial factor S.....	27
<i>Figura 6.</i> Distribución espacial factor LS.....	27
<i>Figura 7.</i> Distribución espacial factor C.....	28
<i>Figura 8.</i> Zona embalse río Tona	29
<i>Figura 9.</i> Zona embalse río Tona	29

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Valores generados por el raster NDVI y su significado en la cuenca del río Tona.</i> (N, Escobar; Y, n.d.)	23
Tabla 2. <i>Correlación entre el NDVI y el factor K</i>	24
Tabla 3. <i>Factor C río Tona</i>	24
Tabla 4. <i>Resultados factor topográfico</i>	28
Tabla 5. <i>Áreas de la cuenca según el rango del factor C</i>	29
Tabla 6. <i>Media LS en ríos de diferentes partes de Sudamérica</i>	31

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Coordenadas cuenca del rio Tona.....	37
Apéndice B. Curvas de nivel.	43
<i>Apéndice C.</i> Modelo digital de elevación.	44
Apéndice D. Factor F	45
Apéndice E. Factor M	46
Apéndice F. Dirección del flujo.....	47
Apéndice G. Acumulación del flujo.	48
Apéndice H. Bandas Landsat 8.....	49

Resumen

TÍTULO: Deformaciones por efectos diferidos en puentes viga – cajón construidos por el método de voladizos sucesivos fundidos in situ *

AUTORES: Sergio Andrés Alarcón Sánchez
Jhon Edwar Rodríguez Genes**

PALABRAS CLAVE: factor de cobertura vegetal, factor topográfico, erosión, pendiente, LANDSAT-8, NDVI.

DESCRIPCIÓN:

El desgaste en la cavidad del suelo que es producido por la erosión hídrica trae efectos negativos en las propiedades físicas y químicas del mismo, esta problemática incluye la erosión acelerada del suelo, la sedimentación hacia los embalses, el amplio impacto de éste en el ecosistema y la forma de los ríos. Para abordar dicho problema se hizo necesario encontrar las longitudes con pendientes más pronunciadas y los lugares con mayor cobertura vegetal con el propósito de determinar la cantidad de sedimentos que pudo transportar la cuenca del Río Tona. Los objetivos para alcanzarlos fueron la obtención de imágenes multiespectrales tipo LANDSAT-8, el cálculo del factor topográfico y del factor de cobertura y vegetación. Los métodos utilizados fueron: el análisis de variación temporal del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y el método de clasificación supervisada, dándonos como resultado que los lugares más cercanos al cauce del río cuentan con la más alta pendiente y, además, se encontró que la zona más boscosa contempló el mayor porcentaje de área de la cuenca, lo que indicó que el impacto de agua lluvia no hace propensa a la zona de estudio para que haya una acción de escorrentía, es por ello que se disminuye el transporte de material y el riesgo de que ocurra un desprendimiento de suelo en pendientes con alta vegetación, lo cual evita la pérdida del suelo del río..

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto Alvaro Viviescas Jaimes PhD. Ingeniería de la Construcción Codirector Luis Francisco Rincón Prada Ingeniero Civil

Abstract

TITLE: Deformed by deferred effects on beam - drawer bridges constructed by the method of successive castings cast on site *

AUTHORS: Sergio Andrés Alarcón Sánchez
Jhon Edwar Rodríguez Genes **

KEYWORDS: vegetation cover factor, topographic factor, erosion, slope, LANDSAT-8, NDVI.

DESCRIPTION:

The wear in the soil cavity that is produced by water erosion has negative effects on its physical and chemical properties, this problem includes accelerated soil erosion, sedimentation towards reservoirs, its broad impact on ecosystems and The shape of the rivers. To address this problem, it was necessary to find the lengths with steeper slopes and the places with greater vegetation cover in order to determine the amount of sediments that the Tona River basin could transport. The objectives to achieve them were the obtaining of multispectral images type LANDSAT-8, the calculation of the topographic factor and the coverage factor and vegetation. The methods used are: the analysis of temporal variation of the index of normalized differential vegetation (NDVI) and the supervised classification technique, giving us as a result that the most away from the riverbed they have the highest slope and, in addition, they are the most forested area contemplated the highest percentage of the area of the basin, which indicated the impact of rainwater does not make the study area prone to have a runoff action, that is why there is the transport of material and the risk of a landslide occurring on slopes with high vegetation, which prevents the loss of the river floor.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto Alvaro Viviescas Jaimes PhD. Ingeniería de la Construcción Codirector Luis Francisco Rincón Prada Ingeniero Civil

Introducción

La erosión del suelo producida mediante la acción de una escorrentía tiene consecuencias negativas en el ciclo hidrológico, evidenciándose en el aumento de la contaminación y sedimentación hacia los ríos, provocando la disminución de las especies que la habitan, además, estos cambios generan el bajo rendimiento de la productividad de la tierra para la agricultura, degradación en la cubierta vegetal y detrimento de la biodiversidad, y la desestabilización en las laderas, exponiendo así la vida humana, daños en las viviendas e infraestructura(Raffino, 2019).

Las laderas denotan dificultades agrícolas y ambientales, esto es debido a que cuenta con pendientes muy pronunciadas e inclinadas, que es susceptible al desprendimiento de tierra, esto finalmente ocasiona que haya un incremento en la erosión y el transporte de los sedimentos hacia la cuenca(FAO, 2019)(Cruz, 2015).

La actividad de reemplazar el uso forestal por el uso agrícola desfavorece la circulación del agua que forma la hidrósfera, realizar este cambio afecta directamente la condición del agua que está ligada de primera mano con la cantidad, el flujo de nutrientes, y la sedimentación, este procedimiento altera el flujo estacional y no resguarda las zonas contra eventuales inundaciones(La, Capitalista, El, & Xx, 2008).

Un estudio realizado por el IDEAM arrojó que el 40% del territorio colombiano representa al menos algún grado de erosión, problema que reduce la fertilidad del suelo, minerales y materia orgánica. En los santanderes hay factores que favorecen la erosión como lo son las altas pendientes, que es producida por el cambio en el régimen de humedad(“40% del territorio colombiano presenta algún grado de degradación de suelos por erosión | Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible,” n.d.). Debido a esto es necesario estimar qué tipos de sedimentos son los que transporta la Cuenca del Río Tona a través de la pérdida generada por la erosión hídrica de su suelo, hacia el embalse de Bucaramanga. Para calcular la pérdida de suelo es necesario implementar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual estima la pérdida de suelo a escala anual, esto se logra efectuando la multiplicación de diferentes factores que intervienen en los procesos erosivos, en este proyecto se calculará el factor topográfico LS, debido a que el mayor aporte se da por el desprendimiento de sedimentos que son producidos desde los picos más altos de la cuenca, y el factor de ordenamiento de cultivos C, que es quien nos indica que entre menor es su concentración, mayor será la cantidad de suelo expuesto a la erosión(Geler, Penteado, & Perez, 2017).

El presente estudio se realizó sobre la cuenca de río Tona, esto debido a que la construcción del embalse de Tona tendrá en un futuro próximo una conexión con dos plantas de tratamiento. Una primera que está situada en la zona de Bosconia y la segunda en la de Planta Angelinos, con esto se busca garantizar el suministro de agua por los próximos 50 años al área metropolitana de Bucaramanga, pues el sistema permite regular las reservas de agua y ya no se dependerá solo del nivel de los ríos Tona y Suratá. Para conocer el rendimiento de sedimentos que aporta la cuenca al embalse es importante determinar los factores K, P, R, LS y C para de esta manera identificar las zonas con mayor potencial de erosión en estudio, los resultados obtenidos pueden servir como soporte a los manejadores del recurso para la toma de decisiones sobre prácticas de manejo de uso de suelo en la cuenca y posibles consecuencias que se puedan evidenciar con el análisis de las fotografías del Software ArcGis 10.5 tras la obtención de imágenes satelitales del Landsat 8 y con ello determinar los factores de longitud, pendiente del terreno, cobertura y manejo de la vegetación en la Cuenca del Río Tona.

1. Marco de Referencia

1.1. Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE-MUSLE).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) de Wischmeier y Smith (1978), constituye un método de uso generalizado para la estimación de la erosión hídrica. El modelo USLE, a partir de información referida de seis variables de control, estima el valor en toneladas por hectárea y año de la cantidad de suelo removida por la erosión hídrica (CORTOLIMA & CORPOICA, 1996).

La expresión matemática de este modelo tiene la siguiente forma (Ecuación 1)

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- A = Pérdida de suelo promedio anual en (t/ha/año).
- R=Factor de erosividad de las lluvias en (MJ/ha*mm/h).
- K=Factor de erosionabilidad del suelo en (t/ha MJ*ha/mm*h).
- LS = Factor topográfico (función de longitud – inclinación – forma de la pendiente), adimensional.
- C= Factor cobertura y manejo de la vegetación (cubierta vegetal), adimensional.
- P=Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional.

1.1.1 Factor C. El factor C indica la efectividad de la cubierta vegetal como protectora del suelo frente al impacto de las fuertes precipitaciones y a la fuerza del flujo superficial. Los valores de C son inversamente proporcional a la cubierta vegetal de la zona, es decir, pequeños cuando hay muchas plantas y grandes cuando los árboles son pocos (Gisbert, Ibañez, & Moreno, 2008).

1.1.2 Factor LS. El factor topográfico es importante en los procesos de erosión y transporte de agua y materiales. La erosión incrementa si aumenta la longitud del terreno (L) en la dirección de la pendiente y el ángulo de la superficie (S) se hace mayor (Geler et al., 2017).

El factor L indica la longitud de la pendiente y se asocia al factor S, estos factores tienen gran relevancia en la pérdida de suelo debido ya que entre más se extiende la pendiente aumenta la velocidad de escurrimiento lo que facilita la pérdida del suelo (Geler et al., 2017).

1.2 Landsat

Se trata de una serie de satélites que orbitan alrededor de la tierra proporcionando la adquisición repetida de datos multiespectrales de moderada resolución de la superficie de la tierra a nivel global. Las imágenes LANDSAT representan un recurso significativo en el estudio y desarrollo de diferentes áreas de investigación como geología, agricultura, recursos hídricos y conservación de biodiversidad (Antonia & Candelario, 2017).

1.3 NDVI

Este índice permite generar imágenes que representan la biomasa relativa de las plantas. El NDVI es utilizado para vigilar las sequias y la producción agrícola y para predecir si existen zonas con peligro de incendio(García-cervigón & José, 2015).

Los valores generados por este índice están entre -1,0 y 1.0 que representan la energía reflejada por las hojas de las plantas y donde la respuesta que tiene la vegetación boscosa está dado por los valores positivos mientras el rango negativo responde básicamente a espejos de agua y nubes(ArcMac, n.d.).

2. Metodología

En este capítulo se explica de forma detallada las fases del procedimiento utilizado durante el desarrollo del proyecto, cada paso fue necesario para lograr determinar los mapas del factor topográfico el cual está compuesto por los factores de longitud y pendiente del terreno, y el factor de cobertura de la vegetación de la cuenca del río Tona.

2.1 Fase I: Obtención de la imagen satelital

La imagen fue seleccionada del satélite LANDSAT 8 debido a sus características de precisión radiométrica y espacial, estas imágenes son las más usadas para el análisis de vegetación(Guzmán,

López-García, & De Lourdes Manzo Delgado, 2008). Las fotografías de este satélite se pueden descargar del servidor Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) que pertenece al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La imagen fue tomada el 23 de diciembre del 2018 debido a que la fecha coincide con un día de época seca y mínima nubosidad, lo cual permite mejor interpretación. La imagen tiene una resolución de 15 metros en pancromático, 30m en multiespectral y un tamaño de píxel de 30m x 30m, cómo se aprecia en la Figura 1. Para establecer donde se encontraba la cuenca del río Tona se hizo un polígono con coordenadas suministradas por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (Anexo 1) en el Software ArcGis 10.5 en el cual se usa la ventana de Add Data y luego la herramienta de Georreferenciar, haciendo uso de las coordenadas que fueron determinadas a partir del cambio de unidades al sistema UTM (Universal Transverse Mercator).

2.2 Fase II: Cálculo del factor topográfico de la cuenca del río Tona.

Es la distancia horizontal desde el punto más alto, donde se origina el flujo superficial al punto más bajo donde comienza la deposición que fluye por escorrentía a un canal mediante la ecuación usada por USLE, implementando el modelo de dirección de flujo y acumulación de flujo con la extensión de arcHydro para ArcGis.

2.2.1 Factor L. Se creó un modelo digital de elevación (DEM), este modelo se hizo a partir de la curvas de nivel que se obtuvieron de la imagen satelital por medio de la herramienta “curvas de nivel” que se encuentra en la ventana ArcToolBox de ArcGIS (Anexo 2). El mapa de las curvas

de nivel está en escala 1:100000, la mayor altitud de las curvas está por encima 3000 m.s.n.m y la más baja por debajo de los 1000 m.s.n.m

A dicho modelo (DEM) fue necesario aplicar un relleno mediante la herramienta “FILL” del software ArcGis, con la imagen resultante (Anexo 3), se creó un raster de pendientes (Figura 2) que fue utilizado para calcular los factores presentes en las Ecuaciones 2 y 3:

$$\beta = \frac{\sin\theta/0.0896}{3.0(\sin)^{0.8}+0.56} \text{ Ecuación 2}$$

θ = Es el ángulo de la pendiente

$$m = \frac{\beta}{\beta+1} \text{ Ecuación 3}$$

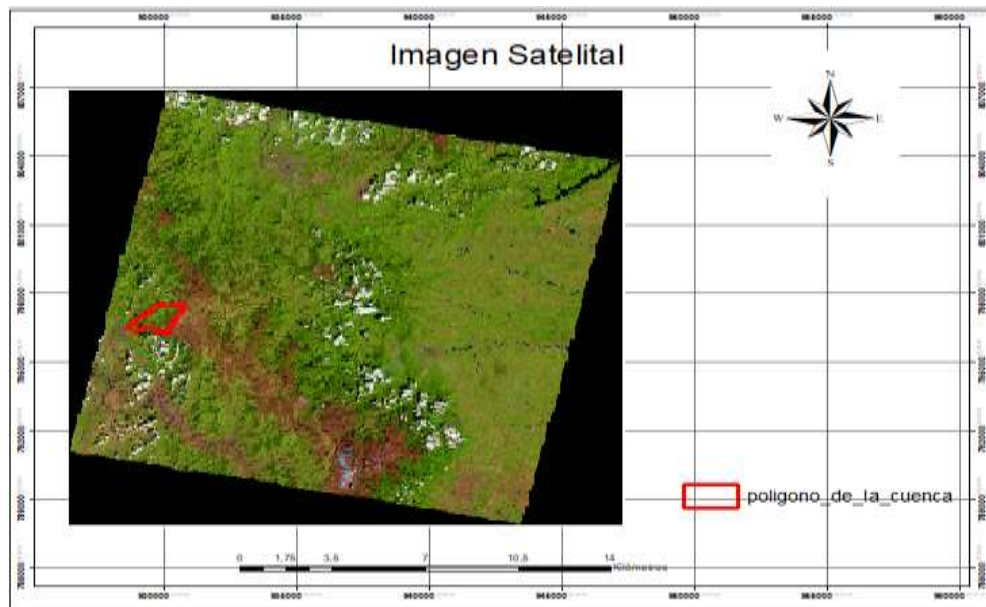


Figura 1. Imagen satelital Landsat.

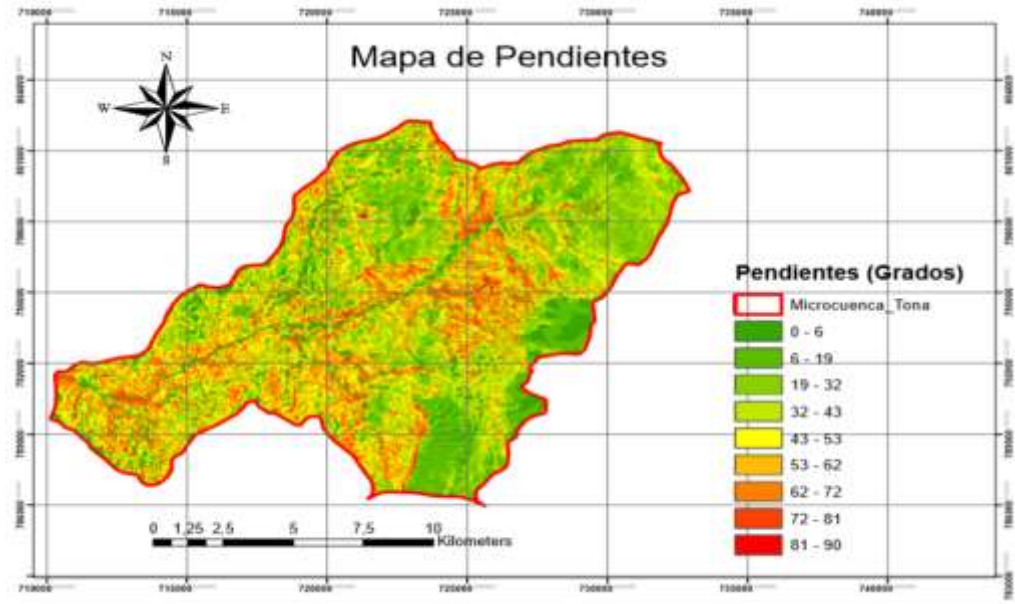


Figura 2. Mapa de pendientes.

Estos factores se calcularon debido a que son necesarios para poder determinar posteriormente el factor L como se observa en la ecuación (4). Estos 2 factores se obtuvieron en ArcGis mediante la herramienta Raster Calculator obteniendo los rasters mostrados en los Anexos 4 y 5. Para obtener el cálculo del factor L con el área de drenaje aportada se procedió a realizar los rasters de dirección del flujo (Anexo 6) y acumulación del flujo (Anexo 7) con las herramientas Flow Direction y Flow Accumulation respectivamente. Dichas herramientas se encuentran en la ventana ArcToolBox y la extensión Hydrology de ArcGIS. Ya analizado el flujo se halló el factor L utilizando “Raster Calculator” empleando la ecuación 4 y fórmula de Desmet & Govers (1996).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{i,j}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \text{ Ecuación 4}$$

Donde:

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

D= es el tamaño del pixel.

X= es el factor de corrección de forma. (X es igual a 1 en sistemas pixelados).

2.2.2 Factor pendiente del terreno (Factor S). Para el cálculo del factor S se empleó la ecuación 5 planteada por McCOOLS(CORTOLIMA & CORPOICA, 1996). Este factor se obtuvo en ArcGis mediante la herramienta Raster Calculator.

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin\beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan\beta_{i,j} < 0.09 \\ 16.8 \sin\beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan\beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Ecuación 5

$S_{(i,j)}$ = Pendiente del factor de coordenadas $_{(i,j)}$

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

2.2.3 Factor topográfico (LS). Como ya se había calculado el factor longitud del terrero y el factor pendiente del terreno para el cálculo del factor LS se utilizó la herramienta “raster calculator” que se encuentra en la ventana ArcToolBox que hace parte del Software ArcGis 10.5 aplicando la Ecuación 6:

$$LS = Factor L * Factor S \quad \text{Ecuación 6}$$

2.3 Fase III: Cálculo del factor C de la cuenca del río Tona.

Se generó el mapa de uso de suelo, el cual se realizó a partir de fotografías satelitales tipo RASTER que tienen varias aplicaciones entre las que se encuentra generar mapas temáticos que consiste básicamente en agrupar valores de datos multiespectrales en clases y asigna un valor categórico. Para el análisis de la imagen se utilizó el software ARGIS para poder establecer así el tipo de cobertura de la cuenca. 3.3.1 Cálculo del índice de vegetación de diferencial normalizado

(NDVI). Para determinar el uso del suelo del área de interés por medio de imágenes satelitales se hizo el cálculo del NDVI con la ecuación 7(N, Escobar; Y, n.d.):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS})/(\text{NIR} + \text{VIS}) \text{ Ecuación 7}$$

En dicha ecuación se tiene en cuenta el tipo de imagen, en este caso Landsat 8, que está compuesta por 11 bandas (Anexo 8) de las cuales fueron utilizadas la banda 4, caracterizada por ser rojo visible (VIS) y la banda 5, que se caracteriza por ser infrarojo cercano (NIR). Este índice generó valores entre 0,650325 y 0,184562 que básicamente representan el color verde vivo en las plantas, se hace una reclasificación, dándole tonalidades que ayuden a identificar de forma fácil el tipo de suelo. Los valores negativos corresponden principalmente a las nubes y el agua. Los resultados del tipo de suelo se muestran en la Figura 3 y los valores en la tabla 1. La clasificación de la Tabla 1 fue obtenida por medio de un estudio realizado a principios del año 2019 en la cuenca del río Tona por investigadores de la Universidad Industrial de Santander(N, Escobar; Y, n.d.).

Tabla 1.

Valores generados por el raster NDVI y su significado en la cuenca del río Tona.(N, Escobar; Y, n.d.)

Valores del NDVI	Representa
<0	Zona sin vegetación
0-0,2	Zona de suelo mixto
0,2-0,35	Zona bosque poco densa
0,35-1	Zona boscosa

La zona sin vegetación son los espejos de agua, lajas y rastrojo, la zona de suelo mixto son parcelas con cultivos de poca altura, zona de bosques poco densos son las parcelas con cultivos de mayor altura y más densos y zona boscosa son bosques nativos (N, Escobar; Y, n.d.).

Teniendo los resultados obtenidos al calcular el NDVI y la correlación existente entre este y el factor C como se puede ver en Tabla 2 que se obtuvo de (Pacheco, Henry; Marcano, Arismar; Cartaya, 2014), se pudo calcular el factor de ordenamiento de cultivos.

Tabla 2.

Correlación entre el NDVI y el factor K

NDVI	Factor C
0	1
0,1	0,9
0,2	0,7
0,3	0,4
0,4	0,2
0,5	0,1
0,6	0,001
0,7	0,0001
0,8	0,00001
0,9	0,000001
1	0

Se procedió a realizar un método de interpolación de tipo regresión, el cual consiste en un análisis previo a partir del cual se genera un modelo de tipo polinomio, generalmente se utilizan X e Y (NDVI y Factor C) como variables de apoyo, para poder hallar los valores del factor C de la cuenca del río Tona, que se observan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Factor C río Tona

NDVI	Factor C
------	----------

0	1
0,2	0,7
0,35	0,3
1	0

3. Resultados y Discusión

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los subfactores del factor topográfico de la cuenca del río Tona. En las Figuras 4, 5 y 6 se muestra la distribución espacial del factor de longitud, pendiente y topográfico respectivamente

En la Tabla 5 se muestran las áreas de la cuenca del río Tona según los rangos del Factor C y en la Figura 7 la distribución espacial de este.

Todas las imágenes obtenidas están en una escala 1:125000.

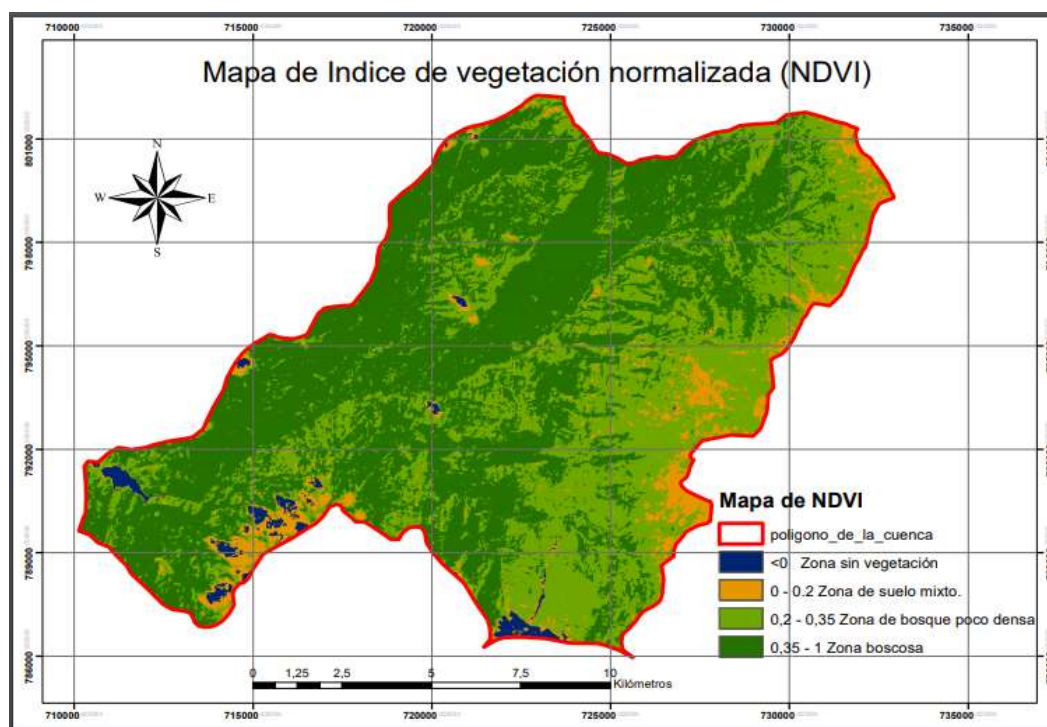


Figura 3. Mapa de NDVI.

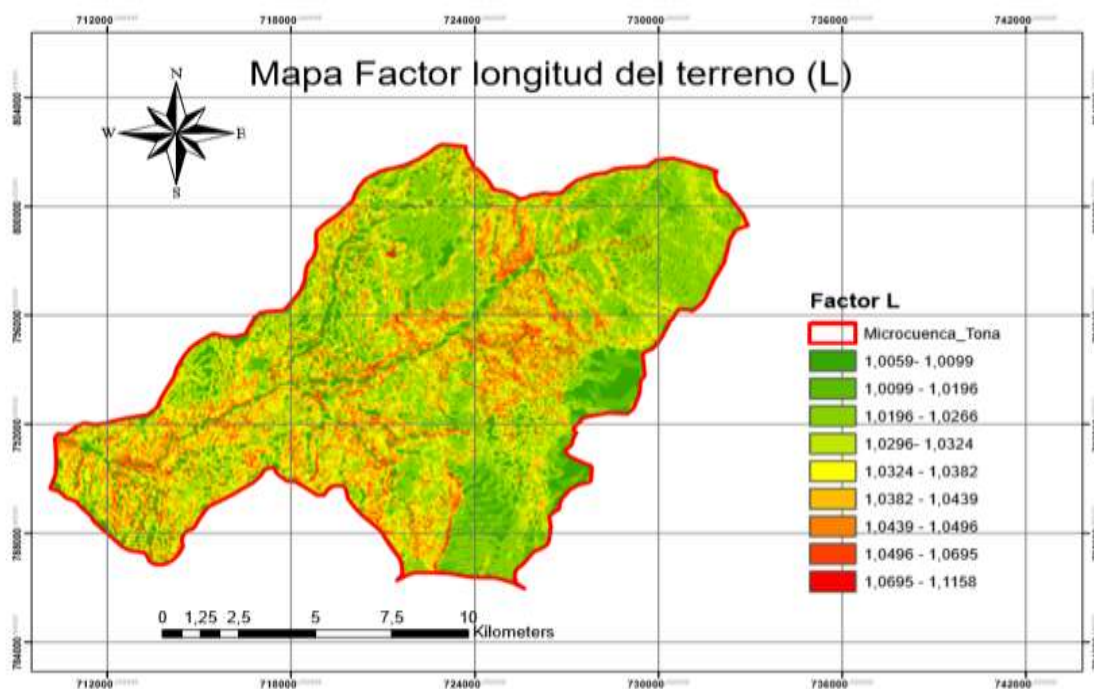


Figura 4. Distribución espacial factor L

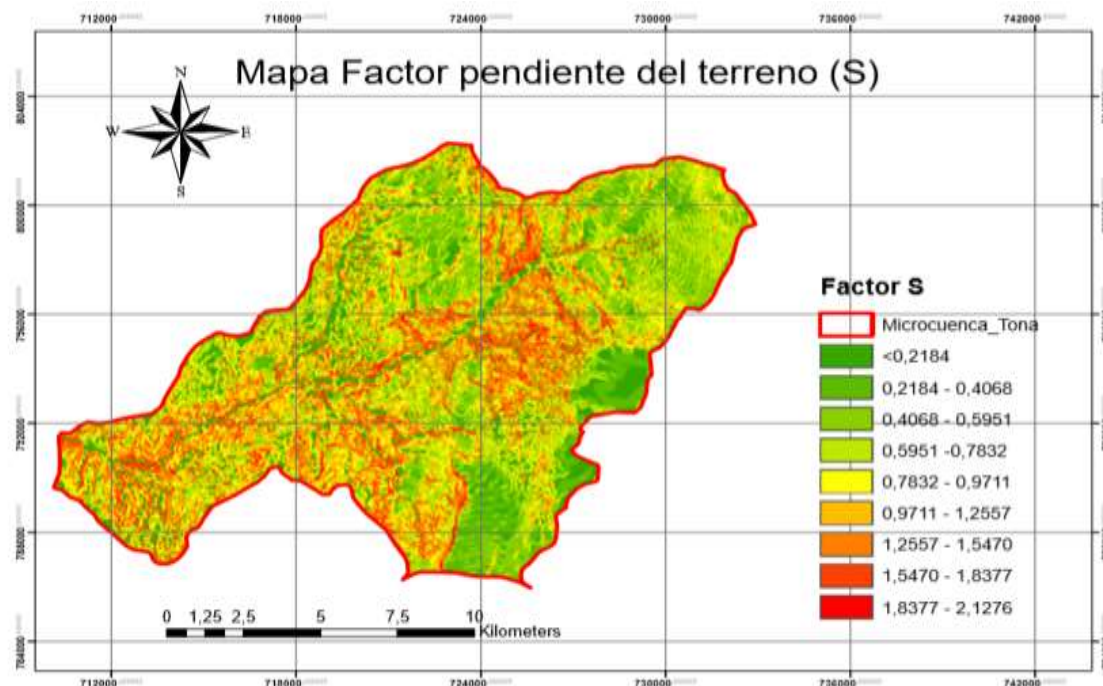


Figura 5. Distribución espacial factor S

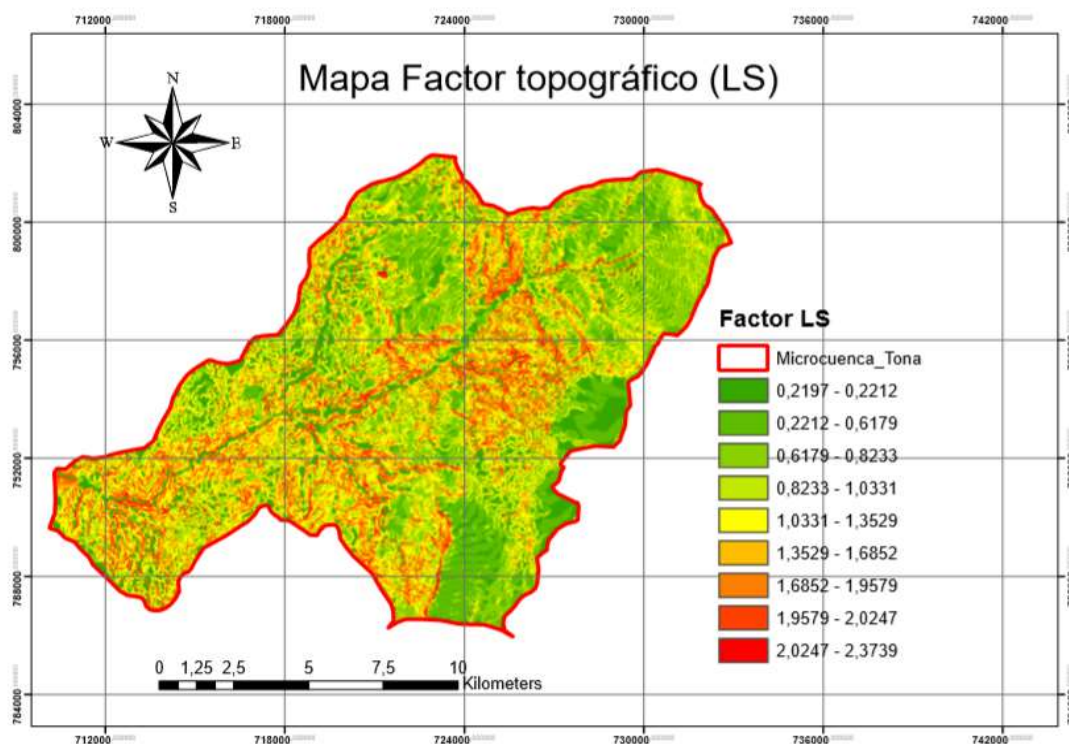


Figura 6. Distribución espacial factor LS

Tabla 4.

Resultados factor topográfico.

Pendiente (%)	β	m	Área (m ²)	%Área	L	S	LS
0	6	1.1047	0,5249	25961300	13	1,0099	0,2212
6	19	2,0367	0,6707	18593100	10	1,0196	0,4068
19	32	2,4994	0,7142	32722900	17	1,0266	0,5951
32	43	2,7526	0,7335	35013800	18	1,0324	0,78332
43	53	2,9119	0,7444	29455000	15	1,0382	0,9711
53	62	3,0130	0,7508	23884000	12	1,0439	1,2557
62	72	3,0837	0,7551	17460600	9	1,0496	1,547
72	81	3,1217	0,7574	8404520	4	1,0675	1,8377
81	90	3,1350	0,7582	3287805	2	1,1158	2,1276
				194783025	100		

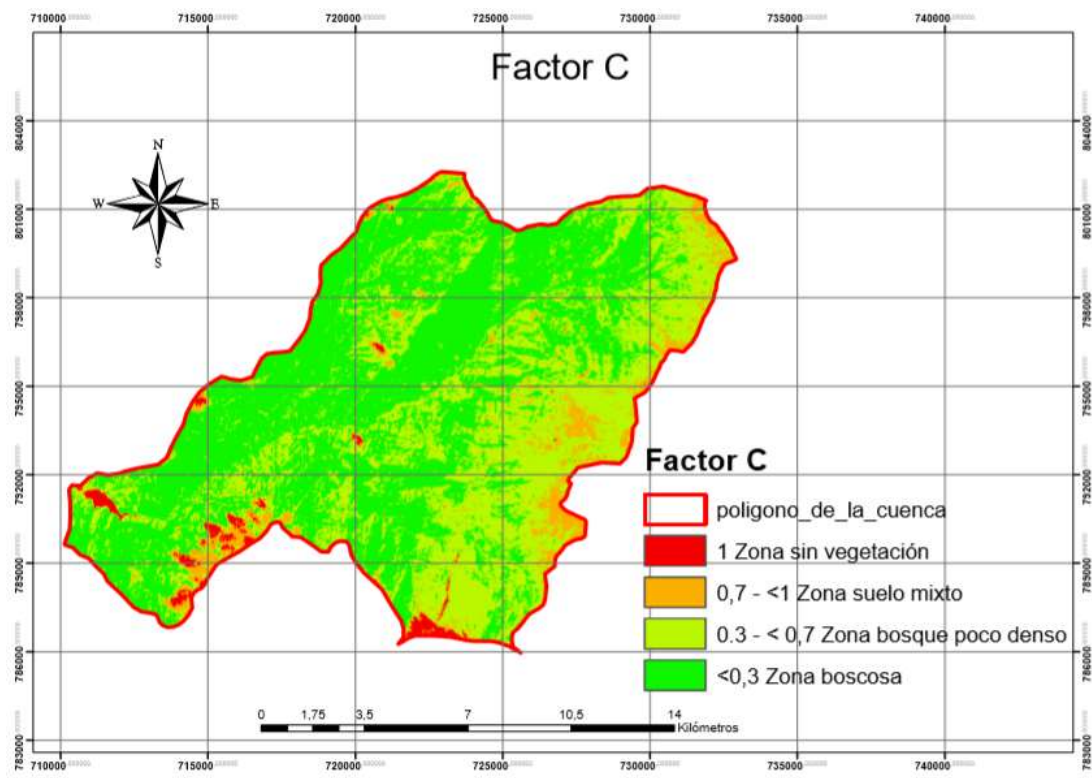


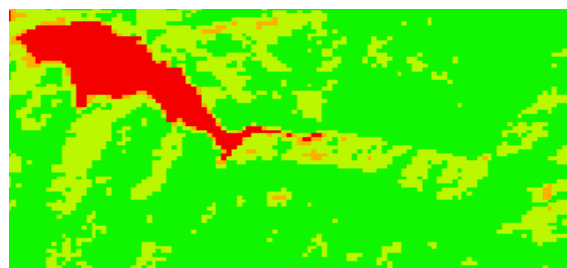
Figura 7. Distribución espacial factor C

Tabla 5.

Áreas de la cuenca según el rango del factor C

Factor C	Representa	Área (m2)	Área %
1	Zona sin vegetación	2726125	1,4
0,7 - < 1	Zona suelo mixto	11268800	5,8
0.3 - < 0,7	Zona bosque poco denso	74065400	38
<0,3	Zona boscosa	106722700	54,8
		194783025	100

En la figura 7 y 8 muestran una zona sin vegetación (espejo de agua), zonas de bosque poco denso y zona boscosa.

*Figura 8. Zona embalse río Tona Fuente Google Earth**Figura 9. Zona embalse río Tona Fuente mapa del Factor C*

Haciendo la comparación con la clasificación, el mapa del Factor C (Figura 7) evidencia las categorías de uso de suelo utilizadas en la zona, además de la similitud entre las imágenes lo que refleja que la zona fue bien clasificada por el software.

El NDVI, Figura 3, presenta valores que oscilan entre 0,650325 y -0,184562, dichos valores se obtuvieron con el raster de la ecuación 7 que fue reclasificado para representar las zonas presentes en la cuenca del río Tona (Tabla1). Los valores negativos representan los cuerpos de agua como el embalse y algunas nubes que estaban en el momento en el que fue tomada la imagen mientras que los valores mayores a 0,35 se dan en la zona con mayor cobertura vegetal o bien sea la zona boscosa y de bosque natural(ArcMac, n.d.).

La zona de bosque poco denso genera una afectación intermedia según el rango de valores establecidos en la Tabla 5, debido a su tipo de vegetación que permite la penetración de la gota de agua con cierto nivel de intensidad lo que provoca problemas de erosión del suelo.

El 54,8% de la cuenca del río Tona es zona boscosa o bosque natural como se muestra en la Tabla 5, por lo que una distribución mayoritaria de los valores que toma el factor C en la cuenca del río son bajos lo que indica una gran protección ante procesos erosivos y por lo tanto menor incidencia en la pérdida de suelo.

En lo referente al factor topográfico longitud-pendiente (FACTOR LS), el resultado se muestra en la figura 6. Se puede detallar un LS alto en zonas caracterizadas por tener gran inclinación y LS bajo en zonas de planicie(Montes-León, Uribe-Alcántara, & García-Celis, 2011). En este caso, los valores obtenidos son 0,2212 y 2,3739 para las partes bajas y altas, respectivamente.

Las zonas de alta pendiente coincide en la zona este de la cuenca con zonas de suelo mixto y de bosque poco denso lo cual indica que esta zona de la cuenca es la que muestra mayor degradación debido a la inclinación de la pendiente y a la poca cobertura vegetal que tiene.

El 50% de la extensión de la cuenca presenta valores promedios de factor topográfico (LS) de 1,0698 cuyas pendientes corresponden a suelos entre 19% y 53% (terreno ondulado y muy ondulado(CORTOLIMA & CORPOICA, 1996)), mientras que el 6% de la extensión de la cuenca presenta suelos con pendientes más pronunciadas entre 72% y 90% (terreno muy escarpado(CORTOLIMA & CORPOICA, 1996)), que favorece a la erosión hídrica de la zona de estudio.

Tabla 6.

Media LS en ríos de diferentes partes de Sudamérica.

País	Río	Media LS	Fuente
Perú	Siguas	8,5	(Portuguez M., 2015)
Colombia	Hato	5,4	(Gonzalez & Ortiz, 2014)
Colombia	Totare	6,98	(CORTOLIMA & CORPOICA, 1996)
Venezuela	Carache	5,5	(Barrios R., 2005)
Colombia	Tona	1,35	Autores

Se escogieron los ríos presentes en la Tabla 6 debido a que sus topografías son similares y se está analizando el factor topográfico, además los causes de los tres ríos en territorio colombiano están interrumpidos por presas, los ríos seleccionados desembocan en otro río de mayor envergadura y todos se encuentran cerca de la línea del Ecuador por lo que sus climas son similares.

Comparando el factor topográfico hallado en los ríos mostrados en la Tabla 6 se puede decir que el LS del río tona es bajo disminuyendo de esta manera el riesgo de pérdida de suelos de la cuenca.

4. Conclusiones

Del mapa del factor de cobertura y manejo de la vegetación del suelo que se generó, se puede deducir que la cuenca del Río Tona está compuesta en su mayoría por zona boscosa o de bosques nativos al tener un área de $106.722.700m^2$ de un área total de la cuenca de $194.783.025 m^2$, siendo esta zona el 54,8% de la totalidad de la cuenca, y debido a que el factor C tiene gran envergadura en los resultados, el suelo de la cuenca es menos propenso al impacto de agua lluvia y a la acción de escorrentía superficial, lo que disminuye el riesgo de la pérdida suelo del río.

Del mapa del factor topográfico que se generó, se puede inferir que la zona con mayor pendiente se encuentra muy cerca del cauce del río, que a su vez es la zona más boscosa, lo cual significa que sus características para el transporte de material hacia el cauce son muy bajas, debido a que estos se originan por la erosión de pendientes altas sin vegetación.

Se puede inferir la baja influencia del factor C en la pérdida del suelo del río debido a la gran cobertura de bosque nativo de la cuenca y bajo valor del factor topográfico comparándolo con estudios hechos en diferentes países, pero esto no quiere decir que no lleguen a la cuenca gran cantidad de sedimentos, puesto que para su determinación es necesario tener en cuenta otros valores importantes como lo son la erosionabilidad del suelo y las prácticas de conservación de cultivos.

5. Recomendaciones

En la Figura 7 y la Figura 6 se puede observar que en gran parte la zona de los suelos mixtos y la zona de suelo poco denso que equivale a 43,8% del área total de la cuenca se encuentran en gran medida en terrenos de baja pendiente, lo cual indica la necesidad de implementar medidas de protección y el uso de prácticas apropiadas de cultivo para evitar que se sigan expandiendo estas zonas afectando la vegetación nativa y de esta manera reducir el riesgo de pérdida de suelos en la cuenca.

Para determinar con mayor exactitud el factor de cobertura y manejo de la vegetación, es aconsejable aumentar los rangos del índice de vegetación normalizada, dado que los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético, con ello se obtendrá una mayor confiabilidad en los resultados.

Aunque existan diferentes métodos, páginas web y programas para la descarga de imágenes satelitales, es recomendable usar la opción de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos, debido a que la interfaz de usuario de esta, es una herramienta de búsqueda donde se puede identificar áreas como fechas, porcentaje de nubes, sensores, entre otros.

Referencias Bibliográficas

- 40% del territorio colombiano presenta algún grado de degradación de suelos por erosión | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). Retrieved November 11, 2019, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2592-40-del-territorio-colombiano-presenta-algun-grado-de-degradacion-de-suelos-por-erosion>
- Antonia, A., & Candelario, O. (2017). “*Clasificación de la vegetación del karst de Sierra de las Nieves utilizando imágenes Landsat.*”
- ArcMac. (n.d.). Función NDVI—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Retrieved November 11, 2019, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>
- Barrios R., A. (2005). *Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI. Aplicación en una microcuenca andina.* 44(1), 57–64.
- CORTOLIMA, & CORPOICA. (1996). Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE – MUSLE) - Plan de Ordenación y manejo de la Cuenca Hidrográfica mayor del Río Totare. *Perdida De Suelos*, 1–10. Retrieved from https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf
- Cruz, D. (n.d.). Manual de manejo y uso del suelo en zona de ladera. Retrieved November 11, 2019, from https://issuu.com/diegofernandocruztrullo/docs/manual_de__manejo__y__uso_del__suel
- FAO. (n.d.). Tierras de Laderas | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved November 11, 2019, from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/tierras-de-laderas/es/>

- García-cervigón, D., & José, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS / RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. 78.
- Geler, T., Penteado, A., & Perez, A. (2017). LS-Factor analysis in different prediction models of water soil erosion. *Observatorio Geográfico America Latina*, 5, 226–233. Retrieved from <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Sig/18.pdf>
- Gisbert, J., Ibañez, S., & Moreno, H. (2008). *El Factor C de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*. 9.
- Gonzalez, L. M., & Ortiz, J. P. (2014). Determinacion Del Aporte De Sedimentos Al Embalse De “El Hato” En El Municipio De Carmen De Carupa - Cundinamarca, a Través De La Ecuación Universal De Pérdida De Suelo. *Repository.Usta.Edu.Co*, 1–95. Retrieved from <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/9502>
- Guzmán, Á. V., López-García, J., & De Lourdes Manzo Delgado, L. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes landsat etm+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el corredor biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones Geograficas*, 67, 59–75.
- La, C. D. E., Capitalista, E., El, E. N., & Xx, S. (2008). Bosques Y Agricultura: Una Mirada a Los Límites Históricos De Sustentabilidad De Los Bosques Argentinos En Un Contexto De La Explotación Capitalista En El Siglo Xx. *Luna Azul*, (26), 87–106. <https://doi.org/10.17151/luaz.2008.26.6>
- Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 2(1), 5–17.
- N, Escobar; Y, M. (n.d.). *LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO TONA*.
- Pacheco, Henry; Marcano, Arismar; Cartaya, S. (2014). *Memorias*.

Portuguez M., D. M. (2015). Estimación De La Pérdida De Suelos Por Erosión Hídrica En La Cuenca Del Río Sigüas Utilizando Geoinformática. *Anales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>

Raffino, M. E. (n.d.). Erosión del Suelo: Concepto, Tipos, Causas y Consecuencias. Retrieved November 11, 2019, from <https://concepto.de/erosion-del-suelo/>

Apéndices

Apéndice A. Coordenadas cuenca del rio Tona

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
1	1108563	1281298	34	1112871	1286548
2	1108312	1281385	35	1113025	1286694
3	1108282	1281413	36	1113216	1286837
4	1108419	1281805	37	1113422	1286960
5	1108463	1281896	38	1113617	1287079
6	1108483	1282293	39	1113732	1287063
7	1108479	1282781	40	1113879	1287004
8	1108439	1283269	41	1114077	1286972
9	1108541	1283417	42	1114292	1286956
10	1108617	1283411	43	1114470	1287004
11	1108796	1283396	44	1114676	1287079
12	1108850	1283416	45	1114784	1287306
13	1109112	1283654	46	1114986	1287691
14	1109283	1283754	47	1115165	1287845
15	1109394	1283813	48	1115458	1287897
16	1109589	1283789	49	1115744	1287917
17	1109743	1283750	50	1115895	1287929
18	1109918	1283777	51	1115974	1287980
19	1110140	1283809	52	1116058	1288087
20	1110351	1283881	53	1116284	1288377

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
21	1110779	1283988	54	1116462	1288643
22	1111200	1284055	55	1116510	1288754
23	1111470	1284107	56	1116589	1288969
24	1111613	1284222	57	1116621	1289064
25	1111759	1284345	58	1116645	1289330
26	1111795	1284424	59	1116697	1289600
27	1111898	1284674	60	1116796	1289742
28	1112049	1284992	61	1116891	1289869
29	1112160	1285182	62	1116935	1290008
30	1112327	1285472	63	1117002	1290246
31	1112430	1285825	64	1116986	1290397
32	1112529	1286020	65	1116986	1290683
33	1112652	1286250	66	1117006	1290850
67	1117113	1290953	100	1123130	1292295
68	1117351	1291191	101	1123400	1292168
69	1117641	1291405	102	1123626	1292018
70	1117788	1291544	103	1123817	1292037
71	1117990	1291763	104	1124011	1292141
72	1118193	1291973	105	1124460	1292220
73	1118280	1292243	106	1124722	1292188
74	1118387	1292457	107	1125014	1292242
75	1118594	1292739	108	1125210	1292459
76	1118721	1292826	109	1125522	1292698
77	1119082	1293033	110	1125803	1292803
78	1119304	1293108	111	1126078	1292914
79	1119487	1293140	112	1126491	1292978
80	1119804	1293231	113	1126766	1293116
81	1119955	1293283	114	1127221	1293163
82	1120288	1293453	115	1127565	1293174
83	1120471	1293568	116	1127803	1293200

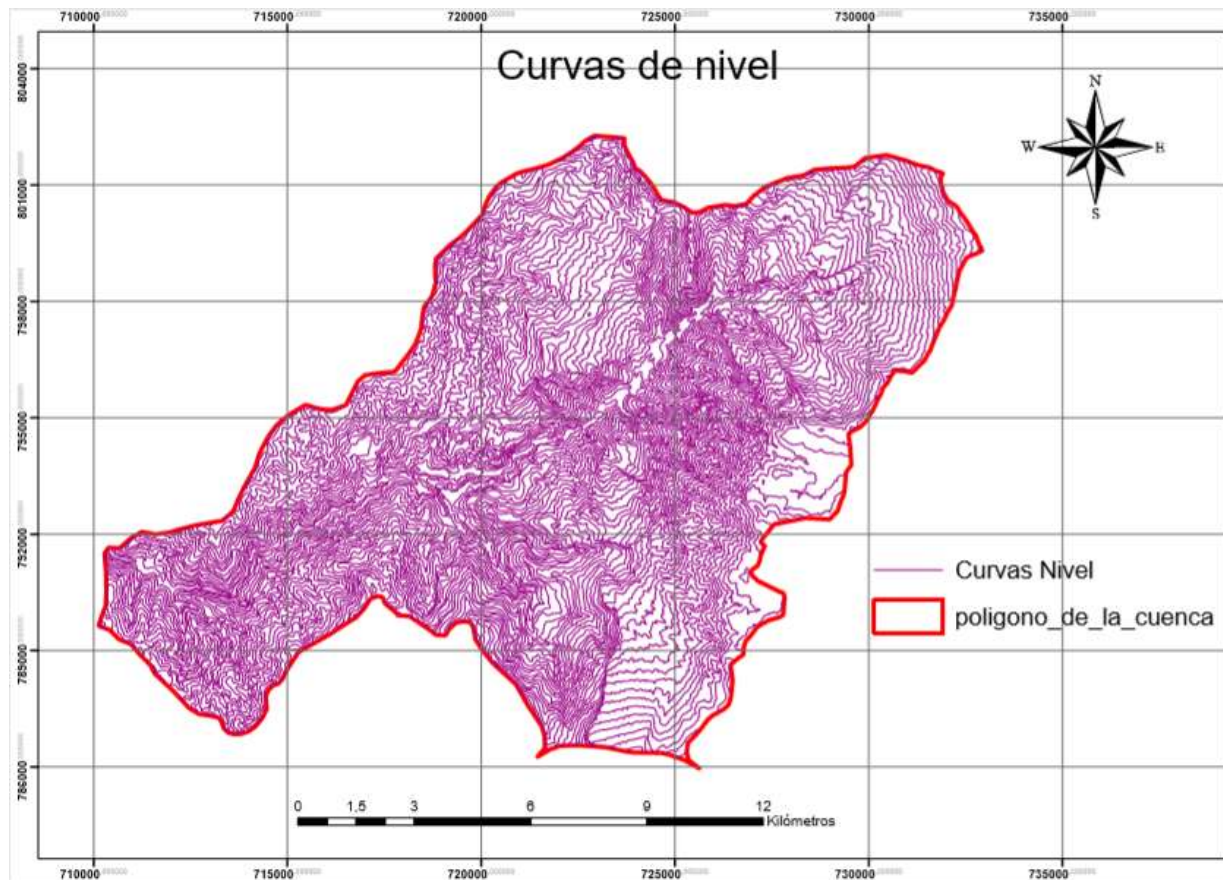
Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
84	1120701	1293727	117	1128089	1293428
85	1120872	1293886	118	1128634	1293497
86	1121007	1293965	119	1129147	1293348
87	1121109	1294009	120	1129427	1293243
88	1121489	1293981	121	1129756	1293163
89	1121872	1293941	122	1129898	1293089
90	1121872	1293763	123	1130010	1293057
91	1121971	1293544	124	1130089	1293012
92	1122097	1293326	125	1130040	1292971
93	1122150	1293161	126	1130038	1292946
94	1122265	1293097	127	1130025	1292811
95	1122400	1292958	128	1130086	1292541
96	1122551	1292772	129	1130212	1292317
97	1122666	1292601	130	1130420	1292178
98	1122733	1292462	131	1130481	1292096
99	1122825	1292347	132	1130533	1292004
133	1130584	1291942	166	1128714	1287774
134	1130645	1291859	167	1128668	1287673
135	1130709	1291757	168	1128617	1287592
136	1130859	1291522	169	1128530	1287500
137	1130930	1291420	170	1128482	1287361
138	1131015	1291177	171	1128365	1287133
139	1131066	1291108	172	1128313	1287003
140	1131093	1291020	173	1128231	1286851
141	1130916	1290946	174	1128174	1286790
142	1130776	1290893	175	1128153	1286720
143	1130679	1290835	176	1128105	1286659
144	1130508	1290515	177	1128040	1286584
145	1130425	1290191	178	1127948	1286491
146	1130408	1290044	179	1127856	1286445

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
147	1130377	1289946	180	1127764	1286399
148	1130350	1289847	181	1127635	1286315
149	1130333	1289724	182	1127637	1286295
150	1130287	1289585	183	1127680	1285925
151	1130217	1289490	184	1127711	1285508
152	1130148	1289331	185	1127574	1285321
153	1130098	1289234	186	1127538	1284876
154	1129989	1289057	187	1127496	1284706
155	1129792	1288583	188	1127446	1284601
156	1129759	1288484	189	1127401	1284462
157	1129709	1288398	190	1127355	1284324
158	1129647	1288293	191	1127142	1284110
159	1129601	1288201	192	1126516	1284147
160	1129565	1288166	193	1125707	1283979
161	1129509	1288109	194	1125501	1283721
162	1129445	1288045	195	1125427	1283636
163	1129282	1287887	196	1125371	1283541
164	1129095	1287923	197	1125410	1283465
165	1128838	1287952	198	1125477	1283430
200	1125365	1283188	233	1124092	1279049
201	1125333	1283028	234	1124008	1278969
202	1125287	1282936	235	1123903	1278838
203	1125242	1282885	236	1123835	1278735
204	1125145	1282816	237	1123672	1278545
205	1125103	1282751	238	1123604	1278489
206	1125150	1282659	239	1123477	1278356
207	1125288	1282521	240	1123452	1278161
208	1125381	1282475	241	1123453	1278080
209	1125473	1282429	242	1123469	1278022
210	1125853	1282247	243	1123474	1277992

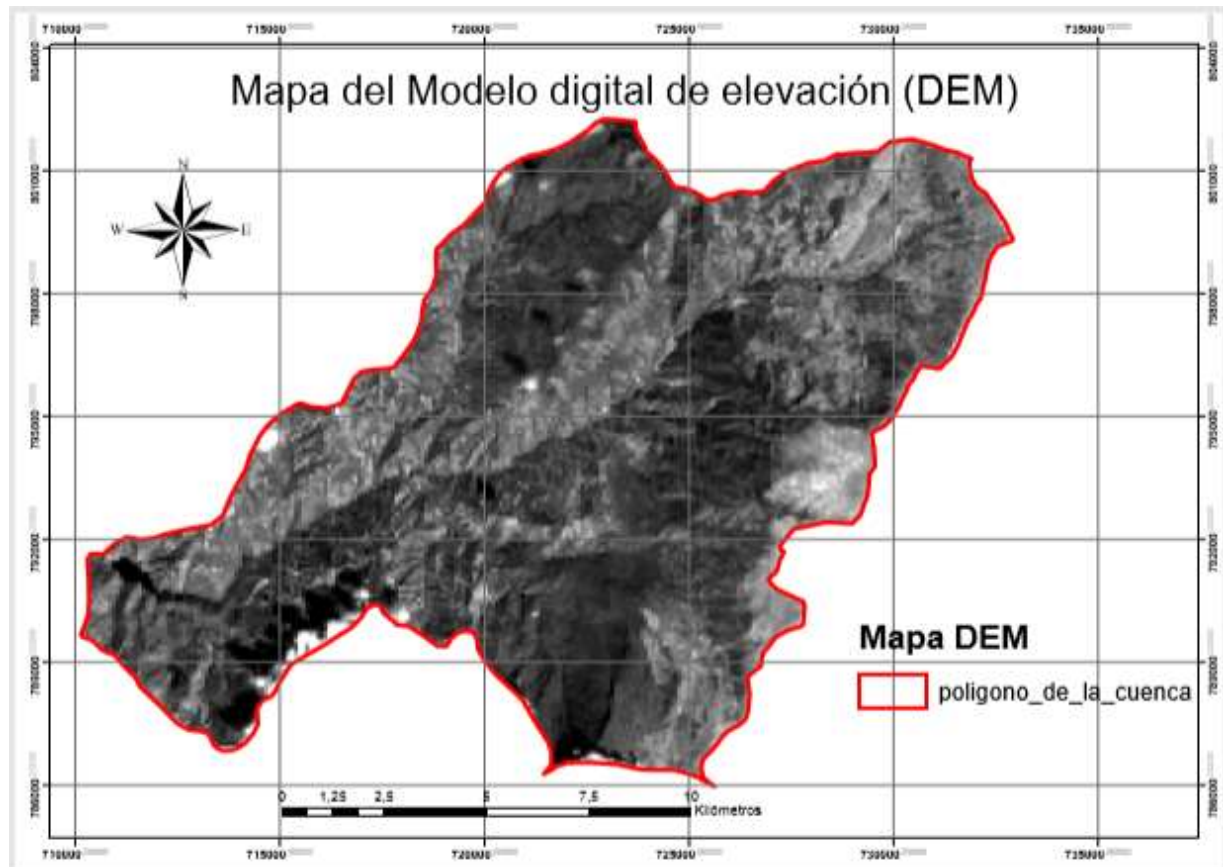
Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
211	1125943	1282216	244	1123488	1277914
212	1125980	1282108	245	1123764	1277699
213	1125940	1281642	246	1123759	1277701
214	1125849	1281586	247	1123700	1277734
215	1125684	1281545	248	1123621	1277777
216	1125565	1281508	249	1123609	1277784
217	1125352	1281390	250	1123547	1277818
218	1125247	1281317	251	1123467	1277862
219	1125193	1281236	252	1123363	1277921
220	1125069	1281076	253	1123145	1277997
221	1124977	1280982	254	1122993	1278052
222	1124934	1280846	255	1122781	1278099
223	1124916	1280761	256	1122106	1278110
224	1124914	1280628	257	1121924	1278130
225	1124787	1280538	258	1121352	1278249
226	1124576	1280366	259	1120752	1278291
227	1124631	1279957	260	1120413	1278288
228	1124590	1279527	261	1120286	1278287
229	1124548	1279382	262	1120175	1278286
230	1124514	1279317	263	1119943	1278205
231	1124375	1279201	264	1119689	1278059
232	1124284	1279154	265	1119599	1278007
266	1119784	1278234	299	1113143	1280265
267	1119777	1278525	300	1113017	1280017
268	1119708	1278790	301	1112908	1279901
269	1119507	1279095	302	1112819	1279874
270	1119377	1279294	303	1112749	1279835
271	1119051	1279859	304	1112647	1279719
272	1118442	1280424	305	1112587	1279573
273	1118180	1280751	306	1112614	1279243

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Punto	Coordenada X	Coordenada Y
274	1118001	1281032	307	1112485	1279001
275	1117958	1281320	308	1112316	1278800
276	1117872	1281475	309	1112141	1278671
277	1117674	1281502	310	1111959	1278604
278	1117498	1281465	311	1111777	1278598
279	1117317	1281300	312	1111635	1278634
280	1117231	1281134	313	1111562	1278697
281	1116992	1281144	314	1111506	1278757
282	1116794	1281297	315	1111479	1278839
283	1116469	1281516	316	1111427	1278947
284	1116295	1281634	317	1111400	1279005
285	1116010	1281657	318	1111317	1279041
286	1115924	1281753	319	1111155	1279081
287	1115805	1281842	320	1110882	1279121
288	1115666	1281971	321	1110775	1279183
289	1115607	1282130	322	1110621	1279273
290	1115478	1282153	323	1110208	1279707
291	1115426	1282134	324	1109729	1280164
292	1115292	1282084	325	1109614	1280393
293	1115130	1281829	326	1109321	1280683
294	1114915	1281604	327	1109114	1280929
295	1114624	1281424	328	1108805	1281056
296	1114232	1281163	329	1108563	1281298
297	1113841	1280946			
298	1113427	1280707			

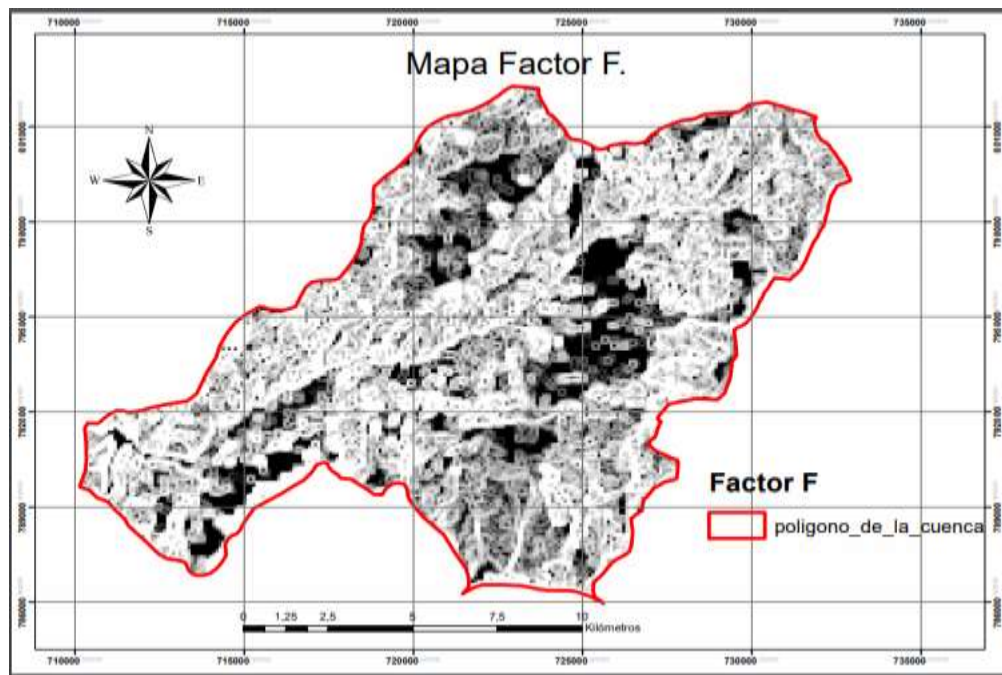
Apéndice B. Curvas de nivel.



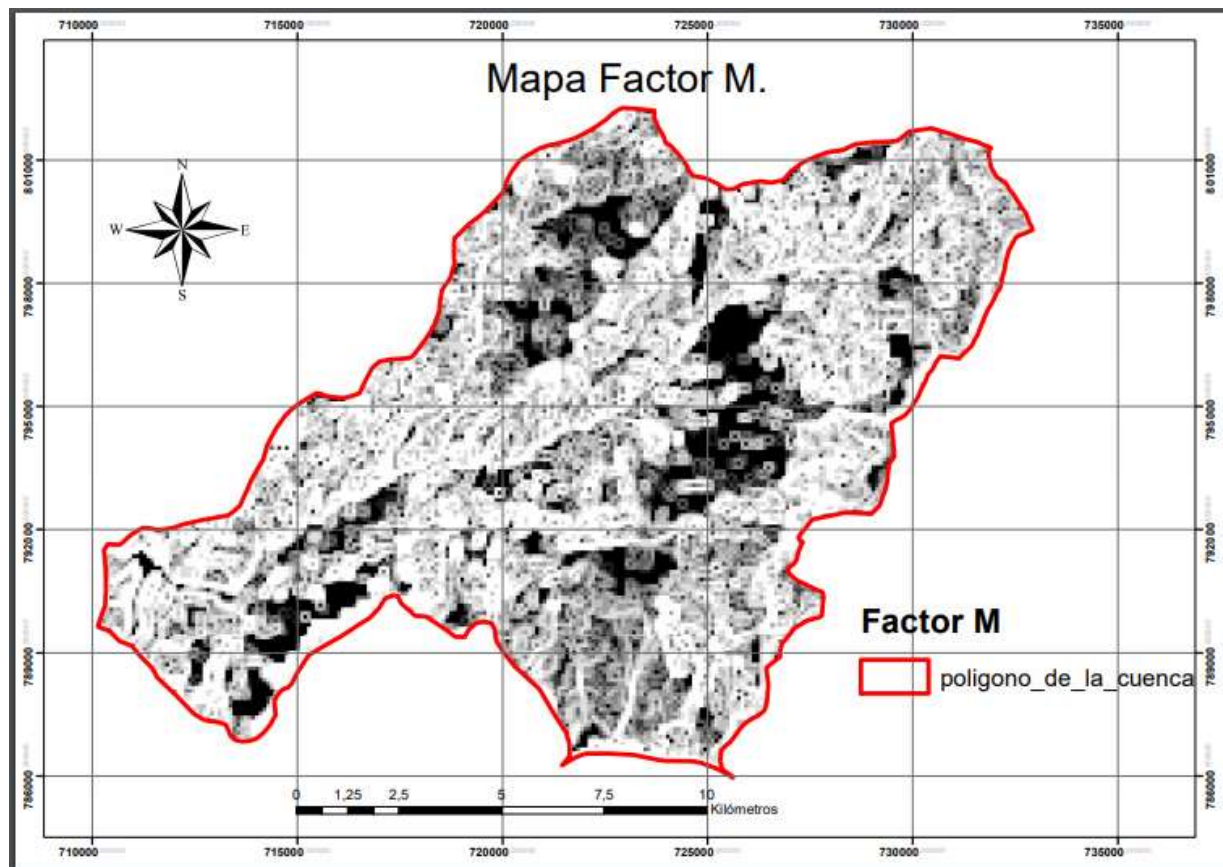
Apéndice C. Modelo digital de elevación.



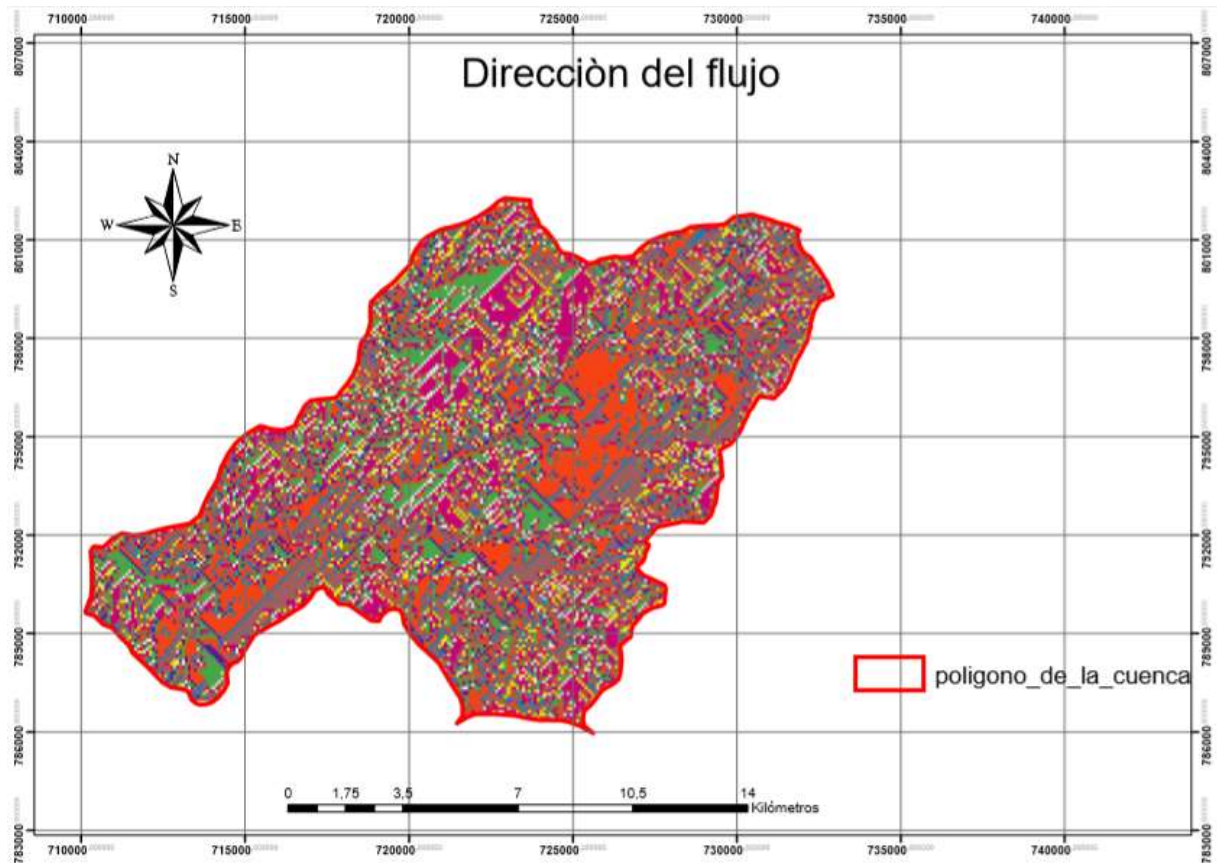
Apéndice D. Factor F



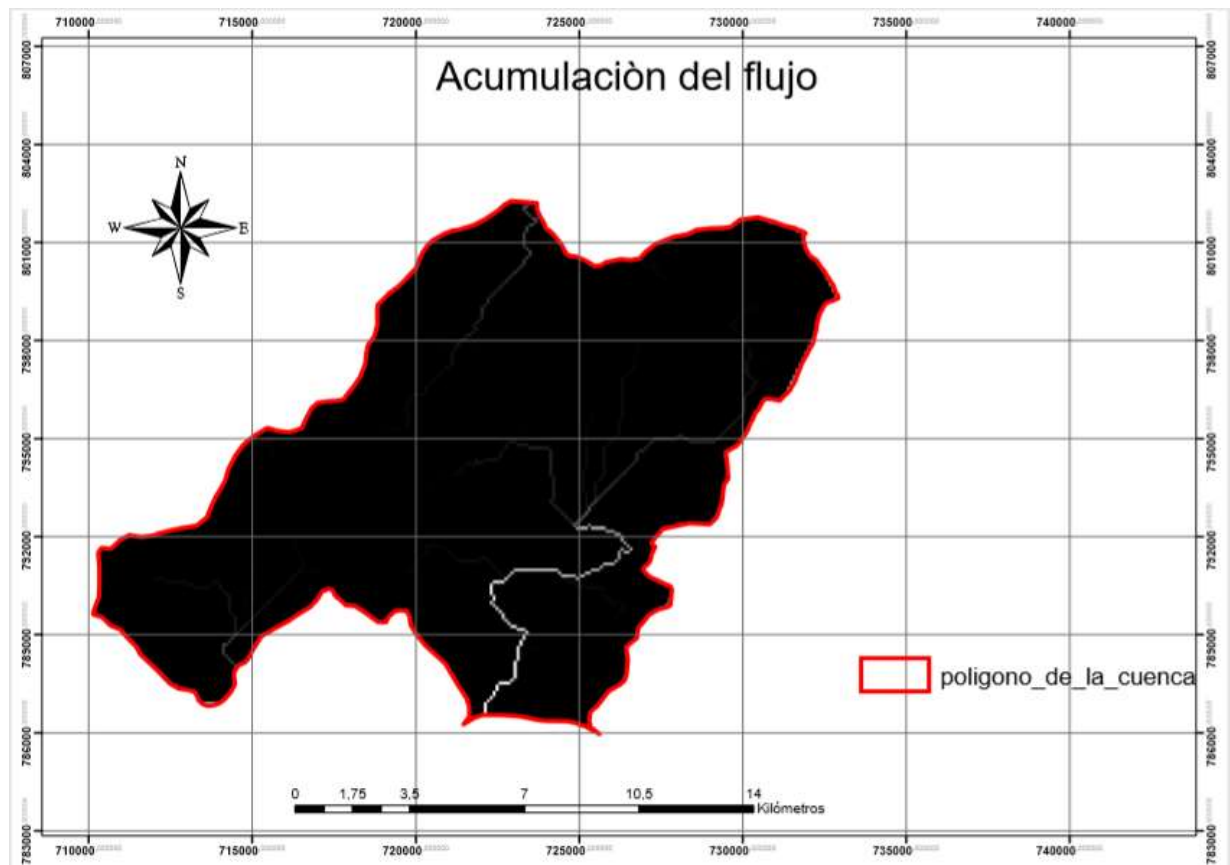
Apéndice E. Factor M



Apéndice F. Dirección del flujo.



Apéndice G. Acumulación del flujo.



Apéndice H. Bandas Landsat 8

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Costera - Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
10	(TIR 1)	10.60 - 11.19	100
11	(TIR 2)	11.50 - 12.51	100
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
8	Pancromática	0.503 - 0.676	15
9	<i>Cirrus</i>	1.363 - 1.384	30