

Estimación del potencial erosivo de la microcuenca del río Tona, mediante la ecuación universal
de pérdidas de suelo basado en los sedimentos aportados al embalse de Bucaramanga

Andrés Almeyda Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento
Ambiental

Director

Carlos Alberto Herrán de la Cruz
Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Fisicoquímica
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2019

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS	4
1.1 Objetivo General.....	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. MARCO REFERENCIAL.....	5
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1 Fase I. Medición de los sedimentos aportados al embalse:	13
3.1.1 Geodesia y topografía.....	14
3.1.1.1 Descripción de los equipos topográficos.....	14
3.1.1.2 Ajuste topográfico y geodésico.	14
3.1.1.3 Posicionamiento de GPS.	14
3.1.1.4 Amarre al sistema oficial de coordenadas en Colombia.....	15
3.1.1.5 Precisiones de la georreferenciación.	16
3.1.1.5.1 Transformación de coordenadas.....	17
3.1.1.6 Levantamiento TRK	17
3.1.2 Captura de información batimétrica mediante ecosonda multihaz.....	17
3.1.2.1 Inspección en campo y trabajo logístico.....	17
3.1.2.2 Planificación de líneas batimétricas.	18

3.1.2.3 Planificación del traslape entre líneas de información batimétrica.	19
3.1.2.4 Equipos utilizados durante la ejecución del levantamiento batimétrico.....	19
3.1.2.4.1 Embarcación.	19
3.1.2.4.2 Sistema MULTHAZ.....	19
3.1.2.5 Metodología de levantamiento batimétrico	21
3.1.2.5.1 Instalación del sistema multihaz en la embarcación.....	21
3.1.2.5.2 Calibración de sistema multihaz.....	22
3.1.2.5.3 Ejecución de campañas de captura de datos batimétricos.	23
3.1.2.6 Procesamiento de datos batimétricos.....	24
3.1.2.6.1 Corrección por fluctuación del embalse.	25
3.1.2.6.2 Corrección por velocidad del sonido (Termoclina).	25
3.1.2.6.3 Estimación de la incertidumbre del modelo.	26
3.1.3 Definición del modelo Batimétrico para el embalse de Bucaramanga.....	29
3.2 Determinación de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo	30
3.2.1 El flujo máximo y el volumen de escorrentía.....	31
3.2.2 Factor de erosionabilidad (K).	34
3.2.2.1 Mapa de cubiertas vegetales.	34
3.2.2.1.1 Ubicación de parcelas a muestrear en campo	37
3.2.2.1.2 Toma de muestras en campo.	40
3.2.2.2Análisis de la textura, estructura, el porcentaje de materia orgánica y permeabilidad.	42
3.2.2.2.1 Textura.....	42

3.2.2.2.2 Porcentaje de materia orgánica.	43
3.2.2.2.3 Permeabilidad K.	44
3.2.2.2.4 Estructura.	46
3.2.2.2.5 Aplicación del nomograma de erosionabilidad.	46
3.2.2.2.6 Interpolación a toda la cuenta de valor de erosionabilidad.	48
3.2.3 Factor longitud de la ladera y el factor pendiente (L,S).	49
3.2.4 Factor de cultivo y de ordenación.....	52
3.2.5 Factor prácticas de conservación del suelo P.	53
3.2 Rendimiento de los sedimentos	54
3.3 Ajuste del Modelo.....	55
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 Sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga.	56
4.2 Análisis de las variables que componen la ecuación modificada de pérdida del suelo MUSLE.	59
4.2.1 Calculo de los parámetros Q' y qp	59
4.2.2 Calculo de factor de Erosionabilidad (K).	60
4.2.3 Calculo del factor de Longitud y pendiente LS.	64
4.2.4 Calculo del factor de conservación y cultivo C.	66
4.2.5 Calculo del factor prácticas de conservación P.	67
4.2.6 Calculo de los sedimentos aportados por la cuenca del río Tona y ajuste de la ecuación..	68
5. CONCLUSIONES	76
6. RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

Lista de Tablas

Tabla 1 Calculo de error total multibeam reson 7125 batimetrías SAS	28
Tabla 2 Valores generados por el raster NDVI y su significado.	36
Tabla 3 Cantidad de muestras que se tomaron de cada cobertura.	38
Tabla 4 Ubicación de los puntos de muestreo	39
Tabla 5 Código de estructura del suelo de MUSLE (Escobar, 2008).....	41
Tabla 6 Calculo de la conductividad hidráulica	45
Tabla 7 Códigos USLE de permeabilidad del suelo	46
Tabla 8 Valores de C para cobertura Vegetal	53
Tabla 9 Factor P de prácticas de conservación	54
Tabla 10 Volumen de Sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga	57
Tabla 11. Cantidad de sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga.....	58
Tabla 12 Calculo de sedimentos en el sector de la cola del embalse modelos 2015/2018.....	58
Tabla 13. Calificación de la erodabilidad, propuesto para la zona cafetera colombiana.....	60
Tabla 14 Valores de K según la textura del suelo para la microcuenca del río Tona.....	63
Tabla 15 Coeficientes de correlación de Pear son entre la erodabilidad y algunas propiedades del suelo.....	64
Tabla 16 Valores del factor C para la microcuenca del río Tona.	67
Tabla 17 Rendimiento de los sedimentos acumulados	68

Tabla 18. Rendimientos de los sedimentos anuales	70
Tabla 19 Valores adoptados de las variables del factor de escorrentía.	74

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Esquema ilustrativo distribución espacial de sensores en la embarcación.....	22
<i>Figura 2.</i> Técnica de separación de flujo base. (Ven Te Chow, 1994)	31
<i>Figura 3.</i> Caudales líquidos sobre el río Tona desde el 28-08-15 hasta el 13-07-18.....	32
<i>Figura 4.</i> Imagen Satelital en el área de estudio	35
<i>Figura 5.</i> Mapa de cubiertas vegetales de la microcuenca del Rio Tona.	37
<i>Figura 6.</i> Ubicación geografía de los puntos de muestreo en la microcuenca del río Tona.	40
<i>Figura 7.</i> Esquema del ensayo de permeabilidad Lefranc somera de carga variable (Según la guía CFE 10000-73)	42
<i>Figura 8.</i> Gráfico o nomograma para la determinación de la erosionabilidad del suelo (adaptado desde Wischmeier y Smith, 1978).	49
<i>Figura 9.</i>	61
<i>Figura 10.</i> Interpolación del K de erosionabilidad en la microcuenca del Rio Tona con el método del nomograma.	62
<i>Figura 11.</i> Mapa de gradiente de pendiente para la microcuenca del río Tona.	65
<i>Figura 12.</i> Mapa del factor LS para la microcuenca del río Tona.	66
<i>Figura 13.</i> Transporte de sedimentos en la microcuenca del río Tona.	71
<i>Figura 14.</i> Producción de sedimentos en la microcuenca del río Tona hallada por la MUSLE.	72
<i>Figura 15.</i> Rendimiento de los sedimentos vs el factor de escorrentía	73

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cálculo del factor de esorrentía en función del tiempo	87
Apéndice B. Características de las muestras según los parámetros para el cálculo del factor K de erosionabilidad.....	88

Resumen

TÍTULO: ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EROSIVO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TONA, MEDIANTE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO BASADO EN LOS SEDIMENTOS APORTADOS AL EMBALSE DE BUCARAMANGA (Santander, Colombia)*

AUTOR: Andrés Almeyda Ortiz**

PALABRAS CLAVE: Sedimentos, Batimetría, erosión, Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo, MUSLE

Descripción:

La cuantificación de la erosión hídrica de los suelos sirve para establecer políticas de conservación y preservación, buscando minimizar la pérdida del recurso suelo. Por otra parte, la ausencia de información para medir con precisión aceptable la erosión, hace necesario estudiar su estimación mediante metodologías validadas con información experimental como es caso del modelo MUSLE (Ecuación Universal Modificada de Pérdida del Suelo, por sus siglas en inglés). Por tal razón, con el propósito de conocer el potencial erosivo de la microcuenca del río Tona, se utilizó la MUSLE, ajustada a los parámetros de la microcuenca de estudio mediante las mediciones de los sedimentos que han sido depositados en el embalse de Bucaramanga. El estudio se dividió en tres fases, la primera de ellas fue la medición de los sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga mediante batimetrías Multihaz, la segunda, en la determinación de los factores Q' , q_p , K , LS , C y P y la última, en el cálculo del rendimiento de los sedimentos y el ajuste de la ecuación. Como resultado se obtuvo los mapas de las diferentes variables K , LS , C y el rendimiento de los sedimentos de la microcuenca de río Tona con un valor 48,98 ton/(ha*año) y se hizo el ajuste de la ecuación al contexto local con un valor medido de 23,69 ton/(ha*año). Cabe señalar que el trabajo servirá como referencia para estimar la producción de sedimentos en cuencas vecinas con condiciones similares, ya que se logra una primera aproximación de la MUSLE al ámbito regional con la adaptación de los subíndices hallados que componen el coeficiente de escorrentía, todo esto con la firme intención de tomar medidas que detengan el deterioro del suelo, el aumento de la erosión y el aporte de sedimentos.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: Carlos Alberto Herran de la Cruz

Abstract

Title: ESTIMATION OF THE TONA RIVER MICRO-WATERSHED
EROSIVE POTENTIAL BY APPLYING THE UNIVERSAL SOIL
LOSS EQUATION BASED ON THE SEDIMENTS DISCHARGED
INTO THE BUCARAMANGA DAM [1] (Santander, Colombia)*

Author: Andrés Almeyda Ortiz**

Keywords: Sediments, Bathymetry, erosion, Universal Equation of Soil Loss, MUSLE

Description:

The quantification of soil erosion caused by water serves to establish conservation and preservation policies, seeking to minimize the loss of soil as a resource through sustainable agriculture. On the other hand, the absence of information to measure erosion with acceptable accuracy, requires an estimate of it through validated methodologies with experimental information such as the MUSLE model (Modified Universal Soil Loss Equation). In order to know the erosive potential of the Tona river micro-basin, MUSLE was used, adjusted to the parameters of the study micro-basin through measurements of the sediments that have been deposited in the Bucaramanga dam. This study was divided into three stages, the first of which is the measurement of the sediments deposited in the Bucaramanga dam by means of Multi-beam bathymetries, the second involves the determination of the factors K, LS, C and P, and the last consists in calculating sediment yield and adjusting the equation. As a result, the maps of the different variables K, LS, C and the sediment yield of the Tona river micro-basin were obtained with a value of 48.98 ton/ha/year and the adjustment of the equation was made to the local context with a measured value of 23.69 ton/ha/year. It should be noted that this analysis will serve as a reference to estimate the production of sediments in neighboring basins with similar conditions, since a first approach of the MUSLE model to the regional scope is achieved with the adaptation of the subscripts found which make up the run-off coefficient. All this is fully intending to take measures that halt soil degradation, increased erosion and sediment discharge.

* Degree work

** Faculty of mechanical engineering. School of civil engineering. Master's degree in water resources and environmental sanitation. Director: Carlos Alberto Herran de la Cruz

Introducción

Debido a la mala gestión del uso del suelo, han aumentado los procesos erosivos, pero la construcción de presas y embalses logra de forma positiva minimizar el transporte de sedimentos hacia las zonas costeras, ya que al menos el 30% de los sedimentos continentales no logran llegar al mar (Walling & Fang, 2003), sin embargo esto puede afectar negativamente la operación de los embalse, ya que disminuye su capacidad útil, generando mayores costos de operación y mantenimiento (Morris & Fan, 1998).

A su vez la generación de sedimentos puede afectar también negativamente a los ecosistemas acuáticos por el descenso del nivel de penetración de la luz, mayores concentraciones de sólidos en suspensión, transporte de compuestos tóxicos generados por las actividades agrícolas e industriales entre otros, causando así la muerte de macroinvertebrados y afectaciones en su hábitat que obligan al desplazamiento de las especies (United Nations, 2006).

Por otra parte la cuantificación de la erosión hídrica de los suelos en cuencas hidrográficas sirve para establecer políticas de conservación, preservación y para minimizar la pérdida del recurso suelo (Wischmeier & Smith, 1978). Se ha estimado que la degradación específica mundial promedio es de $1,9 \text{ Tn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, con un máximo de $64 \text{ Tn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en China y mínimo de $0,00005 \text{ Tn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en Canadá (Prado-Hernández et al., 2016). Esta pérdida de los suelos puede estar asociada a alteraciones de los balances hídricos generados por el cambio climático que afecta a procesos geomorfológicos que influyen en la erosión, estabilidad de taludes, cambio de riberas y transporte de sedimentos (Becker et al., 2007).

En el caso de nuestro país se cuenta con poca o escasa información relacionada con la degradación de los suelos respecto a procesos erosivos y que no reflejan la dinámica del problema, que permita a su vez la formulación de políticas para evitar y mitigar catástrofes por remoción en masa o inundaciones (IDEAM & MAVDT, 2012), o por otra parte, poder generar estrategias de cambio de uso del suelo, recuperación de suelos degradados, uso eficiente de procesos agrícolas, medidas de protección, estabilidad de taludes; procesos que afectan directamente los aportes de sedimentos.

La presencia de sedimentos en suspensión en la cuenca superior del río Lebrija de la cual hace parte la microcuenca del río Tona, es la causante de las altas turbiedades, siendo esta microcuenca la que aporta el 60% del total de agua para abastecimiento del Área Metropolitana de Bucaramanga, lo que genera un aumento progresivo en el uso de los insumos químicos necesarios para la potabilización del agua, como es el caso de los coagulantes (sulfato de aluminio líquido), el cual tiene un aumento considerable, pasando de 1127 toneladas empleadas en el año 2012 a 1897 toneladas requeridas en el año 2016; cifra que representa un incremento del 68%, en cuanto a la utilización de Sulfato de Aluminio (AMB, 2016).

Dada la ausencia de información para medir con precisión aceptable la erosión en Colombia, es necesario estudiar su estimación mediante metodologías validadas con información experimental.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio es estimar el potencial erosivo en la microcuenca del río Tona, perteneciente a la subcuenca del río de Oro y a la cuenca del río Lebrija, mediante el modelo MUSLE (Ecuación Universal Modificada de la Pérdida del Suelo, por sus siglas en inglés), con información obtenida de la interpretación de fotografías satelitales, series de caudales líquidos, contenidos de materia orgánica del suelo, textura y estructura del suelo y de batimetrías

realizadas al embalse de Bucaramanga durante los años 2017 y 2018, para disponer de una herramienta de apoyo en la toma de acciones para un manejo sustentable del suelo.

Como aporte fundamental el proyecto, este sirve como instrumento guía para la elaboración y actualización del Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la microcuenca del río Tona, ya que permite conocer el uso y degradación del suelo y la susceptibilidad del mismo ante los procesos erosivos.

En particular los resultados interesan como referencia para estimar la producción de sedimentos en cuencas vecinas con condiciones similares a la del presente trabajo ya que se logra una primera aproximación de la MUSLE al ámbito regional con la adaptación de los subíndices que componen el coeficiente de escorrentía, todo esto con la firme intención de tomar medidas que detengan el deterioro del suelo, el aumento de la erosión y el aporte de sedimentos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estimar el potencial erosivo de la microcuenca del río Tona, mediante la ecuación universal de pérdidas de suelo.

1.2 Objetivos Específicos

Estimar los sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga desde su primer llenado (año 2015) hasta el año 2018.

Calcular con la información disponible las diferentes variables que componen la ecuación modificada de pérdida del suelo MUSLE.

Ajustar la ecuación universal modificada de pérdidas de suelo para la microcuenca de río Tona.

2. Marco Referencial

La concentración de partículas o sedimentos en los cauces es el resultado del desprendimiento de partículas sólidas de suelo y roca en los cauces y sus márgenes, el aporte indirecto (arranque y transporte) de partículas provenientes de procesos erosivos de los suelos que conforman la microcuenca y el vertimiento de materiales por actividades antrópicas (IDEAM, 2014).

El Estudio Nacional del Agua (ENA) del 2014, indica que ha existido un aumento del transporte de sedimentos comparado con el estudio realizado en el ENA del 2010 en las estaciones del área hidrográfica Magdalena-Cauca, de hasta el 5%, con excepciones notables como es el caso de estaciones en el río Cauca región de la Mojana que reportaron un aumento de hasta del 25,9%, asociado a una posible causa que es el aumento de la explotación minera.

La zona andina presenta los potenciales más altos de producción de sedimentos y esto puede ser causado por:

Altas pendientes desde las que discurren ríos encajonados en los cuales predominan procesos de movimientos en masa, muchos de ellos ubicados en las márgenes de fuentes de agua encargadas del transporte de sedimentos.

Regímenes de lluvias torrenciales que ocasionan la saturación de las vertientes por precipitaciones intensas en cortos períodos.

Usos del suelo predominantemente agrícola con poca cobertura natural protectora, que en ocasiones se limita a las cabeceras de las fuentes de agua.

Alta ocupación del territorio con obras civiles que aumentan la producción de sedimentos al ocasionar procesos de desestabilización de laderas (IDEAM, 2014).

La microcuenca del río Lebrija se enmarca dentro del rango cualitativo definido por la ENA 2014 como de producción potencial de sedimentos con zonas que se logran identificar en los mapas a escala 1:5'000.000, de media, alta y muy alta, con registros de transporte medio anual multianual de sedimentos de series comprendidas entre 1976 y 2009 en la estación Café Madrid con código IDEAM 23197290 de 519.760,0 ton/año con un rendimiento medio anual multianual de 410 ton/(año*Km²), según la escala de rendimientos adoptada por el IDEAM, encaja en el rango bajo entre 200 y 500 ton/año*Km², esto posiblemente se deba a que predominan los territorios agrícolas, se observan bosques y áreas seminaturales que cumplen una función protectora contra la erosión en la partes medias y altas de la microcuenca (IDEAM, 2014), a su vez el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga a través de su política de gestión ambiental rural, ha logrado adquirir 12.276,4 ha sobre la parte alta de la microcuenca del río Lebrija, que son empleadas para la protección, preservación, enriquecimiento y recuperación de áreas degradadas, las cuales han permitido mantener los caudales de los Ríos Tona, Frío y Surata (AMB, 2016).

Los análisis de aforos líquidos y sólidos efectuados en la estación Puente Tona, desde febrero de 2005 hasta octubre de 2006 (Integral Ingenieros Constructores, 2012) realizados en las fases 2 y 3 del proyecto de Regulación de Río Tona, Embalse de Bucaramanga, generaron un estimativo del transporte de sedimentos de fondo y suspendidos de 131.038 ton/año, lo que corresponde a

90.371,04 m³/año con un peso específico de 1,45 t/m³, que serán retenidos en un 100% por el vaso del embalse. §

Los procesos de erosión, transporte y sedimentación pueden darse en varias escalas de tiempo que van desde milenios y siglos hasta días y horas, cambiando para ello las variables que intervienen en el fenómeno. (IDEAM, 2014).

En consecuencia, la estimación permanente de la erosión del suelo o sus consecuencias, tales como el rendimiento de los sedimentos, es una necesidad, que básicamente se puede satisfacer mediante la aplicación de modelos apropiados. Los modelos de proceso de erosión del suelo generalmente se han desarrollado en lugares específicos en el mundo y se han exportado a otras partes, y algunos se han aplicado ampliamente (Sadeghi, Gholami, Khaledi Darvishan, & Saeidi, 2014).

El trabajo de grado está orientado en la producción de sedimento en laderas que incluye la erosión ocurrida en cárcavas, fondo y taludes del cauce, caminos y desprendimientos en masa, ya que el Modelo USLE o MUSLE** puede representar en buena manera la producción de sedimentos a la salida de una cuenca, pues sus factores integran el proceso de erosión y transporte del suelo (Sadeghi et al., 2014).

Los desprendimientos en masa son producidos por fuerza pasivas como la morfología de terreno caracterizándose por las condiciones de talud como son la orientación pendiente y longitud

§ Esto partiendo de que Método de capacidad de la cuenca (Curva de Brown) que relaciona el volumen del embalse con el área de la cuenca, se calcula que aproximadamente el 99.5% será retenido por el embalse de Bucaramanga.

** Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada

y a su vez están íntimamente ligados con los procesos típicos de erosión, por lo tanto, es característico de cuencas de alta montaña donde predominan las pendientes fuertes siendo un porcentaje importante en el aporte de sedimentos, dentro de los métodos de estimación se encuentran los modelos de fluidos de avalanchas como el fluido Bingham y fluido dilatante (Suarez, 2001), pero estos modelos no se tomaron en cuenta en este trabajo de aplicación.

Identificar áreas con erosión activa a escala de cuenca puede ser muy útil para la gestión medioambiental, siendo un requisito para la planificación de medidas contra la degradación del suelo y la producción de sedimentos. El uso de estimativos espaciales distribuidos utilizando técnicas de teledetección como las fotografías satelitales es útil para discriminar zonas de erosión activa y de riesgo de erosión en cuencas hidrográficas (Alatorre, L. C. ; Beguería, 2009).

Entre los modelos de erosión del suelo, la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), es la más utilizada para la estimación de la pérdida de suelo, aplicada en su inicio en los Estados Unidos para la predicción de las pérdidas de suelo producida en suelos con usos agrícolas, ha logrado extenderse a numerosos países (Prado-Hernández, Rivera-Ruiz, de León-Mojarro, Carrillo-García, & Martínez-Ruiz, 2017), sin embargo, su aplicación está limitada a las circunstancias ambientales de las cuales se generó, ya que esta fue planteada para la estimación de la pérdida anual de suelo a partir de pequeñas parcelas de un área de unos 40 m², y su aplicación a eventos de tormentas individuales y áreas extensas conduce a grandes errores, pero se ha demostrado que su precisión aumenta si se combina con un modelo hidrológico que determine la escorrentía directa (Sadeghi et al., 2014).

La USLE es un modelo paramétrico expresado matemáticamente de la siguiente forma:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{Suarez, 2001})$$

Ecuación 1

Donde:

A = pérdida de suelo por unidad de superficie: se obtiene por el producto del resto de los factores $\left(\frac{t}{ha}\right)$ (Suarez, 2001).

R = factor lluvia, y mide la fuerza erosiva de una lluvia determinada $\left(\frac{J * cm}{m^2 * h}\right)$ (Suarez, 2001).

K = factor erosionabilidad de suelo: es el valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial, para un suelo determinado, con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22,1 m $\left(\frac{t * m^2 * h}{ha * J * cm}\right)$ (Suarez, 2001).

L = factor longitud de la ladera: es la relación entre la pérdida de suelo para una longitud determinada y la pérdida en una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo (Suarez, 2001).

S = factor pendiente: es la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo (Suarez, 2001).

C = factor cultivo y ordenación: es la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo sin cultivo (Suarez, 2001).

P = factor prácticas de conservación del suelo: es la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las pérdidas de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente (Suarez, 2001).

Un inconveniente con el modelo USLE es que el factor de Lluvia (R) utilizado no tiene en cuenta la lluvia efectiva, la cual genera la escorrentía superficial y además, al considerar un rendimiento constante también induce a errores de precisión, ya que el rendimiento de los sedimentos está relacionado con la precipitación (Sadeghi et al., 2014).

Por lo tanto, se desarrolló una versión modificada de la USLE basado en las características de la escorrentía como la variable principal para la predicción del rendimiento de sedimentos, en función de eventos de tormenta en la microcuenca hidrográfica ajustando el factor de precipitación (R) y reemplazado por un factor de escorrentía, para lo cual se usaron 778 eventos de lluvias, recolectadas en 18 cuencas hidrográficas, con áreas que varían de 15 a 1500 ha, pendientes de 0,9 a 5,9% y longitudes de talud de 78,64 a 173,74 .El modelo así modificado se denominó la ecuación de pérdida de suelo universal modificada (MUSLE) (Williams, 1975).

Sin embargo además, por ser lotes experimentales con cultivos y tratamientos específicos, sus resultados no son válidos para representar el comportamiento de una cuenca como una sola unidad de respuesta hidrológica, pues solo una porción del suelo desprendido de la superficie llega a la salida de una cuenca y la producción de sedimentos es el resultado, además de la erosión laminar y en canalillos representada por los modelos USLE y MUSLE, de la erosión ocurrida en cárcavas, fondo y taludes de cauces, caminos, y del desprendimiento en masa. Al respecto, el modelo MUSLE puede representar de manera adecuada la producción de sedimentos a la salida de una cuenca, pues sus factores integran el proceso de erosión y el transporte del suelo (Prado-Hernández et al., 2017), (Arekhi, Shabani, & Rostamizad, 2012).

La MUSLE presenta la siguiente forma general:

$$S_y = a * (Q' * q_p)^b * K * S * L * C * P$$

Ecuación 2

Donde S_y es el rendimiento de sedimentos (en t) sobre una base de tormenta y para toda la microcuenca hidrográfica del estudio, Q' es el volumen de escorrentía (en m^3), q_p es el caudal máximo (en $\frac{m^3}{s}$) y K, L, S, C y P son, respectivamente, factor erosionabilidad de suelo, factor longitud de la ladera, factor pendiente, factor cultivo y factor prácticas de conservación del suelo similares al modelo USLE, y “a” y “b” son coeficientes de ubicación. Para las áreas donde se

desarrolló la ecuación, “a” y “b” fueron 11,8 y 0,56, respectivamente, para las unidades del sistema métrico (Williams, 1975).

El modelo MUSLE se ha aplicado en variadas cuencas hidrográficas en todo el mundo, pero no hay que olvidar que fue producido para condiciones específicas, por lo tanto, su aplicación sin calibración ha resultado en grandes errores (Sadeghi et al., 2014).

Por lo anterior, el trabajo de aplicación utiliza la ecuación modificada de pérdida del suelo MUSLE, con su respectivo ajuste del factor multiplicador “a” y de la potencia “b” para obtener resultados que se adaptaron a las condiciones de la cuenca del río Tona.

Resultado de 49 estudios mostraron que los métodos de estimación del factor erosionabilidad de suelo no afectaron la precisión de las estimaciones del modelo (Sadeghi et al., 2014), por lo tanto puede ser una buena elección para el proyecto de investigación obtenerlos por medio de los diagramas de Wischmeier y Smith, (Wischmeier & Smith, 1978) y de muestreos aleatorios realizados en campo dentro de la microcuenca del río Tona.

Los factores de cultivo, ordenación y prácticas de conservación del suelo también mostraron que considerar la variación temporal de estos factores podría mejorar significativamente el rendimiento del modelo, aunque rara vez se ha tenido en cuenta. (Sadeghi et al., 2014). Para este trabajo se estima con la ayuda de las tablas disponibles y la generación de un promedio ponderado, ya que su estimación en el tiempo no es posible porque solo se cuenta con dos años de batimetrías en el embalse de Bucaramanga y se puede considerar que es un intervalo de tiempo corto (2 años) para que se generen cambios sustanciales en el uso del suelo de la microcuenca del río Tona.

Para el flujo máximo y el volumen de escorrentía se demostró que a mayor cantidad de mediciones de campo y directas de la escorrentía en caso de tormentas se podrá tener un mejor rendimiento de la producción del modelo en comparación con el uso de métodos indirectos de

lluvia esorrentía. (Sadeghi et al., 2014), para este trabajo de aplicación se parte de serie de caudales sobre el río Tona desde la fecha del inicio del llenado del embalse (28-08-15) hasta el día cuando se realizó la última batimetría(13-07-18).

Recientemente, la MUSLE se ha utilizado con frecuencia como un módulo para modelos hidrológicos, como es el caso del software SWAT en sus siglas en inglés, Soil and Water Assessment Too, usado para estimar el rendimiento de sedimentos, pero el software utiliza la ecuación en su forma original, con los coeficientes hallados por William (Williams, 1975) y generalmente no se considera ninguna modificación o calibración, por lo tanto sus resultados tienen menor precisión y también debido a la dependencia de modelos empíricos y semiempíricos, como es caso del número de curva SCS (Soil Conservation Service), existe cierta incertidumbre en los resultados obtenidos (Sadeghi et al., 2014). Por lo tanto, para la microcuenca del río Tona se usaron los caudales líquidos de una serie comprendida entre el 28 de agosto de 2015 y el 13 de julio de 2018 con la finalidad de contar con datos directos de valores de esorrentía.

Con lo anterior se evalúa los procesos de producción y depositación de sedimentos a nivel de la microcuenca hidrográfica del río Tona, a partir de las características del medio físico actual determinadas mediante los estimativos espaciales distribuidos que se pueden generar de la interpretación de imágenes satelitales que permite identificar los procesos de producción de sedimentos que se depositan en el embalse de Bucaramanga y la identificación de áreas de producción que permiten conocer las condiciones de respuesta de la microcuenca y los sistemas hídricos a los procesos de transformación por las actividades humanas.

3. Metodología

Para estimar el potencial erosivo de la microcuenca del río Tona fue necesario determinar el rendimiento de los sedimentos a escala anual, para ello se usó la ecuación universal modificada de pérdida del suelo MUSLE, ajustada a los parámetros de la microcuenca de estudio mediante las mediciones de los sedimentos que han sido depositados en el embalse de Bucaramanga. El estudio se dividió en tres fases metodológicas con sus respectivas actividades. Las fases y actividades ejecutadas se detallan a continuación:

3.1 Fase I. Medición de los sedimentos aportados al embalse:

Para la medición de los sedimentos se llevó a cabo la integración de tres tecnologías diferentes: Batimetría, Topografía y Geodesia, basándose en los Sistemas de Información Geográfica. Las labores de campo correspondientes al levantamiento batimétrico del embalse de Bucaramanga se realizaron entre los días 11 y 13 de julio de 2018, por la empresa Batimetrias SAS. Por otra parte, los trabajos topográficos se ejecutaron el 14 de julio de 2018. Finalmente, los vuelos de captura de dron se perpetraron durante el día 14 de julio del 2018. Las labores de postproceso de los datos se realizaron el 16 de julio de 2018. Estas actividades fueron el insumo fundamental para la generación del MDT (Modelo Digital de Terreno) del área inundada del embalse, siendo generado a partir de la nube de puntos del levantamiento multihaz y la topografía convencional.

Se realizó un levantamiento batimétrico Multihaz de acuerdo con la orden 1 de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) número S-44 (OHI, 2008).

3.1.1 Geodesia y topografía. En este numeral se describe la metodología realizada durante las labores de campo ejecutadas entre el sábado 14 y 15 de julio del 2018, necesarias para realizar el ajuste y control de calidad de los productos topográficos y batimétricos del embalse del Bucaramanga

3.1.1.1 Descripción de los equipos topográficos. Los equipos de rastreo satelital GPS que se utilizaron en este trabajo fueron los Leica 1230 Pro doble frecuencia (L1-L2) de precisión centimétrica.

3.1.1.2 Ajuste topográfico y geodésico. La primera actividad realizada corresponde a la identificación de los vértices de la Red Magna Pasiva o MAGNA ECO del país, desarrollada por el IGAC, para el posicionamiento horizontal y vertical por sistema GPS. Localizando sobre un mapa la ubicación de dichos vértices, diseñando y determinando de esta forma la mejor ubicación de cada uno de los equipos, planificando así el tiempo y la duración de cada uno de ellos sobre los nuevos puntos dependiendo de las distancias a los vértices del IGAC.

3.1.1.3 Posicionamiento de GPS. Se realizó el posicionamiento de la base principal del GPS en una de las zonas estratégicas del embalse de Bucaramanga. Dicha zona fue seleccionada teniendo en cuenta las siguientes características:

- Facilidad de acceso

- Área despejada
- Cobertura de satélites

El Software utilizado para el cálculo de los levantamientos con GPS, cuenta con una herramienta específica que ayuda a planificar y organizar las observaciones de campo GPS. El procedimiento en campo inicio con la instalación del equipo sobre cada uno de los puntos programados verificando:

- El estado de la batería.
- La calidad de la señal.
- El almacenamiento correcto de los datos.

Posteriormente se llenó la planilla correspondiente para este tipo de levantamientos, en la cual quedaron registrados los datos relacionados como:

- El tiempo de rastreo.
- El tipo de equipo y de antena utilizada.
- La altura y tipo de medida.
- El operador y demás datos que fueron verificados posteriormente en el post proceso.

Los puntos de control planimétrico se calcularon partiendo de los puntos de amarre del IGAC realizando el traslado de coordenadas a cada uno de ellos.

3.1.1.4 Amarre al sistema oficial de coordenadas en Colombia. El sistema planimétrico de referencia corresponde con el Marco geocéntrico nacional MAGNA, extensión del ITRF en América que para Colombia y está asociado al elipsoide GRS80. Las coordenadas de las estaciones MAGNA-SIRGAS están definidas sobre el ITRF94, época 1995.4

Este sistema es de origen geocéntrico coincidente con el centro de masas terrestre. En cuanto a la proyección cartográfica oficial para Colombia es el sistema Gauss-Krüger, el cual es una representación conforme del elipsoide sobre un plano y el que está distribuido en seis orígenes cada 3 y 6 grados respectivamente al Este y al Oeste y con orígenes en Este y Norte 1'000.000 cada uno.

3.1.1.5 Precisiones de la georreferenciación. Una vez grabada la información de cada sesión, los datos de campo fueron descargados mediante el software Leica GeoOffice, exportándose como archivos Rinex, para el procesamiento mediante el software mencionado con un control de calidad para la sesión, hasta obtener una solución aceptable que cumpla con las normas mínimas de cálculo como los radios, varianza, el valor del RMS y el error medio cuadrático.

El procesamiento de cada uno de los puntos se llevó a cabo con la metodología que recomienda el IGAC en relación con el “Procesamiento de Información de GPS considerando la variación de las Coordenadas en el Tiempo (Velocidades) por efectos Geodinámicos”, que a la letra dice:

a) *Las Coordenadas proporcionadas por el IGAC en la certificación expedida por la División de Geodesia están referidas al Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas ITRF94, es decir, son válidas para el mes de Mayo de 1995 (1995.4), es por esto que debe trasladarse a la época de ocupación de los puntos nuevos a localizar utilizando las velocidades consignadas en la misma certificación, si no se realiza este procedimiento podría generar errores hasta el nivel del decímetro en la localización de los nuevos puntos.*

b) *Se adelantó el procesamiento de la información GPS y se determinan las nuevas coordenadas de los nuevos puntos.*

3.1.1.5.1 Transformación de coordenadas. Como resultado final del procesamiento se obtuvieron los cuadros de coordenadas planas en sistema Gauss Krüger - Magna Bogotá y las coordenadas geodésicas del datum WGS-84 en las épocas de 1995.4 y 2018.7. También se muestra el resultado obtenido para la determinación de las velocidades de cada uno de los puntos de GPS.

3.1.1.6 Levantamiento TRK. Conocido por sus siglas en inglés RTK (Real Time Kinematic), este levantamiento cinemático efectuado en tiempo real permite la obtención de coordenadas con precisión centimétrica.

Durante este levantamiento topográfico del embalse del Bucaramanga se ubicó un receptor GPS fijo en modo estático en un punto localizado en el contorno del embalse, mientras que el receptor móvil o "Rover", receptor en movimiento capturó 110 puntos a los cuales se determinó en postproceso las coordenadas en tiempo real corregidas y ajustadas. Este tipo de levantamiento fue utilizado para determinar el volumen de sedimentos en la zona de la cola del embalse ya que allí no podía acceder con la embarcación que tenía incorporado el sistema Multihaz.

3.1.2 Captura de información batimétrica mediante ecosonda multihaz. En este apartado se describen los sensores y las labores de planificación, adquisición, procesamiento e interpretación de datos batimétricos de alta resolución multihaz, que condujeron a la obtención de información batimétrica detallada del embalse del Bucaramanga.

3.1.2.1 Inspección en campo y trabajo logístico. Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas integrados al sensor multihaz, y previendo posibles dificultades

que habrían impedido el correcto cumplimiento del cronograma, se realizó una visita previa a la zona de trabajo, donde se verificaron los siguientes elementos:

- Movilidad en la zona de estudio: Transporte a utilizar para llegar al área del proyecto. Así mismo, se calcularon los tiempos de desplazamiento diarios entre el campamento y el área de estudio.
- Realización de cursos de ingreso para trabajos en campo.
- Alojamiento de personal técnico en campo.
- Asistencia hospitalaria en caso de emergencia.
- Asistencia técnico-mecánica para vehículos y equipos:
- Garantías de seguridad y vigilancia de equipos en la zona de estudio

3.1.2.2 Planificación de líneas batimétricas. Dada la delimitación del área de estudio en el embalse del Bucaramanga y apoyándonos en la cartografía e información de proyectos batimétricos previos suministrada por Acueducto Metropolitano Bucaramanga S.A E.S.P (**amb**), se realizó una planificación inicial de las líneas hidrográficas, teniendo presente las condiciones geomorfológicas.

Como primer paso en el proceso de planificación, se calculó la superficie aproximada que abarca el sondeo, se crea una matriz de cobertura con la ayuda del software HYPACK. Dentro de la matriz, se dibuja líneas de sondeo paralelas entre sí, donde la equidistancia que las separa se encuentra en función de la profundidad de la zona de estudio. La distancia entre líneas se reduce cuando la profundidad va incrementando y viceversa. Estas líneas planificadas a su vez le sirven de orientación al patrón de navegación que se usó en la batimetría.

3.1.2.3 Planificación del traslape entre líneas de información batimétrica. Con el objetivo de garantizar la calidad de la captura de información batimétrica, se ejecutó el levantamiento del 100% mediante el uso de ecosonda multihaz, con un traslape entre pasadas del 50%, asegurando la completa cobertura del lecho. La captura de información se efectuó mediante recorridos sinusoidales de orilla a orilla navegable, capturando cada línea hidrográfica previamente programada en el software hidrográfico PDS2000.

Los datos de la batimetría multihaz capturados fueron georreferenciados con la red Geodésica del proyecto, la cual fue reposicionada con GPS de precisión para garantizar el ajuste de los datos.

Por último, es necesario aclarar que la metodología seguida durante la realización de cada trabajo de captura multihaz es la detallada por la Organización Hidrográfica Internacional para Levantamientos Hidrográficos en su documento (S-44) (OHI, 2008).

3.1.2.4 Equipos utilizados durante la ejecución del levantamiento batimétrico

3.1.2.4.1 Embarcación. Para la instalación del sistema multihaz fue seleccionada la embarcación la cual cumplía con las licencias vigentes para su navegación, capacidad de cargar para soportar los equipos y personal que realiza el levantamiento batimétrico.

3.1.2.4.2 Sistema MULTIHAZ. En los siguientes apartados se realiza un breve inventario de los equipos utilizados durante el levantamiento Batimétrico Multihaz, junto con sus características más importantes.

ECOSONDA MULTIHAZ RESON SEABAT 7125 Sistema sonar de alta resolución con flexibilidad en su instalación y desempeño, capaz de tomar la batimetría del fondo de los cuerpos de agua de manera precisa y limpia.

Esta fase comprendió de tres etapas, la primera de ella fue la logística de campo para la georreferenciación topografía, la segunda incluyó los trabajos de campo de montaje, calibración de equipos y captura de la información y la tercera del procesamiento y análisis de la información Batimétrica.

IMU APPLANIX POS MV. Unidad de Medición Inercial (IMU) con 3 giroscopios y 3 acelerómetros de alta calidad.

PERFILADOR DE VELOCIDAD AML. Sistema de medición y corrección de la velocidad del sonido desde la superficie del agua y a través de la columna de agua, determinando los ángulos de llegada de los haces (Beams) con relación del cabezal del transductor y la refracción (inclinación) de los haces acústicos.

SVP 70 SENSOR DE VELOCIDAD. Sonda de velocidad del sonido desarrollada para su instalación como montaje fijo en buques de superficie, equipos fuera de borda, submarinos, vehículos autónomos submarinos, ROV y otras plataformas autopropulsadas. El SVP 70 utiliza la última tecnología electrónica combinada con un innovador diseño mecánico para producir un producto compacto, robusto, pero muy flexible.

El SVP 70 utiliza una ruta directa de conexión hacia la ecosonda, compensando la información al instante para temperatura y presión con sus sensores internos.

3.1.2.5 Metodología de levantamiento batimétrico

3.1.2.5.1 Instalación del sistema multihaz en la embarcación. El montaje e instalación del sistema multihaz en la embarcación fue realizado por personal técnico especializado de BATIMETRIA SAS. Durante el proceso de montaje fue necesario medir las coordenadas de la antena GPS respecto a los ejes coordenados de la IMU, y los centros de proyección entre la IMU y ecosonda, como se presentó en el numeral anterior.

Algunas de las actividades realizadas durante la instalación de los equipos fueron:

- Adecuación de lancha: Lancha que cuente con cubierta, que permita la segura instalación de los equipos electrónicos en su interior.
- Montaje y cableado del sistema base del transductor
- Ensamble del transductor a su base
- Montaje y cableado de 2 antenas del sistema GPS
- Montaje y cableado del computador y procesador
- Montaje y cableado de POSMV unidad de control encargada de recepción e integración de la información de la IMU y receptores GPS.
- Medición y cálculo de las coordenadas de la antena GPS respecto a los ejes coordenados de la IMU, y medida de vector entre la IMU al transductor de la ecosonda.

En la Figura 1, se puede observar la ubicación de los equipos en las respectivas embarcaciones, cada uno de ellos es referenciado respecto al sensor de movimiento Inercial (IMU) generando

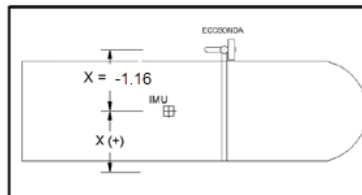
coordenadas espaciales (XYZ) denominadas (offsets) que son tenidas en cuenta para el proceso de calibración del sistema.

3.1.2.5.2 Calibración de sistema multihaz. Para garantizar la calidad de los datos capturados, el día 12 de julio, se realizó después del montaje, una calibración del sistema inercial IMU (Patch test). Por medio de este método de calibración se calculó la desalineación entre el sistema de coordenadas de la IMU y los ejes coordenados de la ecosonda.

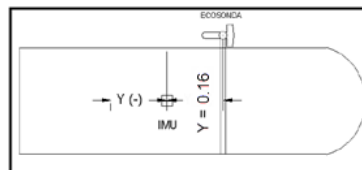
El propósito de la calibración realizada es corregir errores sistemáticos creados por el posicionamiento y los ángulos de montaje de los diferentes sensores. Luego de ejecutar este proceso correctamente, el sistema mostró la misma batimetría en repetidas pruebas, independientemente de variables como la velocidad, la dirección y el movimiento de la embarcación.

Desplazamientos en el PDS 2000 son medidos en metros. Los ejes son:

- X es positivo a estribor (starboard) lado derecho.



- Y es positivo hacia adelante.



- Z es positiva hacia arriba.

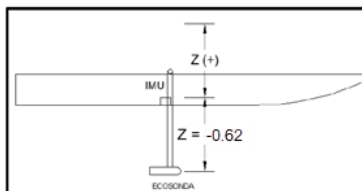


Figura 1. Esquema ilustrativo distribución espacial de sensores en la embarcación.

Las variables tenidas en cuenta para la calibración son: latencia, cabeceo, balanceo y rumbo, que deben calcularse en este orden. Se necesitan algunas características del fondo en la medición de los desplazamientos entre sensores específicos, incluyendo una pendiente, un fondo plano y un objeto discreto.

Para la medición de las variables se determinó:

- Latencia: Se ejecutó una línea dos veces, en la misma dirección a dos velocidades diferentes.

Para la máxima precisión se localizó un fondo que contuvo una pendiente de 10° a 20° con superficies planas en cada lado.

- Cabeceo (Pitch): Se ejecutó una línea dos veces, a la misma velocidad, en direcciones opuestas.

- Balanceo (Roll): Se ejecutó una línea dos veces, con la misma velocidad, en direcciones opuestas. Llevándose a cabo en un fondo plano, con el fin de mostrar los desplazamientos en las partes exteriores.

- Rumbo (Yaw): Se realizaron dos líneas separadas de igual longitud, en la misma dirección, a la misma velocidad. Estas líneas se hicieron sobre un objeto discreto el cual estuvo centrado entre las dos líneas.

3.1.2.5.3 Ejecución de campañas de captura de datos batimétricos. Los levantamientos batimétricos multihaz fueron llevados a cabo del 11 al 13 de julio del 2018.

Antes de empezar la captura, se comprobó el correcto estado de los equipos (Emisor y receptor del ecosonda, Sistemas GPS/INS, IMU, perfiladores de velocidad, planta eléctrica, motor de la embarcación, pantallas, periféricos y demás sistemas electrónicos, etc.) De este modo se garantizó

la correcta realización de cada campaña hidrográfica de campo y la seguridad del equipo humano y los instrumentos.

Siguiendo el diseño de las líneas hidrográficas planificadas, se realizaron inicialmente las líneas paralelas al borde del embalse, finalizando la campaña batimétrica con recorridos sinusoidales a lo largo de las líneas batimétricas paralelas entre sí, localizadas al interior del cuerpo de agua.

Con la ayuda del software PDS2000 en tiempo real se validó la información adquirida, para continuar comprobando los parámetros de captura como son: Profundidad, potencia de emisión, ganancia, número de pulsos emitidos por segundo, velocidad del sonido, absorción, ángulo de apertura, corrección de marea, oleaje, balanceo, cabeceo, rumbo y visualización de los barridos en 3D.

El lanchero por su parte visualizó en pantalla las líneas hidrográficas, sobrepuestas a la cartográfica base, en ellas verifico el rumbo de la embarcación sobre el mapa de colores representación de las profundidades.

3.1.2.6 Procesamiento de datos batimétricos

3.1.2.6.1 Edición de datos desviados. Elementos subacuáticos dentro del embalse Bucaramanga, tales como la fauna y flora, además de objetos flotantes a diferentes profundidades, interfieren con las señales emitidas y datos recolectados por la ecosonda multihaz, estos objetos generan ruido en las capas de datos batimétricos capturadas (Líneas Batimétricas). haciendo necesario un proceso de edición que se realiza en el software PDS2000 medio del uso de filtros estadísticos automáticos.

Posterior a la edición estadística automática se llevó a cabo una edición manual de los datos batimétricos, trabajo que consistió en depurar y clasificar de manera manual los cuerpos extraños evidentes, los cuales continúan presentes luego de los filtros automáticos.

3.1.2.6.1 Corrección por fluctuación del embalse. La corrección por fluctuación del embalse Bucaramanga fue generada a partir de los datos de nivel del embalse durante los días de la realización de los levantamientos batimétricos. Ahora bien, este proceso se lleva a cabo con el fin de darle concordancia a la información en profundidad, porque, en consecuencia, si varía el nivel del embalse, varía también la profundidad de este.

3.1.2.6.2 Corrección por velocidad del sonido (Termoclina). Continuando con el procesamiento batimétrico, fue necesario la ejecución de la corrección por velocidad del sonido. Por lo tanto, esta corrección de termoclina se lleva a cabo debido a que la temperatura del agua cambia con la profundidad, afectando la densidad del fluido, la cual determina la velocidad a la que viaja la onda mecánica. De acuerdo con esta variable disminuye drásticamente la incertidumbre en los levantamientos batimétricos.

Para calcular la velocidad del sonido en función de la temperatura y la presión del agua, se empleó instrumentación capaz de reproducir el perfil de la velocidad del sonido en toda la columna de agua. El instrumento más común para esta práctica es el “Perfilador de Velocidad” (AML), del cual ya se habló anteriormente, y que consta de un sensor de presión para medir la profundidad, un transductor y un reflector a cierta distancia de separación. A consecuencia, la velocidad del sonido se calcula con la siguiente ecuación $c=2d/\Delta t$, donde Δt es el doble del tiempo de viaje de la señal

acústica entre el transductor y el reflector (similar a la medición de la profundidad realizada por las ecosondas).

En conclusión, este proceso tiene en cuenta la velocidad a la que viaja la onda de sonido a través de la columna de agua (termoclina).

A continuación, en campo el proceso de calcular la corrección por velocidad del sonido comenzó cuando el equipo “Perfilador de Velocidad” (AML), es sumergido en el cuerpo de agua desde el espejo hasta llegar al fondo o lecho, recopilando dato segundo a segundo de la presión de agua en el área de interés.

Posteriormente en el software de información geográfica PDS 2000, se ingresaron estos datos para ajustar las profundidades a la velocidad en que viajó el beam en el agua.

3.1.2.6.3 Estimación de la incertidumbre del modelo. Para los datos batimétricos levantados en el embalse del Bucaramanga, es necesario la estimación de la incertidumbre de la posición y la profundidad, bajo esta perspectiva se comparó la incertidumbre en distancia propuesta por la Normas de la Organización Hidrográfica (OHI) Internacional para los levantamientos Hidrográficos y la que presenta el equipo Multihaz, con la intención de estimar la validez del método utilizado en la realización de la batimetría del embalse de Bucaramanga.

Ahora bien, la OHI utiliza el método propuesto por la S-44 (OHI, 2008) usando datos fijos (a) y datos variables (b y d) para el cálculo de la incertidumbre total propagada de la posición y la profundidad (TPU-V) mediante la Ecuación 3:

$$TPU_v = \pm \sqrt{a^2 + (b * d)^2}$$

Ecuación 3

Donde para el tipo de levantamiento realizado según la orden 1ª, como lo establece las NORMAS DE LA OHI PARA LOS LEVANTAMIENTOS HIDROGRÁFICOS (S-44) (OHI, 2008), se han de considerar los siguientes valores:

TPU_v Incertidumbre total propagada de la posición y la profundidad

$a = 0,5$ (Porción de la incertidumbre que no varía con la profundidad)

$b = 0,013$ (Coeficiente que representa esa porción de la incertidumbre que varía con la profundidad)

$d = 82,77$ m (Profundidad máxima encontrada en el embalse de Bucaramanga).

Reemplazando los valores de las variables en la Ecuación 3, se estimó que la incertidumbre para el levantamiento Batimétrico realizado está dada por:

$$TPU_v = \pm \sqrt{0.52^2 + (0.013 * 82.77)^2}$$

$$TPU_v = 1,185 \text{ metros}$$

En este sentido, según la norma internacional S-44, el mínimo estándar de exactitud recomendado para el levantamiento batimétrico del embalse de Bucaramanga es 1,185 metros.

El error total para el ecosonda RESON 7125 de la empresa Batimetrías SAS es el resultado del escrutinio detallado de los procesos metrológicos involucrados en la medición de la profundidad con el sistema 7125.

El error total (et) está dado por la Ecuación 4:

$$et = \sqrt{ev^2 + eb^2 + ec^2} + ecd^2 + eo^2$$

Ecuación 4

En la Tabla 1 se observa la descripción de cada una de las variables de la ecuación y los valores adoptados para el cálculo del error total del equipo utilizado para la realización de la batimetría en el embalse de Bucaramanga.

Tabla 1.

Calculo de error total multibeam reson 7125 batimetrías SAS

Sigla	Valor	% de error total	Descripción
Ev	0,287	82,9	Error por velocidad del sonido
Eb	0,162	46,81	Error por balanceo
Ec	0,027	7,84	Error por cabeceo
Ecd	0,102	29,42	Error calado dinámico
Eo	0,011	3,17	Error compensación de oleaje fluctuación del embalse
Et	0,3412		Valor Total

De ahí, que al relacionar el error máximo permitido entre la norma S-44 el cual fue de 1,185 metros y el error en la captura de la batimetría para la ecosonda reson 7125 con un valor de 0,3412 m, cabe concluir que la batimetría capturada en este proyecto posee una precisión 3,42 veces más que el error máximo permitido para levantamiento hidrográficos de orden 1 a (OHI, 2008).

Se observó que los levantamientos batimétricos Multihaz realizados y los productos obtenidos en el embalse de Bucaramanga mejoran en gran medida la *TPU*, incertidumbre establecida por la Organización Hidrográfica Internacional OHI.

3.1.3 Definición del modelo Batimétrico para el embalse de Bucaramanga. Una vez realizadas las correcciones respectivas (Nivel y Termoclina), y posterior a la edición de puntos de ruido (Automática y Manual), de los puntos clasificados en la clase 5 (COMMISSION, 2002), superficie de Lecho, en el software PDS2000, se generó un “Grid” 1x1m en formato XYZ y ASC que representan el modelo batimétrico.

3.1.4 Cálculo de erosión y sedimentación. Con el propósito de cuantificar los procesos de erosión y sedimentación del embalse de Bucaramanga, es necesario definir cada uno de estos conceptos, entendiéndose por erosión, el proceso del transporte por viento, agua o hielo del suelo, de sedimentos o fragmentos de rocas producto de la meteorización. Por otro lado, la sedimentación ocurre cuando material erodado que ha sido trasladado por el agua, u otros medios antes mencionados, se distribuyen a lo largo de la columna de agua depositándose finalmente sobre la superficie, por un movimiento lento del medio por el cual es transportado (COMMISSION, 2002).

Para el presente estudio se realizaron cuatro procedimientos de comparación con los softwares Hypack, y ArcGis, para tal fin, y usando la información del levantamiento topográfico realizado en el año 2015 por CONALVIAS antes del llenado del embalse de Bucaramanga, la batimetría realizada en enero de 2017 y la actual (julio 2018) estas dos últimas realizadas por Batimetrías SAS. De ahí el proceso de cálculo realizado en ArcGis, consistió en subir las curvas de nivel sacadas del raster del modelo de elevación digital, empleando la herramienta de Topo to raster que posee este software, para posteriormente generar áreas por nivel de elevación, seguidamente se delimita el área de cálculo seleccionando la línea base, esta es pasada a polígono con la herramienta Feature to Polygon, finalmente usando 3D Analyst Tools> Functional Surface>

Surface Volumen, se obtuvo el volumen, y con un valor de densidad de los sedimento tomados de los estudios fase II y Fase III del proyecto de Regulación del Río Tona Embalse de Bucaramanga, se determinó el valor de la carga de sedimentos anualmente.

El peso específico de 1.45 Ton/m^3 , se consideró que no sufrió cambios notables en un periodo de 4 años que lleva en operación el embalse de Bucaramanga, ya que se demostró usando el método para la estimación de sedimentos depositados de E.W LANE Y V.A KOERZER (Geological Survey (U.S.). Office of Water Data Coordination, 1977) que la variación era menor es de menos del 0.53%.

Para esto se usó la siguiente ecuación:

$$W_T = W_1 * X_1 + (W_2 + K_2 * \text{Log } t) * X_2 + W_3 * X_3$$

Ecuación 5

Donde:

$W_T = \text{Peso específico del sedimento después de } t \text{ años en el embalse en } \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$

$W_1; W_2; W_3 = \text{Peso específico iniciales para la arena, limo y material grueso en } \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$

$X_1; X_2; X_3 = \text{Porcentaje de cada material en la muestra}$

$t = \text{Tiempo en años}$

3.2 Determinación de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo

Para obtener la pérdida de suelo " S_y " en (t/ha/año) fue necesario hallar los factores, Q' , q_p , K, LS, C y P para proceder posteriormente a aplicar la ecuación de MUSLE (Williams, 1975),

obteniéndose así el mapa con los valores de la tasa de pérdida de suelo. A continuación, se describe como se obtuvo cada uno de ellos:

3.2.1 El flujo máximo y el volumen de escorrentía. Con los datos de precipitación de las estaciones Pluviométricas contenidas dentro de la microcuenca y de la serie de caudales sobre el río Tona, que actualmente opera el **amb**, y sustrayendo de estas el caudal base, donde para esto se usó el método de flujo de la línea recta el cual consiste en dibujar una línea horizontal desde el punto donde en el cual inicia la escorrentía directa superficial hasta la intersección con el segmento de la recesión (Figura). Como mejora en algunos casos se usó una línea inclinada para conectar el punto de inicio de la escorrentía superficial con el punto en el segmento de recesión (Ven Te Chow, 1994).

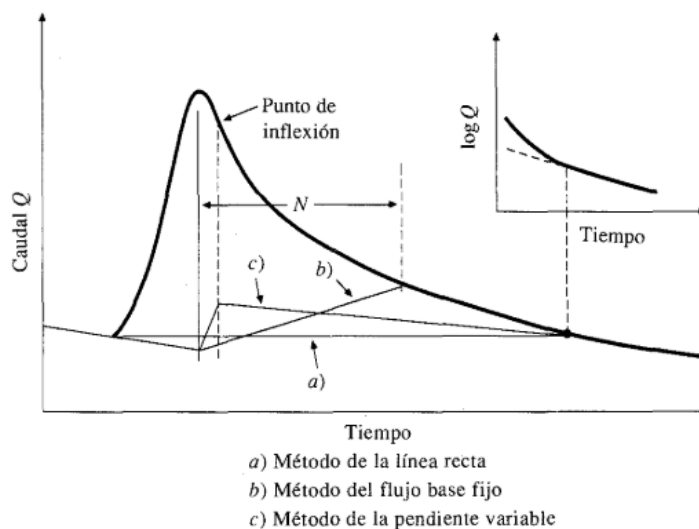


Figura 2. Técnica de separación de flujo base. (Ven Te Chow, 1994)

Así se alcanzó una estimación directa del volumen de escorrentía y de los caudales picos. Para esto, se trabajó con caudales promedio diario multianual para la estimación del rendimiento de sedimentos a escala anual.

En este orden de ideas y debido a que trabajar solo con un modelo de lluvia esorrentía generaría solo una lluvia asociada a un respectivo periodo de diseño y la MUSLE en su esencia estima el aporte de sedimentos para cada lluvia especifica en un periodo determinado, se llegarían entonces a valores que no representarían condiciones reales analizadas, por tal razón se parte de las series de caudales líquidos de tres estaciones limnimétricas ubicadas sobre la principales vertientes del río Tona, como lo son Armania, Golondrinas y Carrizal, por consiguiente se considera el caudal del río como la suma de esta estaciones.

En la Figura 3 se observan el comportamiento bimodal que tiene los caudales al encontrarnos en el trópico en la zona de convergencia intertropical.

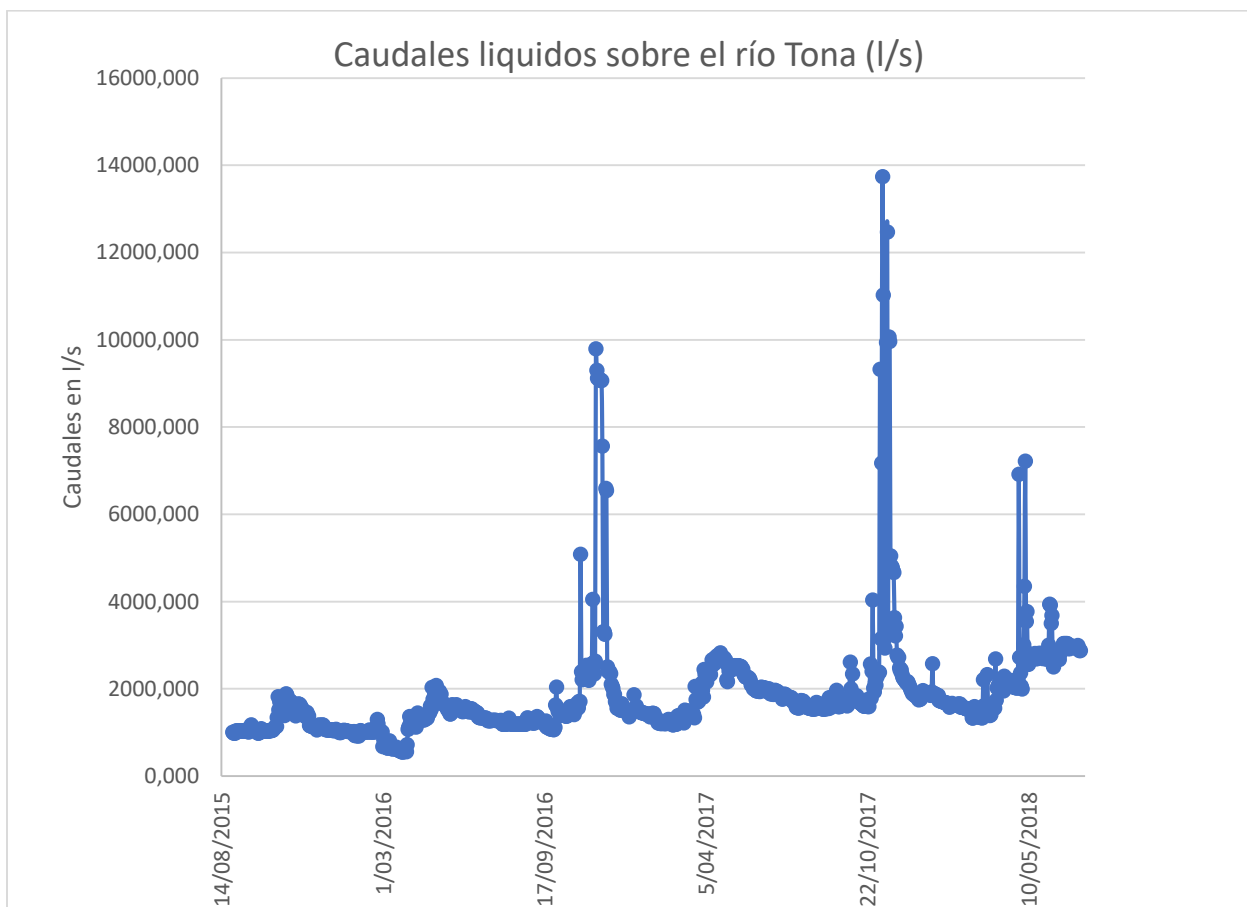


Figura 3. Caudales líquidos sobre el río Tona desde el 28-08-15 hasta el 13-07-18.

Para determinar los valores de Q' , q_p correspondientes al volumen de escorrentía en m^3 , y al caudal punta de la escorrentías generadas por las lluvias en la cuenca, se identificaron las lluvias que tuvieran un valor mayor a 20 mm/día y que produjeran un cambio significativo en el comportamiento del río, así se identificó el hidrógrama característico para posteriormente, proceder a descontar el caudal y el volumen generado por el caudal base y de esta forma obtener los valores de Q' , q_p , a utilizar en la ecuación de las MUSLE.

Se identificaron 20 eventos importantes, los cuales fueron analizados para su incorporación a la ecuación de pérdida del suelo en el periodo de 1051 días.

A continuación, el factor de escorrentía definido como $11,8*(Q'*q_s)^{0.56}$ (Morales, 2014), se calculó a partir de los 22 eventos identificados de la serie de caudales del río Tona. Posteriormente, con la sumatoria de todos los eventos, se estableció el efecto del total de los hidrogramas en el periodo analizado. Ahora bien, para hallar el raster del factor de escorrentía, fue necesario dividir el valor obtenido de la ecuación $11,8*(Q'*q_s)^{0.56}$, en el área de total la microcuenca y posteriormente multiplicarlo por el área definida de cada celda o pixel en el software ARGIS, para de esta forma hallar un valor unitario de factor de escorrentía. A partir del raster de dicho valor unitario y utilizando la función de acumulación de flujo de ARCGIS, la cual crea un raster de flujo acumulado para cada celda y tomando el factor unitario de escorrentía como factor de peso, se calculó finalmente el raster del factor de escorrentía que se multiplico por los demás factores que intervienen en la ecuación de la MUSLE para hallar el total de sedimentos al final del periodo analizado.

Con la finalidad de verificar la incidencia del factor de escorrentía, se realizó a su vez la estimación del régimen de caudales instantáneos siguiendo la metodología planteada en el trabajo de investigación *Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de*

montaña en Antioquia (Cataño Álvarez, 2015) para transformar los caudales medios diarios a caudales horarios y así determinar el caudal punta **qs**. Para ello se asumió un caudal base, a partir de la información de caudales medios diarios, según el signo de su variación, y se calculó el tiempo de concentración de la cuenca a partir de la pendiente y longitud de esta. Posteriormente se halló el hidrógrama según el método de la SCS para obtener de esta forma el caudal pico horario para una duración de evento de 24 horas. Posteriormente bajo este hidrograma se calculó el valor de **Q** que corresponde al volumen del hidrograma y el coeficiente de escorrentía para compararlo con el descrito con el obtenido con los caudales medios diarios.

3.2.2 Factor de erosionabilidad (K). Se halló utilizando los diagramas de Wischmeier y Smith por dos métodos, el primero de ellos es gráfico y el segundo mediante la ecuación planteada por la USLE. Este factor determina la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, relacionándose con la estabilidad estructural del mismo, y se calculó a partir del porcentaje de las distintas fracciones granulométricas, el porcentaje de materia orgánica, la estructura y la permeabilidad del perfil del suelo mediante la ecuación propuesta por la U.S.L.E. Para esto fue necesario, terminar el mapa de cubiertas vegetales a partir de una imagen satelital. Finalmente se usaron los datos del **K** hallados mediante la ecuación de la USLE para generar el raster de erosionabilidad para toda la microcuenca.

3.2.2.1 Mapa de cubiertas vegetales. Para este propósito, a partir de fotografías satelitales tipo RASTER y mediante el software ARGIS se estableció el tipo de cobertura vegetal de la microcuenca del río Tona. Bajo este lineamiento, se utilizó una imagen del satélite LANDSAT 8 (Figura), la cual se obtuvo de la página web de “*Science for a changing world*”

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Dicha imagen fue capturada el día 23 de diciembre del 2018 y evidencia el estado más cercano al actual. Cabe señalar también, que esta tiene una resolución de 15 metros en pancromático y de 30 metros en multiespectral.

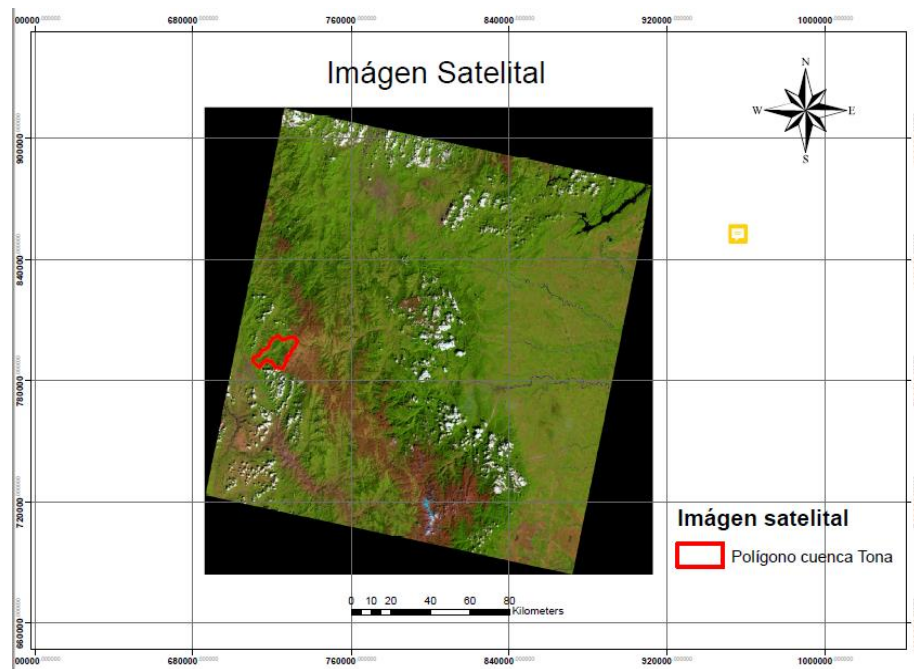


Figura 4. Imagen Satelital en el área de estudio

A continuación, para determinar las cubiertas vegetales por medio de la imagen satelital, se utilizó el índice diferencial de vegetación Normalizado (James Verdin, Diego Pedreros, 2003), basándose en la Ecuación 6:

$$NDVI = (IR - R)/(IR + R),$$

Ecuación 6

Donde:

NDVI: índice diferencial de vegetación Normalizado

IR: valores de píxel de la banda infrarroja

R = valores de píxel de la banda roja

A partir de los valores obtenidos del NDVI, los cuales pueden variar entre (-1) y el (+1), donde los valores positivos corresponden a zonas de vegetación y los valores negativos generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas (James Verdin, Diego Pedreros, 2003).

Retomando para nuestro caso, se usó una imagen satelital tipo Landsat 8, la cual está compuesta por 11 bandas espectrales, donde la banda 4 fue la utilizada para caracterizar el rojo visible (R) y la banda 5 para el infrarrojo cercano (IR).

Como resultado, este índice generó valores entre 0,615409 y -0,175106, los cuales representan las zonas con y sin vegetación (Tabla 2), asimismo para una mejor visualización se hizo una reclasificación, dándole tonalidades verdes y amarillas para resaltar la vegetación (Figura).

Tabla 2.

Valores generados por el raster NDVI y su significado.

Valores del NDVI	Representa
<0	Zona sin vegetación
0-0,2	Rocas y terrenos desnudos
0,2-0,35	Terrenos con arbustos y prados
0,35-1	Bosques de zonas templadas y tropicales

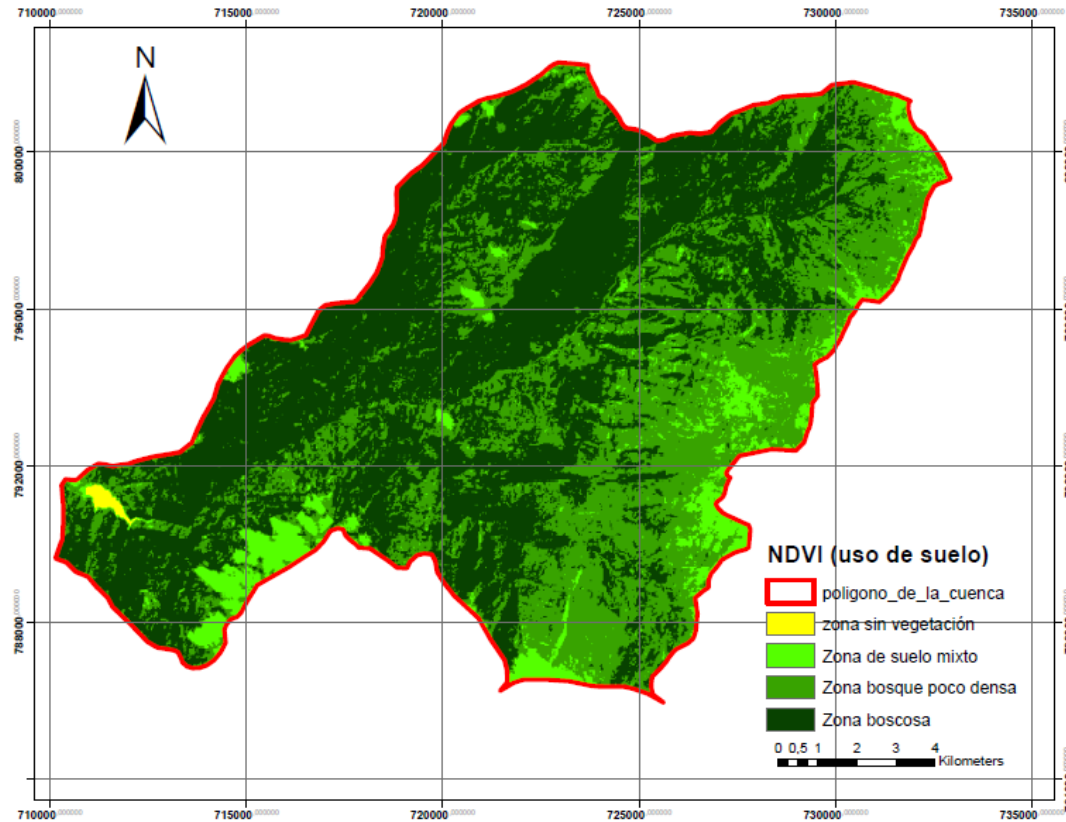


Figura 5. Mapa de cubiertas vegetales de la microcuenca del Río Tona.

3.2.2.1.1 Ubicación de parcelas a muestrear en campo. A partir del mapa de cubiertas vegetales y tomando como referencia un número determinado de puntos a muestrear, basados en investigaciones anteriores del k de erosionabilidad en el departamento de caldas (Ramírez-Ortiz, Hincapié-Gómez, & Sadeghian-Khalajabadi, 2009a), donde se tomaron 72 muestras representativas para un área de estudio de 888'380.000 m², se hizo una comparación respecto al área de estudio y de esta manera se determinó tomar 20 muestras representativas para un área de 194'727.024,01 m², posteriormente se ubicaron en función del tipo y del área de cada cubierta, con el propósito de generalizar los resultados a toda la cuenca: Por lo tanto, mediante el uso de un análisis estadístico (muestreo aleatorio simple), se calculó el número de parcelas representativas por cubierta y su ubicación para muestreo en campo (Tabla 3).

Ahora bien, para este propósito fue necesario convertir el Raster conseguido de la fotografía Satelital a formato shape, mediante el uso del software ArcGis, y a continuación se calculó el área de cada tipo de cobertura y el área total, y posteriormente se determinó el porcentaje de cada cobertura en la microcuenca y el número de muestras por cobertura, como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3.

Cantidad de muestras que se tomaron de cada cobertura.

Tipo de cobertura	Área [m2]	Porcentaje	Cantidad de muestras o parcelas
Zona sin vegetación	2'718.117,3	1%	1
Rocas y terrenos desnudos	20'460.745,8	11%	2
Terrenos con arbustos y prados	64'360.929,8	33%	7
Bosques de zonas templadas y tropicales	107'187.231,2	55%	10
total	194'727.024,1	100%	20

A continuación, para determinar la ubicación de los puntos de muestreo, se generó una malla virtual con 311.564 parcelas de dimensiones de 25 m x 25 m en toda la microcuenca con su respectivo indicador (FID) y coordenadas de su centroide, teniendo ya el número de muestras a seleccionar por tipo de cobertura vegetal (Tabla 3), ahora bien, se procedió a determinar en qué parcelas se debería realizar el muestreo para que resultará de forma representativa, esto se hizo utilizando la función de muestreo aleatorio simple por medio del software Excel. A continuación, en la Tabla 4 y en la Figura 6, se encuentran los puntos seleccionados para la toma de muestras en la microcuenca del río Tona.

Tabla 4.

Ubicación de los puntos de muestreo

Punto seleccionado	Coordenadas Planas		Elevación [msmn]
	X	Y	
Muestra #1	723669,40	786694,46	3403
Muestra #2	721861,04	787036,83	2746
Muestra #3	727031,43	792954,42	3353
Muestra #4	725407,85	789843,95	3085
Muestra #5	727544,62	798234,96	2396
Muestra #6	717504,95	793989,23	1518
Muestra #7	725220,17	793069,11	2839
Muestra #8	731370,79	799918,27	3491
Muestra #9	712786,36	790438,44	1107
Muestra #10	726859,64	789902,01	3407
Muestra #11	712216,73	789250,11	1232
Muestra #12	722314,52	791899,28	2215
Muestra #13	712869,80	788243,48	1560
Muestra #14	722440,65	800468,52	2238
Muestra #15	718828,36	794082,67	1558
Muestra #16	714761,10	792001,12	1272
Muestra #17	718975,80	798959,84	2121
Muestra #18	724487,081	786795,73	3336
Muestra #19	724090,67	794870,25	1864
Muestra #20	713885,12	791651,98	1381

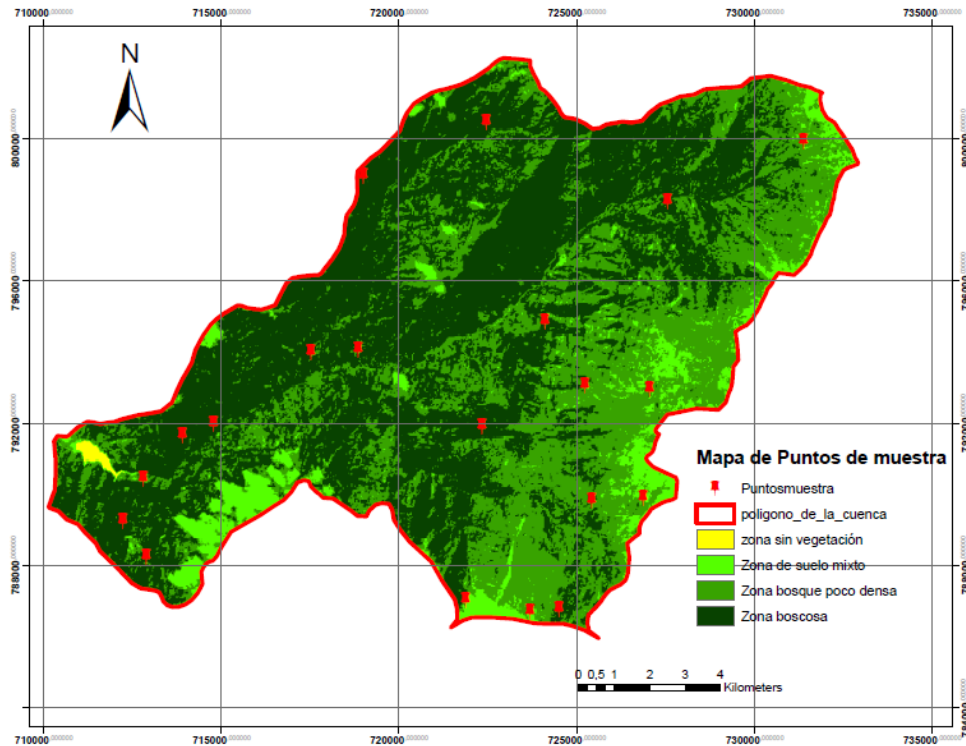


Figura 6. Ubicación geografía de los puntos de muestreo en la microcuenca del río Tona.

3.2.2.1.2 Toma de muestras en campo. Con los puntos de muestra ya definidos, a continuación, la ubicación en coordenadas planas fue llevada a un formato KML para de esta forma planear la ruta a los puntos donde se realizó el muestreo. Ya en sitio, la muestra de suelo fue tomada para su respectivo análisis en el laboratorio paralelamente también se adelantó la prueba de permeabilidad mediante el ensayo Lefranc somera de carga variable (COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, 2015) y el análisis de la estructura. Para tal efecto, el procedimiento ejecutado en campo fue el siguiente:

En todos los puntos de muestreo se retiró la capa de vegetación y se hizo limpieza de la zona después mediante una excavación con una profundidad de 35 centímetros se hizo el respectivo apique exploratorio.

El suelo removido fue guardado en bolsas que mantuvieran las condiciones originales del mismo, estas muestras se tomaron de aproximadamente un kilogramo de peso.

Posteriormente se realizó el análisis de la estructura de suelo de forma visual caracterizándolas según la MUSLE basándose en la Tabla 5.

A continuación, se realizó la prueba de permeabilidad, determinado el delta de altura (ΔH) el cual corresponde a la diferencia de alturas entre cada delta de tiempo (Δt), procurando que este se mantuviera inferior a 0,2 veces de la profundidad total (H) como se observa en la Figura 7

Para esto, fue necesario realizar la limpieza de la excavación, posteriormente introducir un tubo de 3" de PVC, que en su interior tenía una cinta métrica, para determinar el ΔH , acto seguido se ajustó el tubo a las paredes, con el propósito de evitar que, al introducir el agua, esta retornara a la superficie por la parte exterior del mismo. Después al tubo se le introdujo agua hasta la altura máxima, con un Δt determinado y se tomaron los respectivos ΔH .

Tabla 5.

Código de estructura del suelo de MUSLE (Escobar, 2008).

Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	Bloques	
	Laminar	
	Masiva	

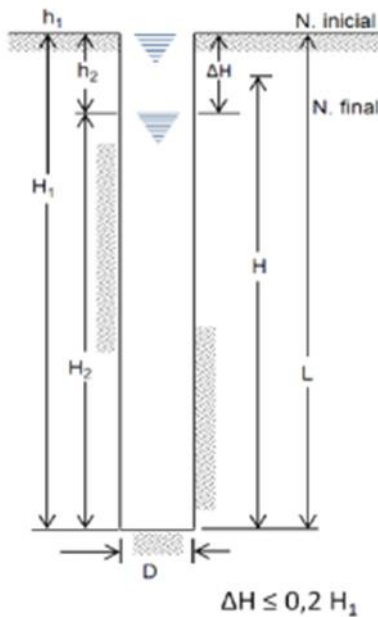


Figura 7. Esquema del ensayo de permeabilidad Lefranc somera de carga variable (Según la guía CFE 10000-73)

3.2.2.2 Análisis de la textura, estructura, el porcentaje de materia orgánica y permeabilidad.

3.2.2.2.1 Textura. Los ensayos de textura inicialmente fueron realizados por el Laboratorio Químico de Suelos de la Universidad Industrial de Santander, dichos resultados establecen los porcentajes de arenas totales, limos y arcillas; pero estos, no permitieron determinar el porcentaje de arenas muy finas, valor necesario para el cálculo de la constante K de erosionabilidad. A causa de ello, fue necesario realizar un segundo ensayo en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Civil de la misma Universidad.

Dado que las arenas finas según los parámetros del Departamento de Agronomía de los Estados Unidos son aquellas entre los tamices de tamaño 0,1 mm y 0,05mm, pero en los laboratorios de la

escuela antes citada, no se dispone de estos tamices, (los tamices más cercanos son de 0,16mm y 0,075 mm), por lo tanto y por la dificultad de obtener los tamices adecuados, procedimos a usar los tamices disponibles, cierto es que, esto generará una variación en los porcentajes reales.

En consecuencia, para determinar la textura, se utilizaron los datos hallados en los dos laboratorios, utilizando los valores de limos y arcillas del Laboratorio Químico de Suelos y las arenas y gravas del laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil.

3.2.2.2 Porcentaje de materia orgánica. A continuación, se procedió al cálculo del porcentaje de materia orgánica para cada una de las muestras de suelos. Ahora bien, para conocer la cantidad en porcentaje de la materia orgánica del suelo existen diferentes fórmulas en las cuales usan algunos elementos que están presentes en el suelo, como por ejemplo: el azufre (S), nitrógeno (N), carbono (C) y otros (Rivera, 1990).

Para este propósito, en esta ocasión se usó el método de Walkley y Black (dicromato de potasio) que analiza el carbono, principal componente de la materia orgánica, ya que el 58% de la materia orgánica es carbono, y mediante la siguiente ecuación que indica que, en 100 g de materia orgánica, hay 58 g de Carbono Orgánico se calculó la fracción de materia orgánica mediante la Ecuación 7:

$$\text{M.O. \%} = \%C * 1,724 \text{ (factor de Von Bemmelen) (Yarce \& Castillo, 2014).}$$

Ecuación 7

A partir de esto, las muestras tomadas se llevaron al laboratorio químico de suelos de la Universidad Industrial de Santander donde se hizo el análisis de textura y el cálculo del porcentaje de carbono, utilizado para obtener el porcentaje de materia orgánica.

A continuación, se presenta a modo de ejemplo el cálculo del porcentaje de materia orgánica (%MO), teniendo como referencia el porcentaje de carbono (%C) suministrado por el laboratorio, para la muestra # 2 (%C= 4,74)

$$\%MO = 1,72 * \%C$$

$$\%MO = 1,72 * 4,74$$

$$\%MO = 8,17$$

Según MUSLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4%.

3.2.2.2.3 Permeabilidad K. A partir de los datos de H, ΔH y tiempo Figura 7 tomados en el campo, se calculó el factor de forma (C) y la conductividad hidráulica (K), a partir de la Ecuación 8:

$$K = 2 * c * A * \frac{\Delta H}{\frac{t}{H}}$$

Ecuación 8

K: Conductividad hidráulica (cm/hora).

C: Factor de forma. (1/cm).

A: Área de la sección circular del barreno (cm²).

t: Tiempo del intervalo de observación (Horas).

H: Carga promedio de la columna de agua en cada observación (cm).

ΔH : Diferencia de carga de las columnas de agua inicial y final de cada observación (cm)

$$C = \frac{0,0366 * \text{Log}(L + \sqrt[2]{L^2 - D^2})}{L}$$

Ecuación 9

Donde:

L: Longitud de tramo de prueba en (cm)

D: Diámetro del tubo (cm)

A partir de los diferentes valores de K de cada muestra, se calculó el promedio de la conductividad hidráulica. Ahondado todavía un poco más, en la Tabla 6, está el cálculo de la conductividad hidráulica para la muestra # 2.

Tabla 6.

Calculo de la conductividad hidráulica

Muestra # 2							
Diámetro (cm)	A. Área (cm²)	Altura del agua (cm)	H. Altura media intervalo (cm)	ΔH. Diferencia de alturas (cm)	t. Tiempo (s)	c. Factor de forma (1/cm)	K. Conductividad Hidráulica (cm/hora)
7,62	45,6	35	34	1,4	20	0,0192	13,01
7,62	45,6	33,6	32,6	1,3	20	0,0198	12,99
7,62	45,6	32,3	31,3	1,1	20	0,0204	11,79
7,62	45,6	31,2	30,2	1,1	20	0,021	12,55
7,62	45,6	30,1	29,1	1	20	0,0216	12,16
K promedio							12,5

Ahora bien, en la MUSLE, se asignan seis valores o códigos diferentes de acuerdo a la permeabilidad de un suelo determinado tal como lo establece la Tabla 7.

A partir de lo anterior, para el ejemplo (muestra # 2), el tipo de permeabilidad del suelo definido es el correspondiente al código MUSLE número 2, con una categoría de permeabilidad de Moderada a Rápida.

Tabla 7.

Códigos USLE de permeabilidad del suelo

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12,7 cm/h)
2	Moderada a rápida (entre 6,3 y 12,7 cm/h)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm/h)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm/h)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm/h)
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm/h)

3.2.2.2.4 Estructura. Ahora bien, basándose en la Tabla 5 y en la observación en campo, se determinó la estructura del suelo para cada una de las parcelas, un ejemplo de esto es la muestra #2, que en síntesis tiene un tipo de estructura granular de media a gruesa con código igual a 3.

3.2.2.2.5 Aplicación del nomograma de erosionabilidad. Para calcular el índice de erosionabilidad se utilizó las características del suelo halladas anteriormente y con el monograma propuesto por WISCHMEIER Y SMITH (Wischmeier & Smith, 1978), se determinó el valor de K por dos métodos que se explicaran a continuación, esto para cada punto de muestreo.

Determinación del factor de erosionabilidad K por el método de la ecuación. Una vez realizado el análisis de textura y hallados los valores o códigos de materia orgánica, estructura y permeabilidad, se está en condiciones de calcular el factor K. Al respecto, se establece en MUSLE una ecuación para el factor de erosionabilidad en la forma:

$$K = \frac{[2,71 * 10^{-4} * (12 - MO) * M^{1,14} + 4,20 * (S - 2) + 3,23 * (P - 3)]}{100}$$

Ecuación 10

en donde MO corresponde al porcentaje de materia orgánica del suelo; S es el código de la estructura del suelo; P es el código de la permeabilidad; y M es un factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo. Ahora bien, en términos matemáticos:

$$M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) * (100 - \% \text{ arcilla}).$$

Ecuación 11

Determinación del factor de erosionabilidad K por el método gráfico. El método gráfico o nomograma de erosionabilidad es la manera más tradicional de estimar el factor K. A pesar de representar la misma ecuación del método anterior, es menos exacto, debido al sesgo visual en que puede incurrir el interesado. Para esto se emplean dos gráficos conectados, según el esquema presentado en la Figura 8. (Rivera, 1990)

La determinación gráfica del factor de erosionabilidad se efectúa proyectando siempre líneas rectas en el interior del nomograma. Se inició ingresando el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo. A partir de este valor, se proyectó una línea recta hasta interceptar la correspondiente curva representativa del porcentaje de arena del suelo en cuestión. Desde ese punto se proyectó verticalmente la línea hasta interceptar con la curva que representa el porcentaje de materia orgánica del suelo. Desde allí se continuó hacia la derecha, cruzando la primera aproximación del valor K, la cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura o permeabilidad. De esta manera, se ingresó al gráfico derecho, continuando la proyección realizada,

hasta que se intercepta la línea correspondiente al código de estructura del suelo en cuestión. Desde ese punto, se descendió por el gráfico hasta interceptar la línea que representa el código de permeabilidad adecuado al suelo en estudio. Finalmente, desde ese punto se trazó la línea recta hacia la izquierda del gráfico, hasta encontrar así el factor correspondiente de erosionabilidad del suelo (K).

Basándose en el procedimiento anterior, para la muestra número # 2, a continuación se describen los parámetros usados para el respectivo cálculo.

Textura: Franco Arenosa,

%Limos 22, %Arenas finas 14,3, entonces el %Limos más %Arenas finas es de 36,3,

% Arenas Gruesas 45% y % arcillas 13,7,

%MO: 8,172, todo %MO mayor a 4% se asume como 4,

Estructura: granular de media a gruesa, código 3,

Permeabilidad: 12,5 cm/h, código 2.

Utilizando los datos anteriores por medio de la ecuación se obtuvo un valor de $K = 0,22$ y por medio del monograma 0,18, por lo tanto para generar el raster se utilizó el valor calculado por medio de la ecuación. Es importante recalcar que se usó el método de la ecuación para hallar los valores de K utilizados para la interpolación a toda cuenca del valor de erosionabilidad y para el cálculo de la MUSLE.

3.2.2.2.6 Interpolación a toda la cuenta de valor de erosionabilidad. Con los datos de k para cada una de las parcelas y utilizando un SIG (Sistemas de Información Geográfica) y mediante el método de interpolación IDW (Inverse Distance, Weighted), el cual interpola una superficie de

RASTER a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada, se obtuvo el RASTER de erosionabilidad para toda la cuenca.

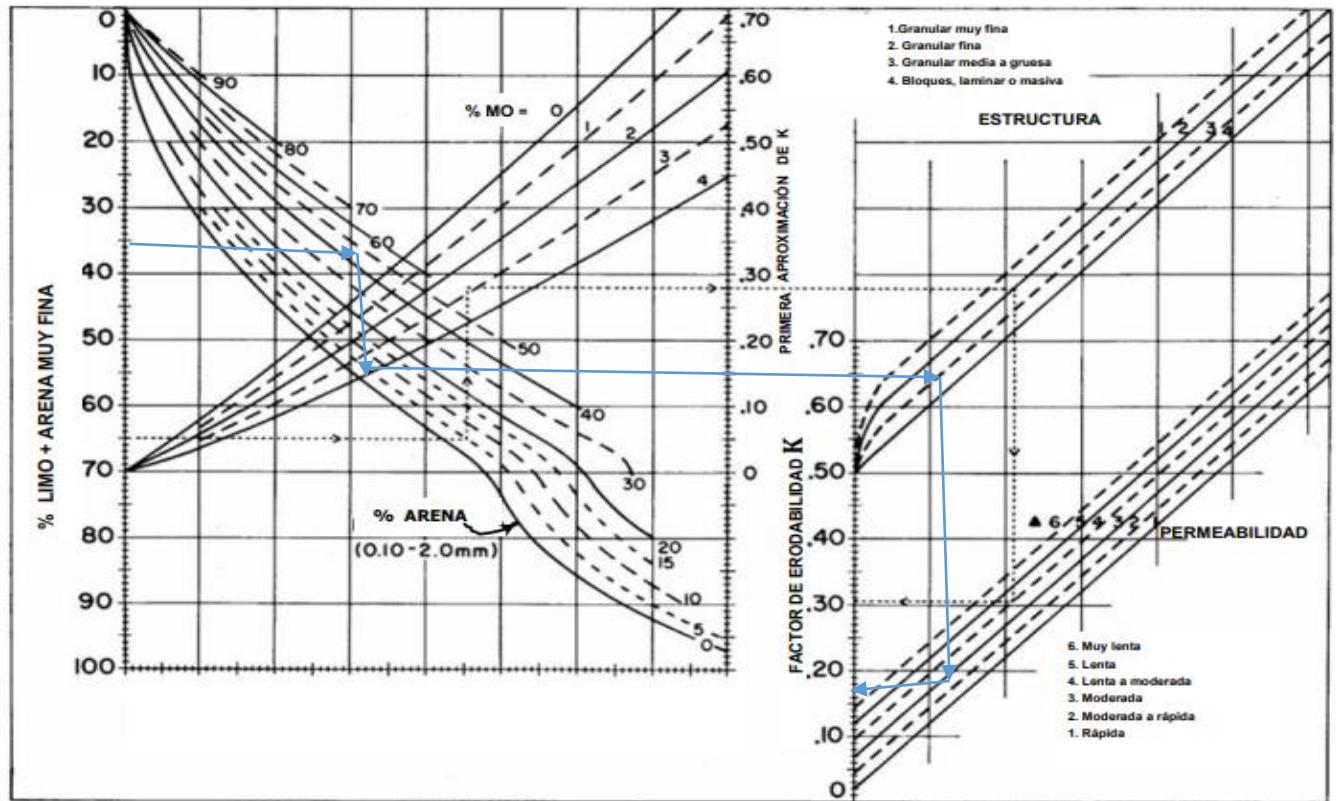


Figura 8. Gráfico o nomograma para la determinación de la erosionabilidad del suelo (adaptado desde Wischmeier y Smith, 1978).

3.2.3 Factor longitud de la ladera y el factor pendiente (L,S). Es la distancia horizontal desde el punto más alto, donde se origina el flujo superficial al punto más bajo donde comienza la deposición que fluye por escorrentía a un canal, mediante la ecuación usada por USLE/RUSLE (K.G Renard, 1997)

A partir del modelo digital de elevación generado de la imagen satelital y procesadas con la ayuda de un sistema de información geográfica (SIG) en nuestro caso Arc Gis, se elaboró el mapa

de pendientes en grados (formato Raster 30 m de resolución espacial), así como el mapa de la dirección y acumulación del flujo respectivamente.

Posteriormente se calculó el factor L, aplicando la metodología de Foster et al. (1977), modificada por Desmet & Govers (1996), que considera el área aportadora unitaria a la entrada de un píxel.

Donde L es igual a la Ecuación 12:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

Ecuación 12

Dónde: L = Factor de longitud de pendiente

λ = Longitud de la pendiente [m]

m = Exponente de la longitud de la pendiente

22,13 = Longitud de parcela unitaria RUSLE

Posteriormente para determinar “m” se utilizó la Ecuación 13 (Mitasova, Hofierka, Zlocha, & Iverson, 1996):

$$m = \frac{F}{1 + F}$$

Ecuación 13

Continuando con la ecuación anterior F con la Ecuación 14:

$$F = \frac{\frac{\sin \beta}{0.0896}}{3 * (\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Ecuación 14

β = Pendiente a nivel de pixel (rad)

Ahora bien, mediante el software ArcMap con Raster Calculator, se empleó la siguiente fórmula para obtener el factor β , pero antes fue necesario obtener el mapa de pendientes para así calcular el valor de β , necesario para llegar a valor de F de la siguiente expresión:

$$\text{Factor F} = ((\sin(\text{"Slope"} * 0,01745) / 0,0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"Slope"} * 0,01745) * 0,8) + 0,56)).$$

Ecuación 15

Posteriormente, obtenido el Factor F se procedió a obtener el factor “m” el cual es un parámetro necesario para calcular el Factor L, para ello se emplea la Ecuación 12, en “Raster Calculator” del software ArcMap.

$$\text{Factor m} = \text{"Factor_"} / (\text{"Factor_"} + 1) \text{ Hace referencia a la Ecuación 13}$$

Recapitulando, para obtener el cálculo del factor L con el área de drenaje aportadora, se procedió a realizar la dirección de flujo y acumulación del flujo con las herramientas Flow Direction y Flow Accumulation respectivamente del software ArcMap. A partir de estas dos imágenes se halló el Factor L en “Raster Calculator” empleando la Ecuación 16 y formula Desmet & Govers (1996) citado por (Shi, Cai, Ding, Wang, & Chow, 2003).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - A_{i,j}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * 22,13^m}$$

Ecuación 16

Donde:

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

D = es el tamaño del pixel.

x = es el factor de corrección de forma. Se parte de valor de X=1 por tratarse de un pixel cuadrado.

Como resultado se obtuvo un ráster del Factor “L”.

Aún falta calcular el factor S, para esto, aplicando la condición propuesta por la metodología de (McCool, Foster, Mutchler, & Meyer, 1989), que compara la pendiente de cada pixel con la pendiente unitaria de valor 9% mediante la Ecuación 17 y Ecuación 18 .

$$S_{i,j} = 10,8 * \sin \beta + 0,03, \quad \text{si } \tan \beta_{i,j} < 0,09$$

Ecuación 17

$$S_{i,j} = 16,8 * \sin - 0,5, \quad \text{si } \tan \beta_{i,j} \geq 0,09$$

Ecuación 18

Donde.

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

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

Una vez obtenidos todos los factores anteriores procedió a calcular el factor LS que es objeto de la presente metodología. Para ello se utilizó la Ecuación 19.

$$\text{Factor LS} = \text{“Factor_L”} * \text{“Factor_S”}.$$

Ecuación 19

3.2.4 Factor de cultivo y de ordenación. Para determinar el factor de cultivo y de ordenación del suelo, se recurrió al uso de tablas empleando la metodología propuesta por WISCHMEIER Y SMITH (Wischmeier & Smith, 1978), en nuestro caso la *Tabla 8* (Suarez, 2001), donde a partir

de la cobertura del suelo y del porcentaje de mismo en el área de estudio, se calcularon los respectivos valores de los coeficientes de C.

Tabla 8.

Valores de C para cobertura Vegetal

Tipo de altura y cobertura	Coeficiente C					
	Porcentaje de cubrimiento del suelo %					
	0	20	40	60	80	95-100
Cobertura de pastos bajos	0,45	0,2	0,1	0,42	0,013	0,003
Cobertura de pastos y hierbas	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
Arbustos de 2 metros	0,4	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
Arbustos	0,42	0,19	0,1	0,041	0,013	0,003

Con la imagen satelital se delimitaron las coberturas del suelo y a estos usos se les asignó un valor para el factor C, empleando la metodología propuesta por WISCHMEIER Y SMITH (1978). Se hizo a su vez la verificación en campo de las parcelas de la muestra representativa con la finalidad de validar la cobertura en sitio. Posteriormente el mapa de cobertura fue convertido a formato raster de 100 m de resolución mediante Arcgis.

3.2.5 Factor prácticas de conservación del suelo P. El factor P es la relación de pérdida de suelo entre una parcela donde se han aplicado prácticas mecánicas de conservación de suelos (contornos, terrazas, cultivos en fajas, etc) para el control de la erosión, y las pérdidas producidas en una parcela sin tales prácticas y además la labranza se efectúa en el sentido de la pendiente.

En este orden de ideas, se determinó a continuación los valores del factor P, a través de la Tabla 9, donde a partir del porcentaje de la pendiente del terreno y del tipo de conservación del suelo (Wischmeier & Smith, 1978), nos condujo al valor de P a utilizar.

Tabla 9.

Factor P de prácticas de conservación

Pendiente %	Cultivo a Nivel	Cultivo en fajas	Terrazas
Factor P			
1-2	1	0,3	0,12
3-8	0,5	0,25	0,1
9-12	0,6	0,3	0,12
13-16	0,7	0,35	0,14
17-20	0,8	0,4	0,16
21-25	0,9	0,45	0,18

(Adaptado desde las Tablas 13 a 15 del manual USLE, Wischmeier y Smith, 1978)

3.2 Rendimiento de los sedimentos

Para cálculo del rendimiento de los sedimentos teóricamente a través de la MUSLE, fue necesario realizar la multiplicación de los diferentes Raster generados en los procedimientos descritos anteriormente de cada una de las variables que interviene en la ecuación.

Con los mapas de los factores de $11,8 \cdot (Q \cdot q_s)^{0.56}$, K, LS, P y C en formato raster de 100 m de resolución; se procedió a continuación, a aplicar la ecuación MUSLE, mediante la multiplicación de cada uno de estos parámetros, obteniendo así el valor de aporte de sedimentos por celda o pixel. Posteriormente fue necesario la acumulación de cada uno de los pixeles que conforman el Raster obtenido, para hallar el rendimiento en toneladas para cualquier punto de la microcuenca en el intervalo de tiempo definido, el cual fue, desde el inicio del llenado del embalse hasta la última batimetría realizada, ahora bien, estos resultados se pueden visualizar en el respectivo mapa de valores de pérdida de suelo "Sy".

3.3 Ajuste del Modelo

Debido a las diferencias que se encontraran de los valores cuantificables (Volumen de sedimentos medidos en embalse de Bucaramanga mediante las campañas de Batimetría) y los estimados, (mediante la ecuación MUSLE) se realizó el proceso de verificación mediante el ajuste de la potencia o el coeficiente del modelo.

Se tomó como punto de ajuste el rendimiento total de sedimentos al final del periodo analizado.

4. Resultados y Discusión

4.1 Sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga.

A continuación, se presentan las relaciones de cambio entre volúmenes y peso para los periodos comprendidos entre el 28 de agosto de 2015 cuando el embalse inicio el llenado mediante el cierre de la compuerta del túnel de desvío y el 13 de junio del 2018, fecha de ejecución de la batimetría utilizada en el estudio, lo que corresponde a un periodo de 1050 días o 2.88 años.

Bajo esta perspectiva, el volumen de sedimento debe corresponder a la suma parcial de los cambios volumétricos 2015-2017 (entre la topografía antes del llenado y la primera batimetría) más 2017-2018 (entre las dos batimetrías) con la aclaración que para el periodo comprendido entre 2015-2017 las tecnologías son disimiles al pasar de topografía tradicional a multihaz. En la

Tabla **10** es evidente que con la topografía y las batimetrías realizadas se calculó el volumen relacionado a una cota especifica de referencia, y a continuación restando el volumen con la referencia (Volumen antes del llenado del embalse), y esto nos conduce a obtener el valor del volumen de sedimento el un respectivo periodo.

En este orden de ideas, la diferencia volumétrica en la cota 883.00 msnm (Nivel de referencia del sistema Multihaz) entre 2015 y 2017, corresponde a un valor de 0.78 hm^3 más la diferencia entre 2017 y 2018, que alcanza un valor de $0,08 \text{ hm}^3$, se aclara en este punto la diferencia significativa inter anual entre el 2015 y 2017 de $0,78 \text{ hm}^3$ en comparación de la que se obtiene

bajo la misma tecnología multihaz 2017 y 2018 de $0,08 \text{ hm}^3$. La diferencia total entre el periodo comprendido entre el 28 de agosto de 2015 y el 13 de julio de 2018 fue de $0,78 \text{ hm}^3 + 0,08 \text{ hm}^3$ obteniendo un cambio en el volumen de $0,86 \text{ hm}^3$ con un valor anual de sedimentos de $0,3 \text{ hm}^3$ según la

Tabla 10, basándose en dividir dicho volumen, en el número de años transcurridos desde el llenado del embalse hasta la batimetría actual.

A continuación, y con el peso específico de $1,45 \text{ t/m}^3$ hallado en los estudios realizados en fase 2 y fase 3 del proyecto de Regulación de Río Tona, Embalse de Bucaramanga (Integral Ingenieros Constructores, 2012), se calculó la cantidad de sedimentos en peso que hasta la realización de la segunda batimetría se encuentran dentro del embalse de Bucaramanga con un valor de $1'247.000 \text{ ton}$ y 433.481 ton/año , tal como se observa en la

Tabla 11.

Tabla 10.

Volumen de Sedimentos depositados en el embalse de Bucaramanga

NIVEL PARA CALCULO EN EL EMBALSE (msnm)	Volumen Embalse 2015 (Hm^3)	Volumen Embalse 2017 (Hm^3)	Volumen Embalse 2018 (Hm^3)	Volumen Sedimentos 2015-2017 (Hm^3)	Volumen Sedimentos 2017-2018 (Hm^3)
Nivel compuerta más baja	836,5	2,52	1,99	1,85	0,53
Nivel mínimo de operación	841	3,18	2,6	2,45	0,58
Nivel de referencia de la batimetría	883	15,96	15,18	15,1	0,78

NIVEL PARA CALCULO EN EL EMBALSE (msnm)	EL	Total Vol. Sedimentos (Hm3)	Vol. Sedimentos Anual (Hm3)
Nivel compuerta más baja	836,5	0,67	0,23
Nivel mínimo de operación	841	0,73	0,25
Nivel de referencia de la batimetría	883	0,86	0,3

Tabla 11.

*Cantidad de sedimentos**depositados en el embalse de Bucaramanga*

NIVEL PARA CALCULO EN EL EMBALSE (msnm)	EL	Peso 2015-2017 (ton)	Peso 2017-2018 (ton)	Total Periodo (ton)	Anual (ton)
Nivel compuerta más baja	836,5	768.500	203.000	971.500	337.711,90
Nivel mínimo de operación	841	841.000	217.500	1'058.500	367.954,76
Nivel de referencia de la batimetría	883	1'131.000	116.000	1'247.000	433.480,95

Como las batimetrías realizadas solo llegaron a la cota 883 msnm ya que era la cota de referencia del sensor multihaz, por consiguiente, fue necesario adelantar topografía mediante el uso de GPS como se indicó en el apartado de la metodología y así compararla con la topografía realizada en el 2015, sin embargo, cabe recalcar que en la batimetría de 2017 no se realizó este levantamiento por lo tanto la comparación de los volúmenes solo pudo realizarse entre los años 2015-2018.

Se realizó la cuantificación neta de la pérdida de volumen en la cola del embalse, pero empleando los datos de ganancia de material (sedimentación) y pérdida del mismo (erosión). La diferencia entre pérdida y ganancia del material indicó el volumen neto que cambio en este sector del embalse en sus sedimentos en el tiempo, como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12.

Calculo de sedimentos en el sector de la cola del embalse modelos 2015/2018

Sedimentación (Hm3)	Erosión (Hm3)
0,062	0,005
Total volumen de sedimentos (Hm3)	0,057
Volumen de los sedimentos año (Hm3)	0,02
Peso Total de los sedimentos (ton)	81925,261
Peso de los sedimentos año (ton)	28.478,78

En conclusión, el total de sedimentos por año o rendimiento es la suma de los sedimentos depositados en la cola de embalse más los medidos por debajo de la cota 883,0 msnm, para un total de 0,32 Hm³/año y 461.960 Ton /año.

4.2 Análisis de las variables que componen la ecuación modificada de pérdida del suelo MUSLE.

4.2.1 Cálculo de los parámetros Q' y qp. También llamado factor de escorrentía, para su cálculo fue necesario trabajar con la serie de caudales líquidos aforado en las estaciones de Arnanía, Golondinas y Carrizal en el periodo analizado, tal como se describió en la metodología para caudales diarios y como se puede observar en el Apéndice

. Ahora bien, se obtuvo un valor acumulado de la expresión $11,8 \cdot (Q' \cdot q_s)^{0,56}$, de 755.288,86 ha*J*cm/t*m²*h y tomando el área de la microcuenca de 194.785.833,32 m² y área por pixel de 100.000 m², para calcular así el valor unitario del factor escorrentía es cual fue de 38,72.

Calculando el valor de escorrentía tomando los caudales máximos horarios extraídos de los caudales medios diarios, se llegó a un valor acumulado del factor de escorrentía de 3.93E+16

$\text{ha} \cdot \text{J} \cdot \text{cm} / \text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$, el cual corresponde a 16 unidades logarítmicas más que el calculado con caudales promedio diarios, por lo tanto, se descartó los resultados obtenidos por este método.

4.2.2 Cálculo de factor de Erosionabilidad (K). Para hallar los valores de Erosionabilidad (K), se utilizó la metodología del nomograma propuesta por WISCHMEIER Y SMITH (1978), que se basa en 4 componentes: estructura, permeabilidad, textura y porcentaje de materia orgánica (Apéndice B); estos componentes se obtuvieron después de muestrear las 20 parcelas en función de la cobertura del suelo. Con estos valores se procedió a calcular el valor de erosionabilidad para toda la microcuenca mediante interpolación.

En la Figura 9 y en la Figura 10, se observa que los valores de erosionabilidad para la microcuenca del río Tona, oscilan entre 0,04 y 0,32 $\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{J} \cdot \text{cm}$, clasificados como bajos según la Tabla 13.

Valores similares de erodabilidad fueron encontrados por Cenicafe (Ramírez-Ortiz, Hincapié-Gómez, & Sadeghian-Khalajabadi, 2009b) en suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas.

Tabla 13.

Calificación de la erodabilidad, propuesto para la zona cafetera colombiana.

Código	Erodabilidad ($\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} / (\text{J} \cdot \text{h} \cdot \text{cm})$)	Calificación
	menor a 0,1	Natural
1	0,1 a 0,2	Muy bajo
2	0,2 a 0,4	Bajo
3	0,4 a 0,6	Moderado
4	0,6 a 0,8	Alto
5	0,8 a 1	Muy Alto
6	1 a 1,5	Severo
7	Mayor a 1,5	Extremadamente severo

Los valores más bajos de erosionabilidad corresponden a suelos de textura Arenosa (hasta 0,08), los valores medios a suelos de textura Arena Franco (hasta 0,12) y los valores más altos suelos de textura franco arenosa (hasta 0,32); aunque este valor está estrechamente relacionado con la materia orgánica, por lo cual se presentan algunas excepciones en función al mayor o menor contenido de la misma, ya que este determinaría el valor de K por tratarse de suelos homogéneos en toda la microcuenca según las muestras recolectadas.

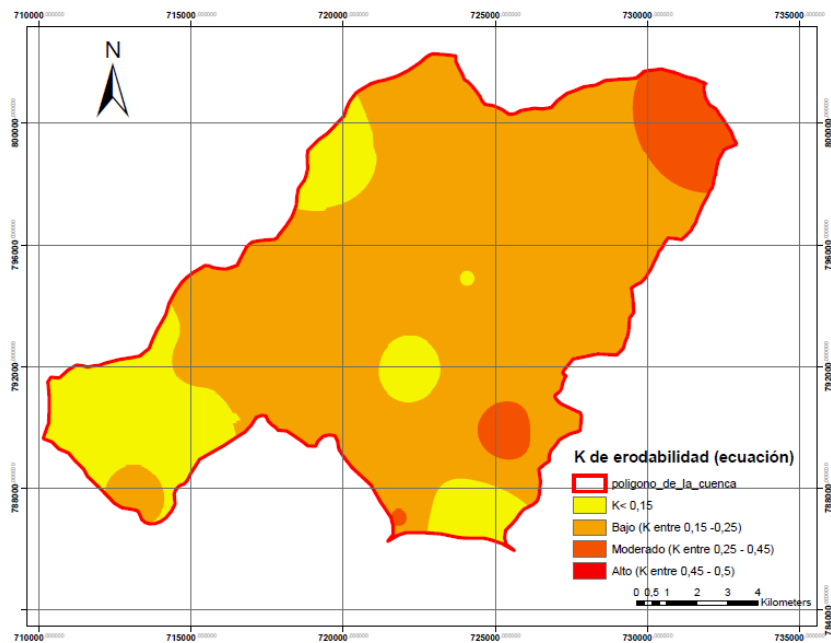


Figura 9.

Interpolación del K de erosionabilidad en la microcuenca del Río Tona con el método de la ecuación.

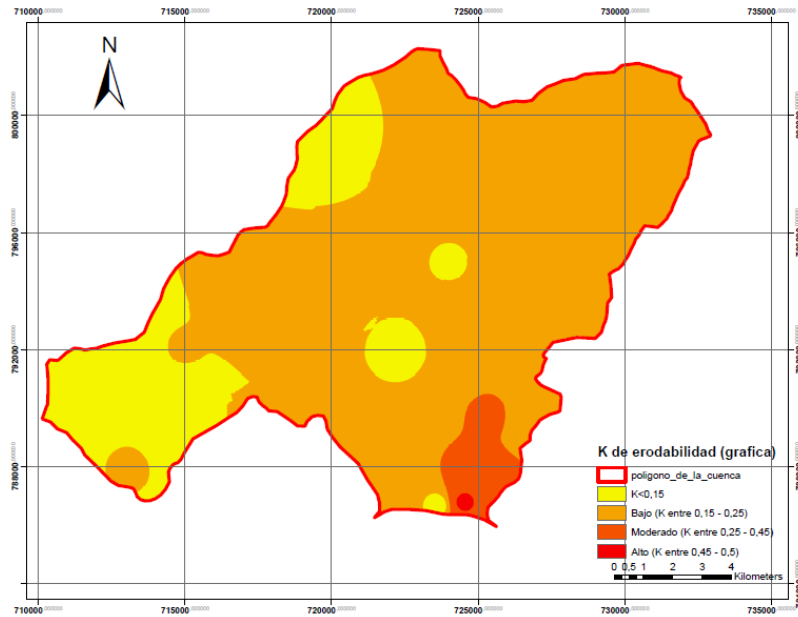


Figura 10. Interpolación del K de erosionabilidad en la microcuenca del Río Tona con el método del nomograma.

En el caso de los suelos franco - arenosos, el valor del índice de erosionabilidad tiene un amplio rango desde 0,04 hasta 0,32, debido a que dichos suelos permiten el paso del agua a través del perfil y por lo tanto el escurrimiento es también menor, pero como lo enunciamos anteriormente el índice varía en función de la materia orgánica que representa la usencia o presencia de cobertura vegetal que influirá en los procesos erosivos.

Ahora bien, en la *Tabla 14*, están los rangos de erosionabilidad según la textura de suelo encontrada en los diferentes sitios de muestreo, comparados con los grados de susceptibilidad definidos por la Soil and Water Corservation Society (Berón De La Puente, Gil, & Zapperi, 2017).

Tabla 14.

Valores de K según la textura del suelo para la microcuenca del río Tona.

Textura	K_{mín} .	K_{máx} x	Grado	Motivo
Arenoso	0	0,08	Bajo ($0,05 < k < 0,15$)	Escaso Esguerrimiento
Areno Franco	0,12	0,12	Bajo ($0,05 < k < 0,15$)	Moderada susceptibilidad al esguerrimiento
Franco Arenoso	0,04	0,32	Moderado ($0,25 < k < 0,45$)	Moderada susceptibilidad al esguerrimiento
Franco arcillo arenoso	0,16	0,24	Bajo ($0,15 < k < 0,25$)	Escaso Esguerrimiento

En la Tabla 15, se presenta el análisis de correlación lineal simple entre el factor K y las propiedades del suelo evaluadas para la microcuenca del río Tona. Tal como lo reportan Wischmeier y Smith (Wischmeier & Smith, 1978) y Nearing et al. (Nearing, Page, Simanton, & Lane, 1989), se encontró relación entre la erodabilidad y las propiedades del suelo tales como el contenido de Materia orgánica MO, contenido de arenas, entre otros. Aunque en este caso no existió alta correlación con la MO, seguramente porque el rango de dichas propiedades no es muy amplio, por la complejidad de estas y por el limitado número de muestras tomadas; también se encontró una tendencia negativa entre la erodabilidad con la conductividad Hidráulica y el contenido de Arenas Gruesa (Ar).

Se ha demostrado que el contenido de MO influye en otras variables tales como la agregación de partículas de suelo y estabilidad de estos agregados, lo cual favorece además la resistencia del suelo a la erosión; la relación inversa entre la conductividad hidráulica y la erodabilidad indican que la estructura subsuperficial juega un papel importante, ya que ésta determina el movimiento de agua en el perfil del suelo (Ramírez-Ortiz et al., 2009b).

Tabla 15.

Coefficientes de correlación de Pearson entre la erodabilidad y algunas propiedades del suelo.

	K	%MO	%Arenas G	%Arenas MF	%Limo	%Arcilla
%MO	0,20					
%Arenas G	-0,60	-0,22				
%Arenas MF	0,57	0,33	-0,74			
%Limo	0,66	0,42	-0,77	0,41		
%Arcilla	0,13	-0,22	-0,72	0,25	0,31	
Conductividad hidráulica (K)	-0,53	-0,22	0,79	-0,34	-0,77	-0,77

4.2.3 Cálculo del factor de Longitud y pendiente LS. El factor LS se calculó aplicando las ecuaciones usadas en RUSLE (K.G Renard, 1997), teniendo como punto de partida el DEM RASTER de 30 m de resolución al igual que en el método anterior y el ángulo de inclinación del terreno como se expuso en la metodología.

Se aprecia en la Figura 12 que los valores de LS según este método varían entre 0,03 – 71,0, los valores más altos se encuentran en las zonas de mayor longitud y pendiente, ya que mientras mayor sea la longitud, mayor será el recorrido de una gota de lluvia hasta llegar al punto donde se concentra el flujo junto al suelo desprendido; lo mismo sucede con la pendiente ya que, la pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con pendientes muy escarpadas en comparación con el incremento en longitud de la pendiente (Del Aguila, 2007).

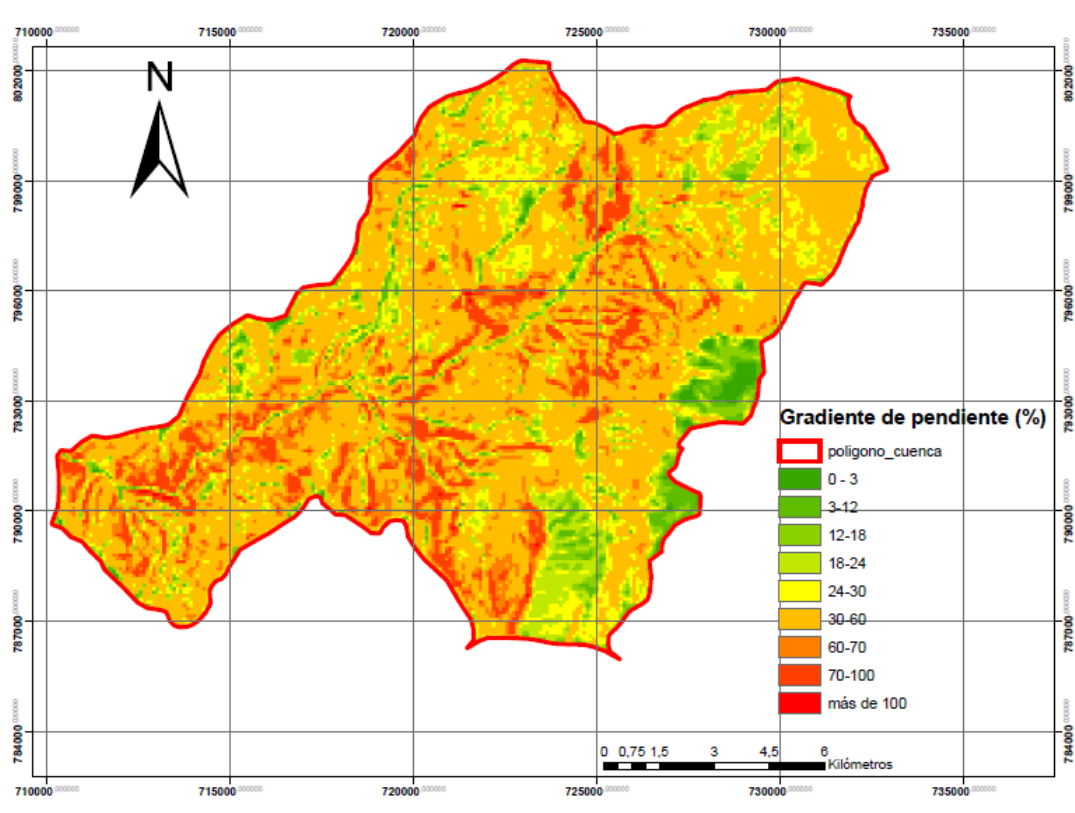


Figura 11. Mapa de gradiente de pendiente para la microcuenca del río Tona.

En la Figura 11, se observa que la microcuenca del río Tona, es de alta pendiente donde predominan las tonalidades rojizas a anaranjadas para pendientes mayores al 30%.

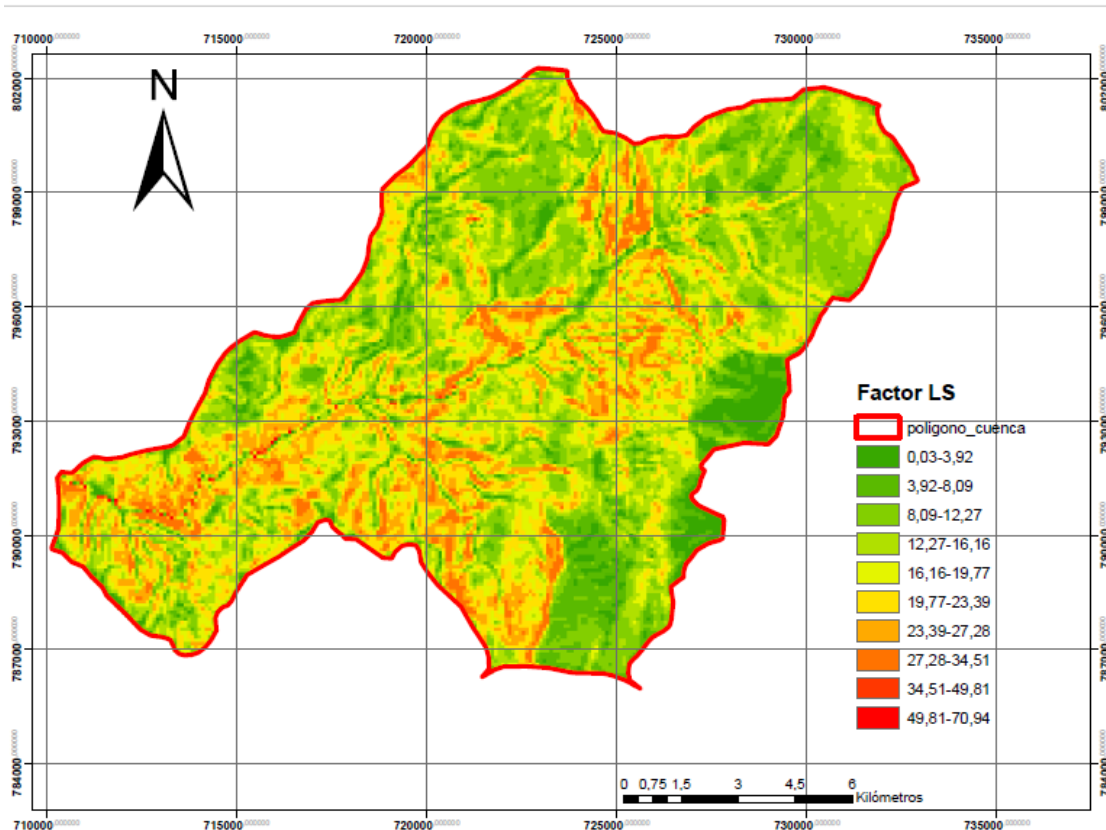


Figura 12. Mapa del factor LS para la microcuenca del río Tona.

4.2.4 Cálculo del factor de conservación y cultivo C. Continuando con el cálculo de los diferentes factores que conforman la ecuación de la MUSLE, y con la ayuda de *Tabla 8*, y de la cobertura del suelo, nos conduce a los siguientes valores de la *Tabla 16*, donde el 12% de la microcuenca no aporta ningún tipo de protección a suelo por lo tanto su toma un valor máximo de 1, y el porcentaje restante se encuentra entre .0,053 y 0,13.

Es necesario precisar que estos valores se obtienen tabulando y no a través de ecuaciones, además los valores fueron calculados en su mayoría para usos agrícolas y no forestales. Además, el uso de la fotografía satelital no permite hallar diferentes parámetros que se requieren para precisar los valores como son la talla de los árboles o arbustos, porcentaje de cobertura de la hojarasca, tipos de cultivos, cobertura arbórea, grado de intervención antrópica, altura media de

caída de las gotas al suelo entre otras variables citadas en manual USLE, Wischmeier y Smith, 1978.(Wischmeier & Smith, 1978) o en “Guía para la predicción de erosión laminar y concentrada en terrenos forestales”, por parte de Dissmeyer y Foster (Escobar, 2008). Por consiguiente, existe un sesgo entre el valor de P desde 0,13 hasta 1, donde con la información disponible en la microcuenca y por lo expuesto anteriormente no se puede tener mayor precisión. Por tal motivo este factor influye en la exactitud del modelo de cálculo del rendimiento de sedimentos.

Tabla 16.

Valores del factor C para la microcuenca del río Tona.

Tipo de cobertura	Área [m2]	Porcentaje	Cantidad de muestras o parcelas	Coefficiente C
Zona sin vegetación	2718117	1%	1	1
Rocas y terrenos desnudos	20460746	11%	2	1
Terrenos con arbustos y prados	64360930	33%	7	0,13
Bosques de zonas templadas y tropicales	107187231	55%	10	0,053
Total	194'727.024,1	100%	20	

4.2.5 Cálculo del factor prácticas de conservación P. Ahora bien, continuando con el cálculo de los factores que componen la ecuación de la MUSLE en *Tabla 9*, se aprecia que existe una relación directa del factor P con la pendiente y para la práctica de conservación del suelo cultivando siguiendo las curvas de nivel para pendientes mayores a 21% tendríamos un valor de 0,9. En este orden de ideas más del 90% de la microcuenca supera este rango de pendiente y la única alternativa de preservación que podría utilizarse dado la falta de tecnificación y desarrollo agrícola sería esta, por lo tanto, deberían tomarse valores muy cercanos a la unidad.

Conjuntamente también los suelos de aptitud forestal son el recurso más sobresaliente en la microcuenca y también es el menos explotado, y que la mayoría de las acciones se centran en las actividades agropecuarias, las cuales generan en ocasiones procesos de erosión moderada y la pérdida de fertilidad de la misma; a su vez estas actividades están compuestas por cultivos transitorios en la microcuenca y solo representan el 4% del área Total (Cdmb, 2006).

Bajo esta perspectiva cuando las prácticas de conservación no se aplican o son muy pocas el valor de P es igual a 1 (Rivera, 1990). Bajo esta perspectiva, se asumió un valor del factor P igual a 1 para toda la microcuenca.

4.2.6 Cálculo de los sedimentos aportados por la cuenca del río Tona y ajuste de la ecuación. Para la cuenca del río Tona, fue posible obtener los siguientes valores de aportes de sedimentos acumulados en el tiempo, hallados mediante la aplicación de la ecuación MUSLE, obteniendo un valor máximo de 2.747.470,00 ton, lo que corresponde a un rendimiento de 141,05 ton/ha y 50,62 ton/(ha*año) (

Tabla 17).

Ahora bien. Comparado con los valores referencia de la FAO (FAO, 1993), se pudo calificar la cuenca como riesgo de erosión alto.

Tabla 17.

Rendimiento de los sedimentos acumulados

Fecha (dd/mm/aa)	Sy Teórico (Ton)	Rendimiento (Ton/ha)	Rendimiento (Ton/ha*año)
28/08/2015	0,00	0,00	
1/11/2015	9918,68	0,51	2,86
14/11/2015	31881,40	1,64	7,67
1/12/2015	36840,80	1,89	7,26
24/05/2016	88559,50	4,55	6,15
6/10/2016	107688,00	5,53	4,98

Fecha (dd/mm/aa)	Sy Teórico (Ton)	Rendimiento (Ton/ha)	Rendimiento (Ton/ha*año)
3/11/2016	212543,00	10,91	9,20
14/11/2016	215376,00	11,06	9,09
6/12/2016	1042170,00	53,50	41,90
8/1/2017	1050670,00	53,94	39,46
2/5/2017	1193780,00	61,29	36,49
8/10/2017	1232750,00	63,29	29,92
31/10/2017	1318470,00	67,69	31,08
25/11/2017	2347170,00	120,50	53,64
13/01/2018	2365590,00	121,45	51,01
25/03/2018	2393230,00	122,86	47,71
31/03/2018	2419450,00	124,21	47,92
29/04/2018	2552640,00	131,05	49,06
9/5/2018	2661040,00	136,61	50,62
10/6/2018	2747470	141,05	50,62

Analizando la producción de sedimentos por año tomando la cantidad de tormentas o eventos ocurridos en ese periodo (sin acumular los valores de tormentas como se analizó en la

Tabla 17), se encontró un valor promedio de 65,3 Ton/(año-ha) . Esto ocurre porque no se tiene completo los años 2015 y 2018, por lo tanto, lo que se hizo para estos años fue proyectar con los datos medidos para el resto de año, lo que lleva a diferentes valores respecto a los hallados acumulado las tormentas.

Igual que en estudios realizados en la zona cafetera central de departamento de Caldas donde se utilizó la USLE, se estimó valores de pérdida de suelo entre 51 y 100 Ton/Ha*año, al igual que la microcuenca del río Tona (Ramirez-Ortiz & Hincapié-Gomez, 2009).

En estudios de ladera al norte del departamento del Cauca, se estimaron pérdidas de suelo desde 0,1 hasta 196,2 Ton/Ha*año, valores que están en función de sistemas para diferentes manejos de rotación de cultivos (Amésquita, 2003) y al compararlo con los valores de pérdida de los suelos obtenidos por la MUSLE en la microcuenca del río Tona, se observa que se ubican dentro de este rango.

Tabla 18.

Rendimientos de los sedimentos anuales

Año	Sy año (Ton/año)
2015	141.546
2016	900.624
2017	1.305.000
2018	2.743.320

Sy Prom.	1.272.623	Ton/año
SyProm.	65,3	Ton/(año-ha)

En la Figura 13 se observa el transporte de sedimentos espacialmente distribuido en la microcuenca del río Tona, calculado con el software ArcGIS mediante la acumulación de flujo dando el respectivo valor de producción de sedimento por cada celda según para así tener en cuenta el drenaje, la pendiente y la cobertura del suelo.

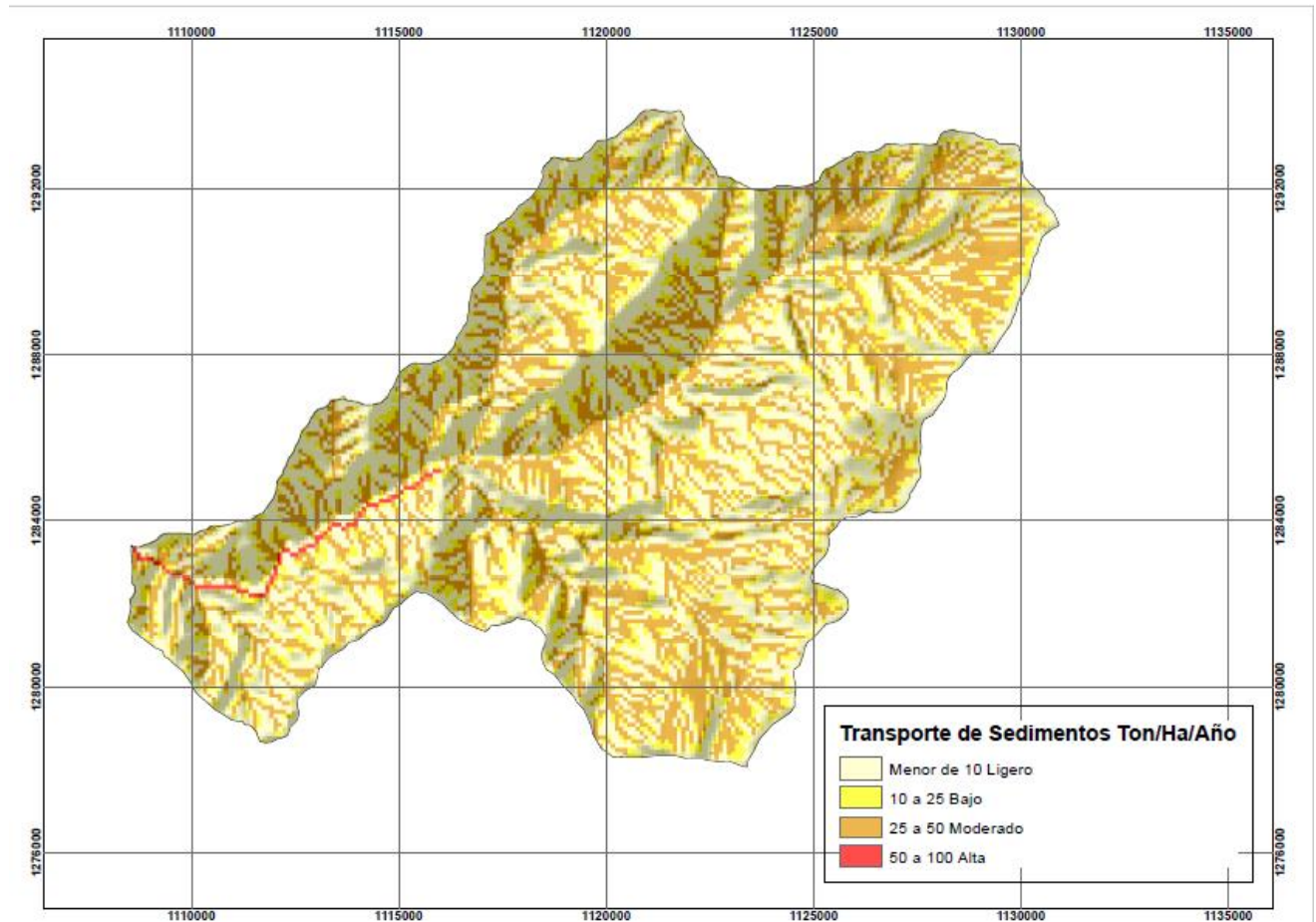


Figura 13. Transporte de sedimentos en la microcuenca del río Tona.

Con la finalidad de conocer las áreas críticas de pérdida de suelo, se construyó la Figura 14 donde se observa el aporte por celda sin acumulación de flujo.

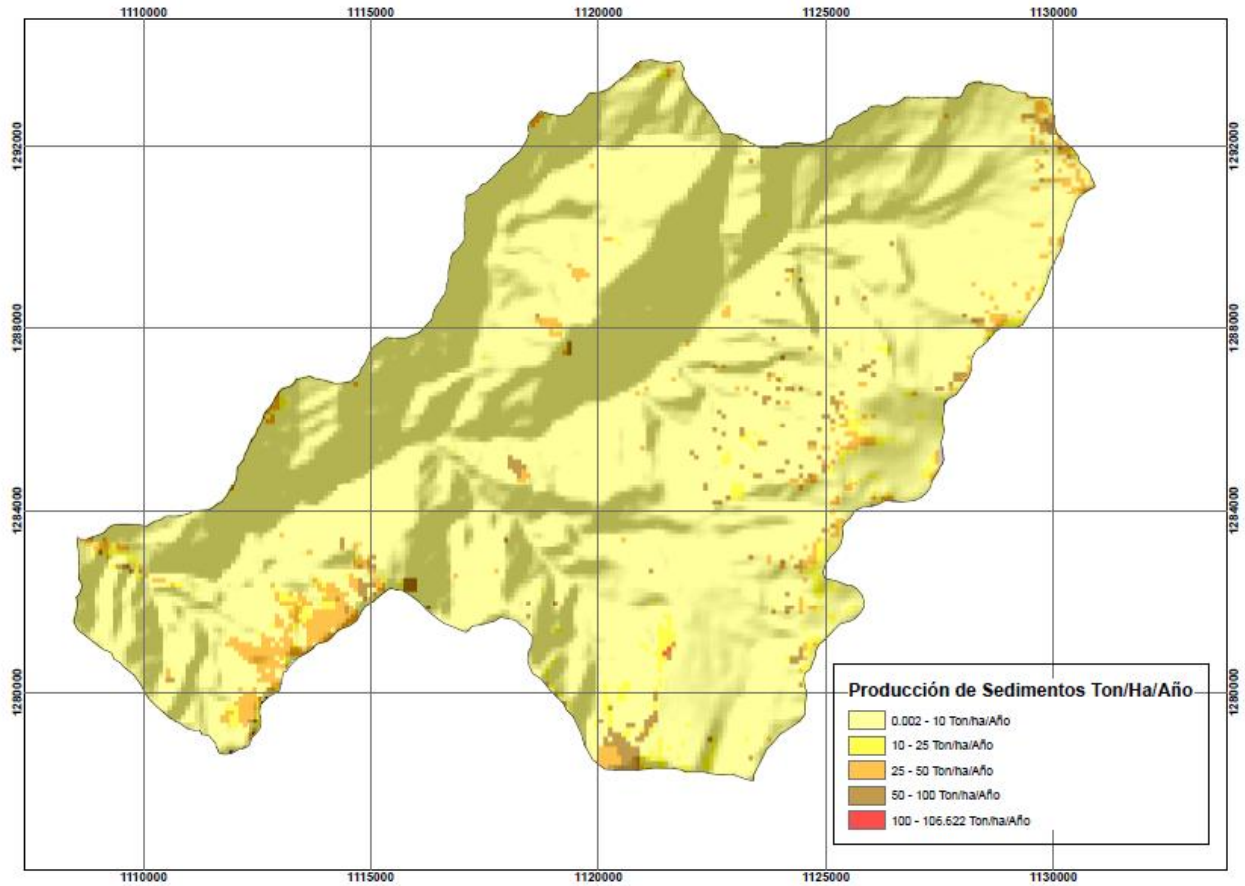


Figura 14. Producción de sedimentos en la microcuenca del río Tona hallada por la MUSLE.

Sin embargo, el valor medido en el embalse de Bucaramanga mediante la batimetría multihaz corresponde a 1.328.925,26 ton, con un rendimiento para la cuenca de 68,22 ton/ha y 23,69 ton/(ha*año). Basándose con los valores referencia de la FAO (FAO, 1993), se puede calificar la cuenca como riesgo de erosión medio.

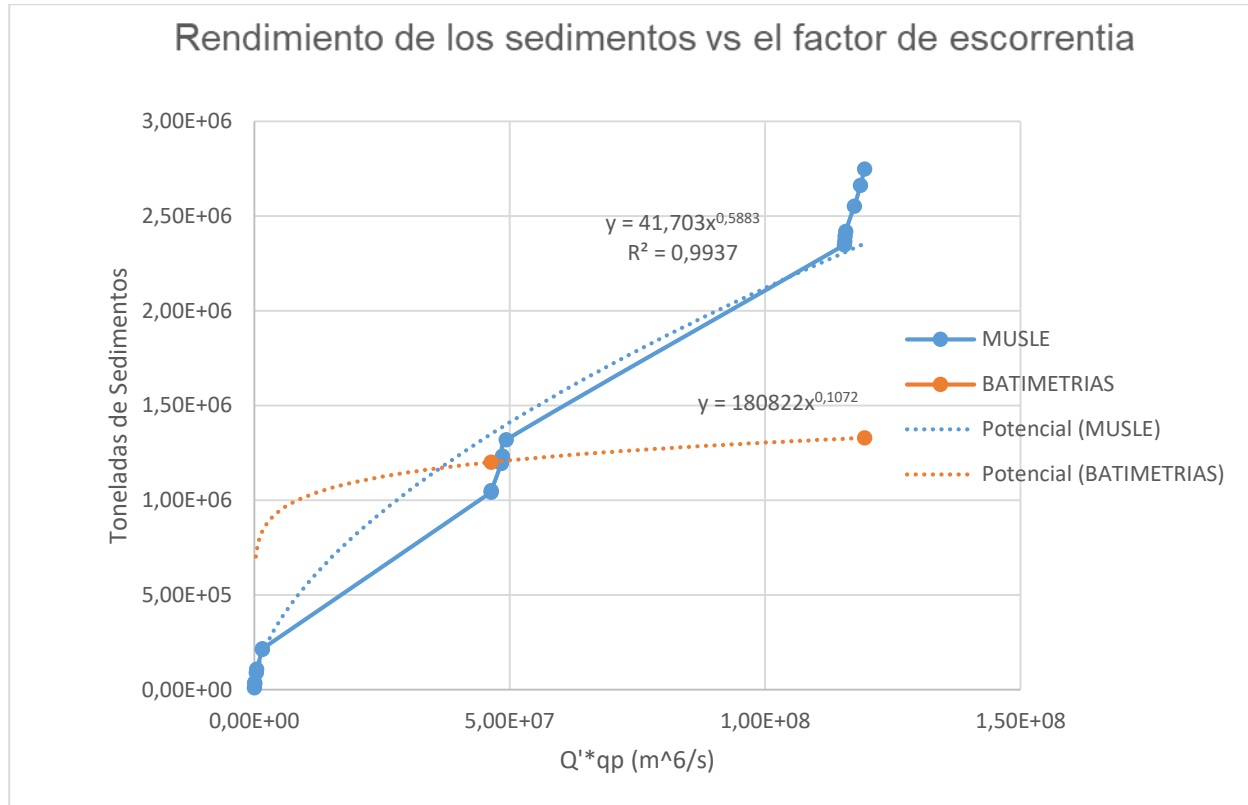


Figura 15. Rendimiento de los sedimentos vs el factor de escorrentía

Al relacionar la producción de sedimentos con el producto del escurrimiento superficial por el gasto pico, término por el cual Williams (Williams, 1975) sustituyó el factor de erosividad de la lluvia R de la USLE, hay un buen ajuste en un modelo de tipo potencial ($R^2=0,9937$; Figura 15). Sin embargo, el valor de la potencia (0,5883) es superior al encontrado por Williams (Williams, 1975) en EE. UU. (0,56).

En la Figura 15, se observa que para los datos medidos a través de la Batimetria el valor de la Potencia baja (0,1072) en comparación con el de la MUSLE (0,56).

Por lo tanto, existe diferencias sustanciales entre lo medido por las batimetrías en el embalse de Bucaramanga y lo calculado mediante la MUSLE, como se observa en la Figura 15.

Como solo se cuenta con dos datos de aporte de sedimentos reales, no es posible calibrar la ecuación, a pesar de ello se puede obtener un valor de las variables “a” y “b” del factor de escorrentía para el valor final acumulado de los sedimentos medidos mediante las batimetrías. Para este propósito se itero mediante métodos de optimización restringida (Beatriz Loubet, 1998) variando uno de estos índices y manteniendo constante el otro, obteniendo los siguientes resultados descritos en la Tabla 19:

Tabla 19.

Valores adoptados de las variables del factor de escorrentía.

Sy (Ton)		
a	5,67	
b	0,56	1'319.180
Sy (Ton)		
a	11,8	
b	0,5695888	1'319.180

A primera vista el valor del coeficiente “b” al tratarse de una potencia en la ecuación de la MUSLE, para pequeños cambios representa aumentos muy sustanciales en el valor de los sedimentos por tal razón, vamos a definir los valores de a= 5,67 y b= 0,56. Cabe concluir que con ecuación de la MUSLE se obtiene mayores valores de rendimiento de sedimentos que los medidos en el embalse de Bucaramanga, por lo tanto, el valor el coeficiente “a” disminuye de 11,8 a 5,67 y la ecuación característica para la cuenca del río Tona quedaría así:

$$S_y = 5,67 * (Q' * q_p)^{0,56} * K * S * L * C * P$$

Ecuación 20

Sin embargo, es muy importante precisar que es una primera aproximación y que esta ecuación debe calibrarse una vez se cuente con mayores datos de mediciones de aporte de sedimentos, medidas utilizando batimetrías multihaz en el embalse de Bucaramanga.

5. Conclusiones

Al calcular los sedimentos mediante la MUSLE y al compararlos con los medidos en las dos batimetrías realizadas al embalse de Bucaramanga, el cual está localizado al cierre de la cuenca del río Tona y partiendo del supuesto de que allí quedan atrapados el 100% de los sedimentos, se encontró una gran diferencia de 48,98 a 23,69 ton/(ha*año) por lo tanto se puede deducir que el método de la MUSLE sobreestimo la producción de sedimentos.

Esto pudo verse provocado por la estimación de cada una de las variables que componen la MUSLE, ya que por ejemplo, los valores de Q' y pq del factor de escorrentía, fueron tomados a partir de valores de caudales promedio diario medidos en las estaciones de aforo limnimétricas sobre el río Tona y no sobre caudales instantáneos que reflejan el comportamiento real de las lluvias sobre la cuenca, en este sentido y al no conocer tampoco la duración de las lluvias ya que las estaciones pluviométricas solo se cuenta con precipitaciones diarias.

Continuando con las demás variables que intervienen en la MUSLE, la precisión en la determinación del factor K depende de la información de suelo disponible, tanto en detalle como en representatividad, por lo tanto, no será lo mismo aplicar valores de 20 muestras de suelos para un área de 194 Km², que para una mayor densidad de muestras por Km², lo que aportaría mayor veracidad en su cálculo.

Por otra parte, también se requiere para hallar K de valores de la porción de arena muy fina, la cual es raramente presentada en análisis de suelos y en este caso de estudio, fue mayor el rango

granulométrico tomado, ya que no fue posible contar con los tamices requeridos para este tipo de análisis.

Por lo tanto, se mayor el valor del índice K para toda la cuenca porque aumenta el porcentaje de arenas finas al tomar un mayor rango entre tamices (0.085 mm), esto se observa en la Figura 8, donde es evidente la relación directa del porcentaje de arenas finas con el valor del coeficiente de erosionabilidad del suelo.

Por otra parte, la estructura del suelo es un parámetro subjetivo cuya evaluación depende de la experiencia del técnico que realizó el ensayo, por consiguiente, también la selección de este valor está íntimamente ligada al valor final de la constante K.

El parámetro LS, que es dado por una serie de ecuaciones tal como se describió en la metodología, que varía en función del detalle topográfico que se tenga del área a analizar, por tal razón para este trabajo se partió de una fotografía satelital con una escala de 30 x 30 m, por lo tanto pudo incurrir en una sobreestimación de dicho factor, ya que la longitud de la pendiente, representa la longitud de recorrido del escurrimiento superficial hasta que éste es interrumpido o desviado por obstáculos en el terreno, tales como: cercas, zanjas, cambios de pendiente, terrazas, barreras entre otras, que no logran ser apreciables en la fotografía satelital, por consiguiente esto conlleva a la utilización de valores altos de L y es bien sabido que la mayoría de los datos utilizados en el desarrollo de la ecuación MUELE provienen de parcelas de tamaño reducido, entonces como resultado la utilización de valores altos de L implica una extrapolación que puede llevar a diferencia considerables como las encontradas en este trabajo.

Continuando con el factor C, los valores se obtienen tabulando y no a través de ecuaciones, y de valores de usos agrícolas y no forestales. Además, por otra parte, el uso de la fotografía satelital no permite hallar diferentes variables citadas en el manual de USLE o en la “Guía para la

predicción de erosión laminar y concentrada en terrenos forestales”. Así, pues existe un sesgo entre el valor de P desde 0,13 hasta 1 que influye en la exactitud del modelo de cálculo del rendimiento de sedimentos.

Ahora bien, se logró ajustar la ecuación a las condiciones de la microcuenca del río Tona ajustando el índice “ a ” a 5,67, hallando así un valor teórico de 1.319.180 ton, muy cercano al valor medido a través de las batimetrías al embalse de 1.328.925,26 ton, para un rendimiento ajustado de 23,51 ton/(ha*año).

A partir de Ecuación 20 una vez calibrada con mayores datos de batimetrías y con una imagen satelital de menor escala y con mayor confiabilidad en la obtención de las diferentes constantes que componen la MUSLE, se podrá calcular los aportes de sedimentos para cuencas con superficies de alrededor de 100 km² (FAO, 1993) y de alta montaña en el contexto regional.

6. Recomendaciones

Continuar con las batimetrías anuales en el embalse de Bucaramanga para seguir ajustando y calibrando la ecuación de pérdida del suelo.

Contar con series de caudales horarias en las estaciones sobre el río Tona con la finalidad de obtener datos más confiables de las variables del factor de escorrentía Q' y q_p

Obtener las coberturas del suelo y la topografía a partir de fotografías de mayor resolución.

Contar con mayor densidad de muestras de suelos para la cuenca por km^2 , con el propósito de estimar con mayor grado de exactitud el valor del Factor K

Contar con los tamices requeridos con una apertura de 01 mm y 0.05 mm para el cálculo de la arena fina para próximos trabajos de aplicación

Es necesario adaptar el monograma para el cálculo del factor K, haciendo investigaciones teórico prácticas de suelos en Colombia, ya que un apreciable número de muestras el porcentaje de materia orgánica presenta valores superiores al 4%:

Para la calibración del modelo se recomienda utilizar cuatro índices: Eficiencia del modelo propuesto por Nash y Sutcliffe (EF), Error estándar (ES), coeficiente de determinación (CD) y el porcentaje de sesgo (PBIAS).

Como este trabajo de aplicación no se enfocó en diferenciar los sedimentos provenientes de deslizamientos de los arrastrados por la escorrentía directa, por lo tanto existe esta limitante, es importante a futuro considerarlos para ello se podría revisar las curvas IDF de lluvia en la zona y

ver si alguna de las IDF pudo haber excedido umbrales de deslizamiento y en tal caso estimar cuáles zonas pudieron haber deslizado, esto puede realizarse mediante un SIG como el del modelo SHALSTAB que depende del índice topográfico.

Referencias Bibliográficas

Alatorre, L. C. ; Beguería, S. (2009). Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el Pirineo central español.

AMB. (2016). *Informe de gestión 2016 - Acueducto Metropolitano de Bucaramanga* (2016^a ed.). Bucaramanga.

Amésquita, J. C. E. (2003). Erosión hídrica y degradación de suelos en laderas andinas. Vol. 20, Nº. 1-2, 2003 (Ejemplar dedicado a: Revista de Ciencias Agrícolas - Primer y segundo semestre, Enero - Diciembre 2003). Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6191695>

Arekhi, S., Shabani, A., & Rostamizad, G. (2012). Application of the modified universal soil loss equation (MUSLE) in prediction of sediment yield (Case study: Kengir Watershed, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6), 1259–1267. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0271-6>

Beatriz Loubet. (1998). Excel:Herramienta Solver. Recuperado de <http://www1.frm.utn.edu.ar/ioperativa/Manual-Solver.pdf>

Becker, A., Germany, J., Bruce, C., Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., ... Hanson, C. E. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter3.pdf>

Berón De La Puente, F. J., Gil, V., & Zapperi, P. A. (2017). *ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA ALTA DEL ARROYO NAPOSTÁ GRANDE, BUENOS AIRES, ARGENTINA. Eje Temático 7: Procesos ambientales, complejidad y riesgos.* Recuperado de https://redargentinadegeografiafisica.files.wordpress.com/2017/11/eje7_beron-f-gil-v-zapperi-p.pdf

Cataño Álvarez, S. (2015). *Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia.* Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/50573/1/1020427238_2015.pdf

Cdmb. (2006). Plan De Ordenamiento Y Manejo Ambiental Subcuenca Rio Surata, 43.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (2015). *GUÍA CFE 1000-73.* MEXICO. Recuperado de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/t/10000-73.pdf>

COMMISSION, W. A. R. (2002). *Stream channel and floodplain erosion.* Recuperado de <http://www.wrc.wa.gov.au/public/feedback>

Del Aguila, M. (2007). *APLICACIÓN DEL MODELO USLE/RUSLE PARA ESTIMAR LA PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA PUENTE PÉREZ - TINGO MARÍA.* Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/420/T.CSA-36.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Escobar, G. A. M. (2008). *USO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO (USLE) EN EL CAMPO FORESTAL.* Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

FAO. (1993). GLOBAL AND NATIONAL SOILS AND TERRAIN DIGITAL DATABASES, 122.

Geological Survey (U.S.). Office of Water Data Coordination. (1977). *National Handbook of Recommended Methods for Water Data Acquisition -- Chapter 11 - Water Use - Contents*. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/chapter11/>

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*.

IDEAM, & MAVDT. (2012). Propuesta del Programa Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la Degradación de Suelos y Tierras en Colombia: Diseño Estructura y Estrategías para su Implementación. *Ideam, Mavdt*, (160), 1–79.

Integral Ingenieros Constructores. (2012). *Memorando Técnico 03 – Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse*.

James Verdin, Diego Pedreros, G. E. (2003). Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica, USGS/EROS Data Center, 2003.

K.G Renard, G. . F. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 101,143. Recuperado de <https://naldc.nal.usda.gov/download/11126/PDF>

McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, L. R. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5), 629–641. <https://doi.org/10.1080/02693799608902101>

Morales, M. C. (2014). Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití, 17, 18. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7082/Estimacion_de_la_erosion_laminar.pdf;jsessionid=59CA7B4CE10ADACE256EF701941892A9?sequence=1

Morris, G. L., & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook* (ELECTRONIC). New York: McGraw-Hill Book Co.

Nearing, M. A., Page, D. I., Simanton, J. R., & Lane, L. J. (1989). Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*.

OHI. (2008). Normas De La Ohi Para Los Levantamientos Hidrográficos. 5ª Edición.

Prado-Hernández, J. V., Rivera-Ruiz, P., de León-Mojarro, B., Carrillo-García, M., & Martínez-Ruiz, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: Caso el malacate. *Agrociencia*.

Prado-Hernández, J. V, Rivera-Ruiz, P., De León-Mojarro, B., Carrillo-García, M., Martínez-Ruiz, A., & Responsable, A. (2016). CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE PÉRDIDAS DE SUELO USLE Y MUSLE EN UNA CUENCA FORESTAL DE MÉXICO: CASO EL MALACATE CALIBRATION OF THE USLE AND MUSLE SOIL LOSS MODELS IN A MEXICAN FOREST WATERSHED: EL MALACATE CASE STUDY. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/302/30250596002.pdf>

Ramirez-Ortiz, F. A., & Hincapié-Gomez, E. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de caldas 1. *Cenicafé*, 60(2), 173–189. Recuperado de [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)173-189.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)173-189.pdf)

Ramírez-Ortiz, F. A., Hincapié-Gómez, E., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009a). Erodabilidad De Los Suelos De La Zona Central Cafetera Del Departamento De Caldas. *Cenicafé*, 60(1), 58–71. Recuperado de [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060\(01\)58-71.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060(01)58-71.pdf)

Ramírez-Ortiz, F. A., Hincapié-Gómez, E., & Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009b). Erodabilidad De Los Suelos De La Zona Central Cafetera Del Departamento De Caldas. *Cenicafé*, 60(1), 58–71.

Rivera, J. H. (1990). *Determinación de los Indices de Erosividad, Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindio y Risaralda). Suelos y Aguas.*

Sadeghi, S. H. R., Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., & Saeidi, P. (2014). A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 365–375. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239>

Shi, Z. H., Cai, C. F., Ding, S. W., Wang, T. W., & Chow, T. L. (2003). Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China, 40,41. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00088-2)

Suarez, J. (2001). *CONTROL DE EROSION – EN ZONAS TROPICALES*. Noviembre, 2001 (1°). Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones.

United Nations. (2006). *El agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo.*

Ven Te Chow, D. R. M. y L. W. M. (1994). *Hidrologia Aplicada.*

Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1–2), 111–126. <https://doi.org/10.1016/S0921->

8181(03)00020-1

Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, ARS-S-40, 244–252.

Wischmeier, & Smith. (1978). *PREDICTING RAINFALL EROSION A GUIDE TO CONSERVATION PLANNING*. Recuperado de <https://permanent.access.gpo.gov/gpo31516/CAT79706928.pdf>

Yarce, C. J., & Castillo, J. E. (2014). Validación no exhaustiva del método analítico de Walkley–Black, para la determinación de materia orgánica en suelos por espectrofotometría de UV-VIS. *Ingenium*, 8(19), 37. <https://doi.org/10.21774/ing.v8i19.384>

Apéndices

Apéndice A. Cálculo del factor de esorrentía en función del tiempo

Fecha	Q m3	qp m3/s	Q*qp	(Q*qp) Acumulado	$a * (Q' * q_p)^b$	Acumulado $a * (Q' * q_p)^b$	Valor por pixel
28/08/2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/11/2015	52.536,01	0,31	16.355,58	16.355,58	2.701,06	2.701,06	0,14
14/11/2015	303.746,96	0,23	69.181,37	85.536,95	6.057,26	8.758,32	0,45
1/12/2015	32.103,60	0,16	5.259,98	90.796,93	1.430,98	10.189,30	0,52
24/05/2016	531.512,83	0,59	313.690,84	404.487,78	14.122,87	24.312,17	1,25
6/10/2016	88.821,81	0,60	53.651,53	458.139,30	5.253,49	29.565,66	1,52
3/11/2016	360.436,30	3,12	1.126.358,86	1.584.498,17	28.894,89	58.460,55	3,00
14/11/2016	15.973,24	0,09	1.476,53	1.585.974,70	702,52	59.163,07	3,04
6/12/2016	6.131.081,71	7,31	44.792.786,21	46.378.760,91	227.278,59	286.441,66	14,71
8/01/2017	34.676,38	0,38	13.139,22	46.391.900,13	2.389,36	288.831,02	14,83
2/05/2017	1.907.868,03	1,03	1.956.768,27	48.348.668,40	39.368,07	328.199,08	16,85
8/10/2017	210.707,17	0,91	192.117,39	48.540.785,79	10.731,97	338.931,05	17,40
31/10/2017	346.374,31	2,27	787.710,93	49.328.496,72	23.650,89	362.581,94	18,61
25/11/2017	6.081.356,06	10,88	66.191.307,03	115.519.803,75	282.833,30	645.415,24	33,13
13/01/2018	69.626,74	0,71	49.217,18	115.569.020,93	5.005,73	650.420,97	33,39
25/03/2018	122.831,81	0,84	103.071,33	115.672.092,26	7.572,50	657.993,47	33,78
31/03/2018	89.761,39	1,04	93.253,55	115.765.345,81	7.159,70	665.153,16	34,15
29/04/2018	379.038,19	4,55	1.725.221,03	117.490.566,84	36.687,24	701.840,41	36,03
9/05/2018	326.908,36	3,63	1.188.227,69	118.678.794,54	29.773,22	731.613,63	37,56
10/06/2018	582.776,78	1,35	789.159,30	119.467.953,83	23.675,23	755.288,86	38,78

Apéndice B. Características de las muestras según los parámetros para el cálculo del factor K de erosionabilidad

Puntos de muestra	Conductividad hidráulica (cm/hora)	Código USLE	Estructura	Código USLE	%MO	%MO Usado	%Arenas Gruesas	% Arenas Finas	% Limo	% Arcilla	Textura	K erosionabilidad grafica ($t \cdot m^2 \cdot h / (J \cdot h \cdot c \cdot m)$)	K Erosionabilidad ecuación ($t \cdot m^2 \cdot h / (J \cdot h \cdot c \cdot m)$)
Muestra # 0	42,99	1	Bloque	4	1,21	1	90	4	4	2	Arenoso	0,08	0,08
Muestra # 1	0,61	4	Granular media gruesa	3	4,91	4	59,9	10,1	20	10	Franco arenoso	0,22	0,25
Muestra # 2	12,50	2	Granular media gruesa	3	8,17	4	51,7	14,3	22	12	Franco arenoso	0,18	0,22
Muestra # 3	12,74	1	Granular media gruesa	3	2,00	2	44	26	18	12	Franco arenoso	0,27	0,31
Muestra # 4	8,65	2	Granular fina	2	1,16	1	60,2	9,8	18	12	Franco arenoso	0,19	0,19
Muestra # 5	1,78	4	Granular muy fina	1	3,02	3	33,4	22,6	20	24	Franco arcillo arenoso	0,21	0,24
Muestra # 6	8,66	2	Granular medio gruesa	3	1,10	1	56,7	11,3	16	16	Franco arenoso	0,22	0,21
Muestra # 7	1,80	4	Granular fina	2	19,65	4	53,3	16,7	24	6	Franco arenoso	0,22	0,30
Muestra # 8	20,22	1	Granular fina	2	12,60	4	61,3	14,7	16	8	Franco arenoso	0,11	0,12
Muestra # 9	10,85	2	Granular media gruesa	3	15,52	4	59,3	16,7	16	8	Franco arenoso	0,2	0,21
Muestra # 10	10,85	2	Granular fina	0	0,86	1	68,4	7,6	16	8	Franco arenoso	0,08	0,07
Muestra # 11	28,67	1	Granular media gruesa	3	2,74	3	70,8	13,2	8	8	Arenoso Franco	0,11	0,11

Puntos de muestra	Conductividad hidráulica (cm/hora)	Código USLE	Estructura	Código USLE	%MO	%MO Usado	%Arenas Gruesas	% Arenas Finas	% Limo	% Arcilla	Textura	K erosionabilidad grafica ($t \cdot m^2 \cdot h / (J \cdot h \cdot c \cdot m)$)	K Erosionabilidad ecuación ($t \cdot m^2 \cdot h / (J \cdot h \cdot c \cdot m)$)
Muestra # 12	0,77	4	Granular fina	2	1,88	2	54,3	5,7	18	22	Franco arcillo arenoso	0,17	0,18
Muestra # 13	0,68	4	Granular muy fina	1	2,67	3	50,7	15,3	14	20	Franco arcillo arenoso	0,15	0,16
Muestra # 14	11,73	2	Bloque	4	2,10	2	66,1	11,9	10	12	Franco arenoso	0,19	0,20
Muestra # 15	11,20	2	Granular media gruesa	3	2,40	2	64,2	11,8	12	12	Franco arenoso	0,17	0,18
Muestra # 16	12,44294124	2	Granula fina	2	7,21	4	56,9	13,1	12	18	Franco arenoso	0,1	0,10
Muestra # 17	8,169982086	2	Granular fina	0	9,91	4	55,1	12,9	16	16	Franco arenoso	0,05	0,04
Muestra # 18	24,58378823	1	Granular media gruesa	3	1,05	1	65,8	8,2	14	12	Franco arenoso	0,14	0,15
Muestra # 19	28,38345935	1	Granular media gruesa	3	2,78	3	77,6	10,4	4	8	Arenoso	0,07	0,07