

**Cálculo del factor de erosionabilidad (K) de la ecuación universal de pérdida de suelo para
la cuenca del Río Tona**

Nelly Alejandra Escobar Vera

Yamid Leonardo Meléndez Gallo

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Andrés Almeida Ortiz

Master en Presas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Agradecimientos, a nuestros padres y hermanos por el apoyo incondicional, a nuestro director de proyecto Ingeniero Andrés Almeyda Ortiz por su tiempo y dedicación, a la Universidad Industrial De Santander que nos formó como profesionales, a nuestros amigos y compañeros que nos acompañaron en este arduo proceso.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Cálculo del factor K de erosionabilidad de la cuenca del Río Tona	15
2. Metodología, manejo y proceso de análisis de datos	17
2.1 Fase I	17
2.2 Fase II	20
2.3 Fase III	24
2.4 Fase IV	25
2.4.1 Textura: Distribución del tamaño de partículas de horizonte superficial.	25
2.4.2 Porcentaje de materia orgánica.	27
2.4.3 Permeabilidad.	28
2.4.4 Estructura.	30
2.5 Fase V	30
2.5.1 La determinación del factor K por el método gráfico.	31
2.6 Fase VI	32
3. Resultados y Discusión.	33
4. Conclusiones	39
5. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	42

Apéndices.....	44
----------------	----

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Imagen satelital Landsat.	18
<i>Figura 2.</i> Raster de NDVI reclasificado.	19
<i>Figura 3.</i> Mapa de muestras en la Cuenca de río Tona.	23
<i>Figura 4.</i> Códigos para estructura en la USLE.	30
<i>Figura 5.</i> Determinación del K por método del nomograma	32
<i>Figura 6.</i> Interpolación del K de erosionabilidad d en la cuenca del Río Tona con el método del nomograma.	36
<i>Figura 7.</i> Interpolacion del K de erosionabilidad en la cuenca del Río Tona con la ecuacion. ...	37

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Valores generados por el raster NDVI y su significado.</i>	19
Tabla 2. <i>Cantidad de muestras que se tomaron de cada tipo de suelos.</i>	21
Tabla 3. <i>Asignación de números a las muestras.</i>	22
Tabla 4. <i>Determinación de la muestra a tomar en Excel.</i>	23
Tabla 5. <i>Ejemplo de cartera de laboratorio con la Muestra 2.</i>	27
Tabla 6. <i>Código USLE de permeabilidad</i>	28
Tabla 7. <i>Ejemplo de permeabilidad con la muestra 2.</i>	29
Tabla 8. <i>Coordenadas planas de los puntos de muestreo.</i>	34
Tabla 9. <i>Tabla de resultado de los análisis de suelo y el K de erosionabilidad.</i>	35
Tabla 10. <i>Áreas de la cuenca según el rango del factor K de erosionabilidad según el nomograma</i>	36
Tabla 11. <i>Áreas de la cuenca según el rango del factor K de erosionabilidad para los valores de la ecuación</i>	37
Tabla 12. <i>Valores de K según la textura del suelo.</i>	38

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Tabla de texturas para cada punto de muestra.	44
Apéndice B. Tabla de materia orgánica para cada punto de muestra.	45
Apéndice C. Tabla de permeabilidad para cada punto de muestra.	46
Apéndice D. Tabla de estructura para cada punto de muestra.	47

Resumen

TITULO: Cálculo del factor de erosionabilidad (K) de la ecuación universal de pérdida de suelo para la cuenca del Río Tona*

AUTOR: Nelly Alejandra Escobar Vera
Yamid Leonardo Meléndez Gallo**

PALABRAS CLAVE: Cuenca, Cobertura Vegetal, Erosionabilidad, Permeabilidad, Estructura, Materia Orgánica, Factor k..

DESCRIPCIÓN:

La remoción de la capa superficial del suelo debido a la erosión provoca efectos en las características físicas y químicas del suelo, produciendo reducción en la infiltración del agua y disminución de almacenaje de esta, la erosionabilidad del suelo o factor K de la ecuación USLE o MUSLE propuesto por WISCHMEIER y SMITH en 1978, se considera el factor más importante en la estimación de la pérdida de suelo y demuestra la susceptibilidad a la erosión. En este proyecto se determinó el factor K del suelo de la cuenca del río Tona, la cual está ubicada en el departamento de Santander, Colombia, con la finalidad de conocer aporte de sedimentos se tomaron 20 sitios de muestreo correspondientes a los 4 tipos de cobertura vegetal identificados en la cuenca mediante el uso de fotografías satelitales, en cada punto se tomó una muestra de suelo de 2 kg, en los primeros 20 cm, para determinar así la estructura y la permeabilidad del suelo. Las muestras se llevaron al laboratorio para determinar el porcentaje de materia orgánica y su textura, y de esta forma recopilar las variables necesarias para el cálculo del factor K mediante el nomograma, posteriormente se comparó los resultados obtenidos con el método de la ecuación. Para finalmente realizar una interpolación, generando el mapa de erosionabilidad de la cuenca.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeida Ortiz Master Empresas

Abstract

TITLE: Internship in Ingeniería Supervisión Técnica e Interventoría INSUT SAS as engineering assistant in the structural design activities and technical supervision *

AUTHOR: Nelly Alejandra Escobar Vera
Yamid Leonardo Meléndez Gallo **

KEY WORDS: Basin, Vegetable Coverage, Erosionability, Permeability, Structure, Organic Matter, Factor k.

DESCRIPTION:

The removal of the surface layer of the soil due to erosion causes effects on the physical, physical and chemical characteristics of the soil, resulting in a reduction in water infiltration and a reduction in water storage, soil erosion or the K factor. of the equation. MUSIC was made known by WISCHMEIER and SMITH in 1978, it is considered the most important factor in the estimation of soil loss and the susceptibility to erosion is demonstrated. In this project, the soil K factor of the Tona river basin, which is in the department of Santander, Colombia, was determined. In order to know the sediment issue, 20 sampling sites corresponding to the 4 types were taken. of coverage In the use of satellite photographs, at each moment a soil sample of 2 kg was taken, in the first 20 cm, to determine the structure and permeability of the soil. The samples are focused in the laboratory to determine the percentage of the matter and its texture, and in this way to collect the necessary variables for the calculation of the K factor by means of the nomogram, then the results were compared with the method of the equation To finally perform an interpolation, generating the erodibility map of the basin.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeida Ortiz Master Empresas

Introducción

Los procesos de degradación del suelo más relevantes en Colombia son la erosión, la pérdida de la materia orgánica, la salinización, la compactación y la desertificación; procesos que afectan en gran medida a las regiones Caribe, Andina y Orinoquia y que comienzan a notarse en la Amazonia y en el litoral Pacífico (IDEAM, s.f.).

Entre las causas de la degradación y la gestión insostenible de los suelos en el país se tienen: la creciente demanda de bienes y servicios de los suelos, el desconocimiento de las funciones e importancia del suelo y de alternativas para su recuperación, restauración y rehabilitación, procesos de planeación y de ordenamiento del territorio que no tienen en cuenta las características de los suelos, debilidad en los procesos de seguimiento a la calidad de los suelos, desarticulación institucional y carencia de normas e instrumentos para la gestión sostenible del suelo (IDEAM, s.f.)

La degradación de los suelos se refiere a la disminución o alteración negativa de una o varias de las ofertas de bienes, servicios y/o funciones ecosistémicos y ambientales de los suelos, ocasionada por factores y procesos naturales o antrópicos que, en casos críticos, pueden originar la pérdida o la destrucción total del componente ambiental (IDEAM, 2004). La degradación de suelo por erosión, se refiere a “la pérdida de la capa superficial de la corteza terrestre por acción del agua y/o del viento, que es mediada por el ser humano, y trae consecuencias ambientales, sociales, económicas y culturales” (Franco, Sanchez, Gómez, Otero, & Slamanca, 2015).

En general, existen dos tipos de erosión: la hídrica y la eólica. La erosión hídrica es causada por la acción del agua (lluvia, ríos y mares), en las zonas de ladera, cuando el suelo está desnudo

(sin cobertura vegetal). En estos casos las gotas de lluvia o el riego, ayudadas por la fuerza gravitacional, arrastran las partículas formando zanjas o cárcavas, e incluso causando movimientos en masa en los cuales se desplaza un gran volumen de suelo (IDEAM, 2004).

Dada la ausencia de información para medir con precisión aceptable la erosión en Colombia, es necesario estudiar su estimación mediante metodologías con mayor aceptación y difusión, no solo en el continente americano también en países con problemas de erosión, en este caso se hará uso de la ecuación USLE, (Universal Soil Loss Equation) formulada por WISCHMEIER y SMITH en 1978, la cual estima las pérdidas de suelo a escala anual, esto se logra efectuando la multiplicación de diferentes factores que intervienen en los procesos erosivos, por lo tanto, en este proyecto se calculará el factor K de erosionabilidad, el cual muestra la vulnerabilidad del suelo a la acción del agua.

Los sedimentos de la erosión generan impactos adversos secundarios cuenca abajo, como la colmatación de embalses, cauces de los cuerpos de agua como ríos, ciénagas, inestabilidad de puertos y puentes, pérdida de navegabilidad en los ríos, reducción de la oferta pesquera en aguas dulces y marinas, entre otros. Además, los sedimentos pueden transportar algunos contaminantes derivados de los agroquímicos aplicados al suelo, como fósforo, nitrógeno y residuos de plaguicidas. Por otra parte, la erosión eólica es causada por el viento que levanta y transporta las partículas del suelo, produciendo contaminación del aire (IDEAM, 2004).

El estudio se hizo en la cuenta de río Tona debido a la construcción del embalse de Tona, dado a que tendrá en un futuro conexión con dos plantas de tratamiento. Una es la Bosconia y la otra es la Planta Angelinos, garantizando el suministro de agua por los próximos 50 años al área metropolitana de Bucaramanga, pues el sistema permite regular las reservas de agua y ya no se dependerá solo del nivel de los ríos Tona y Suratá. Para conocer el rendimiento de sedimentos que

aporta la cuenca al embalse es importante determinar el factor K y además conocer la ubicación de las zonas con mayor potencial de erosión en estudio, los resultados obtenidos pueden servir como soporte a los manejadores del recurso para la toma de decisiones sobre prácticas de manejo de uso de suelo en la cuenca y posibles consecuencias que se puedan evidenciar.

1. Cálculo del factor K de erosionabilidad de la cuenca del Río Tona

Para determinar la producción de sedimentos se usa el modelo de USLE o MUSLE, el cual 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, Gholami, Khaledi Darvishan, & P., 2014). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) de Wischmeier y Smith (1978), constituye un método de uso generalizado para la estimación de la erosión hídrica. El modelo USLE, a partir de información referida de seis variables de control, estima el valor en toneladas por hectárea y año de la cantidad de suelo removida por la erosión hídrica (Pérez & López, 2000).

La expresión matemática de este modelo tiene la siguiente forma

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

Donde:

- A = Pérdida de suelo promedio anual en (t/ha/año).
- R=Factor de erosividad de las lluvias en (MJ/ha*mm/h).
- K=Factor de erosionabilidad del suelo en (t/ha MJ*ha/mm*h).

- LS = Factor topográfico (función de longitud – inclinación – forma de la pendiente), adimensional.
- C= Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional.
- P=Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional.

Se ha señalado que el modelo USLE, presenta una alta fidelidad y que éste posee una relativa aplicabilidad universal, basándose en la gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos (Puentes, 1983).

Cuando Wischmeier y Smith investigaron la erosionabilidad del suelo, obtuvieron los valores K para los suelos de Estados Unidos. Los primeros índices los lograron experimentalmente, pero fueron solamente siete suelos, luego evaluaron otros 23 tipos, y sobre esta base experimental asignaron subjetivamente los valores K para cientos de suelos (Puentes, 1983).

Paralelamente investigaron la relación del K experimental con ciertas propiedades del suelo, y llegaron a establecer una ecuación y un nomograma, para resolver K en función de 4 propiedades básicas, que explican más del 90% de variación media de K en una serie amplia de suelos (Wischmeier & Smith, 1978), estas propiedades son: Textura, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

2. Metodología, manejo y proceso de análisis de datos

En este capítulo se explica de forma detallada las fases y por menores del procedimiento utilizado durante el desarrollo del proyecto, cada paso fue necesario para lograr determinar con mayor grado de exactitud el mapa de erosionabilidad de la cuenca del río Tona, la metodología se basó en el manual de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo desarrollado por Wischmeier y Smith.

2.1 Fase I

Se generó el mapa de uso de suelo, el cual se realizó a partir de fotografías satelitales tipo RASTER, mediante el software ARGIS para poder establecer así el tipo de cobertura de la cuenca.

Adquisición de imágenes.

Se descargó una imagen del satélite LANDSAT 8 de la página Science for a changing world (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). La imagen fue tomada el 23 de diciembre del 2018, tiene una resolución de 15 metros en pancromático, 30m en multiespectral y un tamaño de píxel de 30m x 30m, cómo se aprecia en la Figura 1.

Para determinar el uso del suelo por medio de las imágenes satelitales, se hizo el cálculo del Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS) \quad (2)$$

En la que se tiene en cuenta el tipo de imagen, si es Landsat 7 o Landsat 8, en este caso se usó una imagen Landsat 8, la cual está compuesta por 11 bandas y se utilizó la banda 4, caracterizada

por ser rojo visible (VIS) y la banda 5, se caracteriza por ser infrarrojo cercano (NIR). Este índice generó valores entre 0,615409 y -0,175106 que básicamente representan el verdor de la imagen, se hace una reclasificación, dándole tonalidades verdes y amarillas para determinar el tipo de suelo. Figura 2, los valores son los comprendidos en la Tabla 1.



Figura 1. Imagen satelital Landsat.

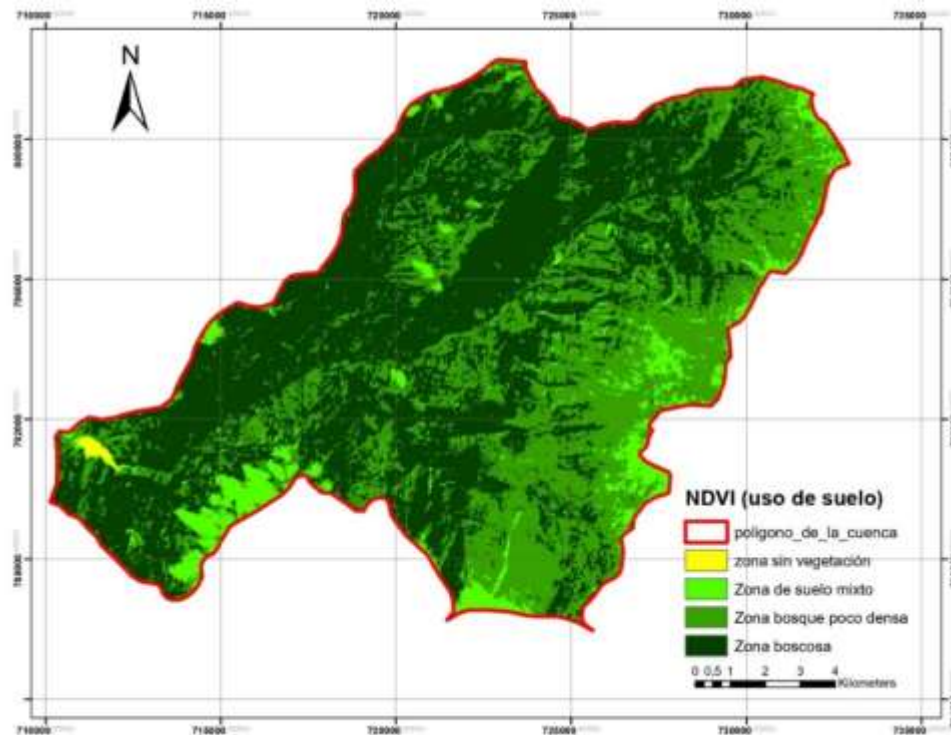


Figura 2. Raster de NDVI reclasificado.

Tabla 1.

Valores generados por el raster NDVI y su significado.

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

La zona sin vegetación son los espejos de agua, lajas y rastrojo, la zona de suelo mixto son parcelas con cultivos de poca altura, zona de bosques poco densos son las parcelas con cultivos de mayor altura y más densos y zona boscosa son bosques nativos.

2.2 Fase II

Se determinó el número de parcelas a muestrear, a partir del mapa de uso de suelo. Para esto se halló el número de parcelas homogéneas en función del tipo de uso del suelo y mediante un análisis estadístico (muestreo aleatorio simple), se calculó el número de parcelas representativas muestreadas en campo, el procedimiento utilizado fue el siguiente:

Basados en investigaciones anteriores del k de erosionabilidad en el departamento de caldas, 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 194'727.024,01m²

Para saber el porcentaje que representa en la totalidad de la cuenca cada índice de vegetación, se requiere calcular su área, debido a esto se tomó el raster del NDVI convirtiendo en un shape, este generó el área de cada tipo de suelo, para el cálculo del número de muestras que fueron tomadas en cada tipo de suelo, cómo se especifica en la Tabla 2.

Para determinar los puntos de muestreo, se generó una malla con 311.564 parcelas de dimensiones de 25mx25m, de esta forma se seleccionaron las parcelas por tipo de cobertura vegetal, también se determinó cuáles son representativas para cada tipo, realizando un muestreo aleatorio simple con el software Excel, de la siguiente manera.

Tabla 2.

Cantidad de muestras que se tomaron de cada tipo de suelos.

Tipo de suelo	Área [m2]	%	Muestras
Zona sin vegetación	2'718.117,3	1%	1
Zona de suelo mixto	20'460.745,8	11%	2
Zona bosque poco densa	64'360.929,8	33%	7
Zona boscosa	107'187.231,2	55%	10
Zona sin vegetación	194'727.024,1	100%	20

- Se exportaron los datos de las parcelas por tipo de cobertura desde ARCGIS a Excel, usando una hoja de cálculo para cada tipo de cobertura, los datos exportados corresponden a los números asignados por ARCGIS a cada parcela, estos están relacionados en la columna llamada *FID* de la Tabla 3.
- Se asignó un número a cada parcela de forma sucesiva, la columna siguiente se designó como *Asignación*, esta columna corresponde a el número aleatorio que se le dio a cada parcela, este número uso utilizando la función aleatoria de la siguiente manera (=ALEATORIO()), el procedimiento se realizó en la columna llamada *Asignación*, estos valores se copiaron y pegaron en el mismo lugar con el formato valor, como se muestra en la Tabla 3.

La Tabla 3 corresponde a un fragmento de la tabla original, la cual comprende 5798 datos.

Tabla 3.

Asignación de números a las muestras.

Orden	FID	Asignación
1	180	0.89
2	181	0.52
3	182	0.93
4	249	0.12
5	250	0.02
6	251	0.50
7	322	0.86
8	323	0.31
9	325	0.13

- La siguiente columna es el número de muestras que se requieren, para el primer tipo de cobertura corresponde a una parcela, esta columna se llamara *Muestra*, a continuación se colocó la casilla *Criterio*, en esta se introdujo la ecuación criterio de la siguiente manera ($=\text{CRITERIO}(\text{Primer celda de la columna Asignación}, \text{toda la columna asignación})$), generando el orden de las parcelas con mayor número aleatorio, posteriormente la siguiente columna llevará el nombre de *Selección*, en esta celda se introdujo la siguiente ecuación ($=\text{BUSCAR}(\text{Primer celda de la columna Selección}, \text{La matriz formada por las Columnas Orden y FID}, \text{La columna donde debe buscar el resultado en este caso columna FID}, \text{seleccionar FALSO que corresponde a coincidencia exacta})$), esta última ecuación definió el número de la parcela correspondiente a la columna *FID*, los resultados se muestran en la Tabla 4.

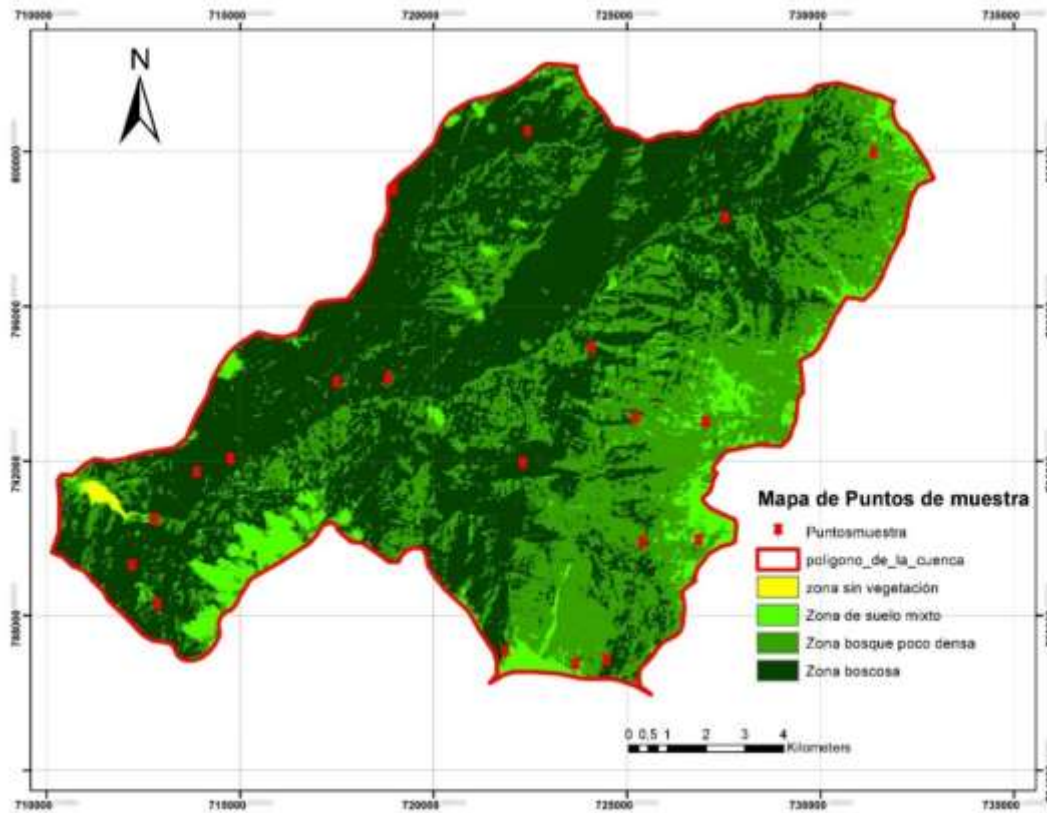


Figura 3. Mapa de muestras en la Cuenca de río Tona.

Tabla 4.

Determinación de la muestra a tomar en Excel.

Muestra	Criterio	Seleccionar
1	621	1745

Este procedimiento se realizó para los cuatro tipos de cobertura de la misma manera, el número de parcela seleccionado se buscó en ARCGIS y se tomó el punto medio de la parcela.

Las coordenadas obtenidas para la Muestra 0 fueron $X=723669,399454587$; $Y=786694,456823144$ y tiene una elevación de 3403 msnm.

La ubicación de los puntos seleccionados se observa en la Figura 3.

2.3 Fase III

En las parcelas elegidas se tomó una muestra de 1 Kg en cada punto seleccionado dentro de los primeros 20 cm, para así establecer el horizonte superficial de cada parcela.

La herramienta más apropiada para el muestreo es el barreno, pues con él puede mantenerse una cantidad y profundidad de muestra por punto bastante homogénea. Sin embargo, si no se cuenta con un barreno, el muestreo puede hacerse con una pala o palín y un balde o lona limpios y procurando tomar una cantidad similar de suelo en cada punto y a la misma profundidad. Empaque aproximadamente 1 kg en bolsas plásticas o de papel encerado que no hayan sido usadas antes. No usar bolsas o empaques que contengan fertilizantes u otras sustancias químicas (herbicidas, pesticidas, enmiendas, etc.). Proceda a identificar la muestra en forma concisa y exacta; precise el número de lote o predio, el cultivo o uso actual rotulado en las muestras para llevar al laboratorio (Molano & Batista, 2007).

Con los puntos ya definidos tomando las coordenadas se pasaron a un formato KML, mostrado en la Tabla 8, determinando el punto exacto en google earth, de esta manera fue planteada la ruta y la forma de llegar a los puntos de realización del muestreo, en estos puntos el procedimiento incluyó la toma de la muestra, la prueba de permeabilidad en campo (Lefranc somera de carga variable) y el análisis de la estructura, el procedimiento realizado en campo fue el siguiente:

- En todos los puntos de muestreo se retiró la capa de vegetación para limpiar de la zona.
- Se realizó una excavación con una profundidad de 35 centímetros, con el objetivo de usarla para la realización de la prueba de permeabilidad.
- El suelo removido fue guardado en bolsas que mantuvieran las condiciones originales del mismo, estas muestras tenían aproximadamente un kilogramo de peso.

- Se realizó el análisis de estructura de forma visual caracterizándose en los 4 códigos usados en la constante K de erosionabilidad.
- Fue realizada la limpieza de la excavación, para introducir un tubo de 3 pulgadas de diámetro, que en su interior tenía una cinta métrica, con la finalidad de determinar el ΔH , se ajustó el tubo a las paredes, con el objetivo de evitar que al introducir el agua retornara a la superficie por la parte exterior.
- Al tubo se le introdujo agua hasta la altura máxima, con un Δ de tiempo, tomando los respectivos ΔH .

Estas muestras fueron en un total de 6 salida campo, entre los meses de febrero y marzo, estos meses hacen parte de una de las dos temporadas secas la cual se extiende desde el 21 de diciembre hasta el 21 de marzo, según la Sociedad Geográfica de Colombia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2013).

2.4 Fase IV

Se realizaron los análisis de textura, estructura, porcentaje de materia orgánica y permeabilidad en campo.

2.4.1 Textura: Distribución del tamaño de partículas de horizonte superficial. Se estimaron por medio del análisis mecánico y consiste en llevar las muestras de suelo alterado a un laboratorio de análisis para determinar cuantitativamente el tamaño de las partículas (FAO, s.f.).

El ensayo de textura inicialmente lo realizó el Laboratorio Químico de Suelos de la Universidad Industrial de Santander, en dicho estudio se encontraron los porcentajes de arenas

totales, limos y arcillas, estos resultados no permiten establecer el porcentaje de arenas muy finas, información necesaria para la determinación de la constante K de erosionabilidad, por esto fue realizado un segundo ensayo, en los laboratorios de Ingeniería Civil de la UIS, este ensayo se realizó según los parámetros del Departamento de Agronomía de Estados Unidos, donde las arenas muy finas son aquellas entre los tamices de tamaño 0.1mm y 0.05mm, en los laboratorios de la escuela no estaban disponibles dichos tamices, por lo tanto los tamices más cercanos son de 0.16mm y 0.075mm por la dificultad de obtener los tamices adecuados se tomó la determinación de usar los tamices disponibles, aunque esto puede generar una variación en los porcentajes reales.

Fueron calculados nuevamente los porcentajes de arenas y de finos, para la realización de los cálculos correspondientes a textura, se tomaron los valores de Arcillas y limos del Laboratorio Químico De Suelos, y las arenas del laboratorio realizado en el edificio Alvaro Beltrán de la UIS, en este fueron usadas muestras de aproximadamente 600g de suelo, que comprendía arenas y finos, secadas al horno durante 24 horas, luego se realizó el tamizaje empezando con el tamiz número 20 con una abertura de 2mm, el 100% de la muestra debió pasar dicho tamiz aquel material que no paso se descartó, para tamizar la muestra restante en los tamices número 100 y 200 de 0.16mm y 0.075mm de abertura respectivamente. Tomando los pesos correspondientes de lo retenido en cada tamiz y el fondo, el porcentaje de arenas finas corresponde a el suelo retenido en el tamiz número 200, hubo variaciones en los porcentajes de finos los cuales correspondieron a lo retenido en el fondo, en comparación de la suma entre limos y arcillas respecto a el ensayo realizado por el laboratorio Químico de Suelos, esto era esperado por la diferencia de abertura de los tamices, sin embargo dicha diferencia no es significativa, los resultados de esta prueba para la Muestra 2 se presentan en la Tabla 5 y las demás muestras en el Anexo 1.

Tabla 5.

Ejemplo de cartera de laboratorio con la Muestra 2.

Cartera del laboratorio			
Peso Muestra 2	573g		
Tamices	Peso que pasa (g)	Peso retenido (g)	% Retenidos
Numero 20	296.2	-	-
Numero 100	100.4	296.2	51.7
Numero 200	204.6	81.9	14.3
Fondo	-	195.4	39.8

2.4.2 Porcentaje de materia orgánica. Se estimó su proporción porcentual dentro del suelo, para esto se realizó un análisis de Walkley-Black, en el cual el suelo se oxida con una solución de dicromato de potasio estandarizada, utilizando el calor producido por la dilución de ácido sulfúrico concentrado, en la solución crómica. Según USLE, el porcentaje de materia oscila entre el 0% y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume como 4% (Sustituye, 2015).

Las muestras tomadas se llevaron al laboratorio químico de suelos de la Universidad Industrial De Santander donde fue realizado el análisis de textura y el cálculo del porcentaje de carbono, usado para hallar el porcentaje de materia orgánica. Este cálculo se realizó para todas las muestras de la siguiente manera, teniendo como referencia el porcentaje de carbono (%C), suministrado por el laboratorio; para la Muestra 2 (%C= 4.74).

$$\%MO = 1.7 * \%C \quad (3)$$

$$\%MO = 1.7 * 4.74$$

$$\%MO = 8.17$$

Los resultados para las demás muestras se encuentran en el Anexo 2.

2.4.3 Permeabilidad. En la ecuación universal de pedida de suelo están seis valores o códigos diferentes de acuerdo con la permeabilidad de un suelo determinado como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Código USLE de permeabilidad

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

Para el cálculo de permeabilidad con el método Lefranc somera de flujo variable, se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$K = 2.0 * C * A * \frac{\frac{\Delta H}{t}}{H} \quad (4)$$

Donde:

- K: Conductividad hidráulica en (cm/h).
- C: Factor de forma en (1/cm).
- A: Área de la sección circular del barreno en (cm²).

- t: Tiempo del intervalo de observación en (h).
- ΔH : Carga promedio de la columna de agua en cada observación. ΔH Diferencia de carga de las columnas de agua inicial y final de cada observación en (cm).

$$C = \frac{0.366 \cdot \log(L + \sqrt{L^2 - D^2})}{L} \quad (5)$$

Donde:

- L: Longitud de tramo de prueba en (cm)
- D: Diámetro del tubo (cm)

Con los datos de ΔH en el campo y el tiempo definido por muestra, se calculó el factor de forma (C) y la conductividad hidráulica (K), al obtener los diferentes valores de K para cada intervalo de tiempo, se hizo el promedio y con este valor fue determinado el código correspondiente para el nomograma de erosionabilidad, como se observa en la Tabla 7 para la Muestra 2, los resultados para las demás muestras se presentan en el Anexo 3.

Tabla 7.

Ejemplo de permeabilidad con la muestra 2.

Muestra 2									
Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Altura del agua intervalo (cm)	Altura media intervalo	Diferencia de alturas	Tiempo (s)	Tiempo (h)	Factor de forma (c)	conductividad Hidráulica	Código USLE
7,62	45,603	35	34	1,4	20	0,00555556	0,0192396	13,01	2
7,62	45,603	33,6	32,6	1,3	20	0,00555556	0,0198432	12,99	
7,62	45,603	32,3	31,3	1,1	20	0,00555556	0,0204422	11,79	
7,62	45,603	31,2	30,2	1,1	20	0,00555556	0,0209811	12,54	
7,62	45,603	30,1	29,1	1	20	0,00555556	0,0215522	12,15	
K promedio								12,49	

2.4.4 Estructura. Se efectúa su determinación mediante observación visual y tacto. Para ello es recomendable emplear el manual para la comparación de acuerdo con USLE la categoría y los códigos son presentados en la Figura 4.

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

Figura 4. Códigos para estructura en la USLE.

Se realizó la observación en campo y por medio de la tabla guía del manual de la USLE se determinó el código correspondiente al nomograma de erosionabilidad de los mostrados en la Tabla 8.

En el caso de la Muestra 2, tiene un tipo de estructura granular media a gruesa, que en el manual corresponde al código 3, el código para las demás muestras se encuentra en el Anexo 4.

2.5 Fase V

Aplicación del nomograma de erosionabilidad: Con las características del suelo y el monograma propuesto por WISCHMEIER Y SMITH (1978), se determinó el valor de K para cada punto de muestreo.

2.5.1 La determinacion del factor K por el metodo grafico. Consiste en usar los datos recopilados de los ensayos de textura, estructura, permeabilidad y porcentaje de materia organica, en el caso para la permeabilidad y la estructura se usaron los codigos según la clasificacion de la USLE. Para la muestra numero 2, los datos de los parametros necesarios para determinar el valor de K se muestran a continuacion

- Textura: Franco Arenosa, %Limos 22, %Arenas finas 14.3, % Arenas gruesas 51.7%.
- Estructura: Granular fina, codigo 3 según “Figura 1”.
- Permeabilidad: 12.50 cm/h, codigo 2 según Tabla 1.
- %MO: 8.17, se tomo como %MO mayor a 4%, por lo tanto se asume como 4%.

Para esta muestra el valor $K=0.17$, se determinó como se ilustra en la Figura 5.

Analógicamente el factor K puede ser estimado de manera directa a través una ecuación, para ambos métodos es necesario efectuar determinaciones previas de las propiedades anteriormente descritas (FAO, s.f.). Para la determinación de la constante de erosionabilidad (K), y como método comparativo, también se usó el método de la ecuación en la forma:

$$K = 1,313 [2,1 \times 10^{-4} (12 - \%MO) M^{1,14} + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3)] / 100 \quad (6)$$

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 $(\% \text{limo} + \text{arena muy fina}) * (100 - \% \text{arcilla})$ (Sustituye, 2015).

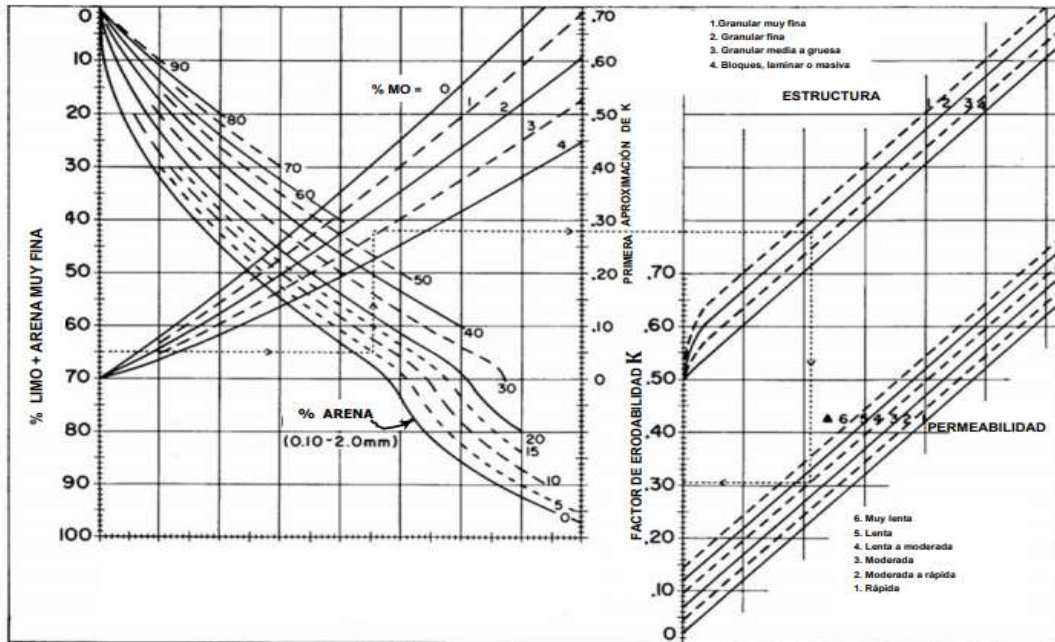


Figura 5. Determinación del K por método del nomograma Tomado de: (Wischmeier & Smith, 1978).

2.6 Fase VI.

Interpolación a toda la cuenca: Se utilizó 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.

3. Resultados y Discusión.

Los puntos de muestreo y sus respectivas coordenadas planas se encuentran en la Tabla 8, los resultados de los análisis realizados para la determinación del K de erosionabilidad y el factor de erosionabilidad a partir de los 20 puntos de muestreo, se encuentran en la Tabla 9, las siglas usadas son las siguientes:

- Código USLE de P: código de USLE de la permeabilidad.
- Código USLE de E: código de USLE de la Estructura.
- % MO: Porcentaje de materia orgánica.
- % AG: Porcentaje de arenas gruesas.
- % AMF: Porcentaje de arenas muy finas.
- % L: Porcentaje de limos.
- % A: Porcentaje de arcillas
- F.: Franco

En la Figura 6 y la Figura 7 se presentan respectivamente los mapas generados por la interpolación de los 20 puntos de muestreo, tanto para el método del nomograma como para los valores obtenidos por medio de la ecuación.

Tabla 8.

Coordenadas planas de los puntos de muestreo.

Punto de Muestra	X	Y	Elevación [m]
0	712786,36	790438,44	3403
1	721861,04	787036,83	2746
2	727031,43	792954,42	3353
3	725407,85	789843,95	3085
4	727544,62	798234,96	2396
5	717504,95	793989,28	1518
6	725220,17	793069,11	2839
7	731370,79	799918,27	3491
8	723669,40	786694,46	1107
9	726859,64	789902,01	3407
10	712216,73	789250,11	1232
11	722314,52	791899,28	2215
12	712869,80	788243,48	1560
13	722440,65	800468,52	2238
14	718828,36	794082,67	1558
15	714761,10	792001,12	1272
16	718975,80	798959,84	2121
17	724487,08	786795,73	3336
18	724090,67	794870,25	1864
19	713885,12	791651,98	1381

Tabla 9.

Tabla de resultado de los análisis de suelo y el K de erosionabilidad.

Puntos	Código USLE de P	Código USLE de E	% MO	% AG	% AMF	% L	% A	Textura	K grafica	K ecuación
0	1	4	1,21	90	4	4	2	Arenoso	0,08	0,08
1	4	3	4,91	59,9	10,1	20	10	F. arenoso	0,22	0,26
2	2	3	8,17	51,7	14,3	22	12	F. arenoso	0,18	0,23
3	1	3	2,00	44	26	18	12	F. arenoso	0,27	0,32
4	2	2	1,16	60,2	9,8	18	12	F. arenoso	0,19	0,19
5	4	1	3,02	33,4	22,6	20	24	F. arcillo arenoso	0,21	0,24
6	2	3	1,10	56,7	11,3	16	16	F. arenoso	0,22	0,22
7	4	2	19,65	53,3	16,7	24	6	F. arenoso	0,22	0,30
8	1	2	12,60	61,3	14,7	16	8	F. arenoso	0,11	0,12
9	2	3	15,52	59,3	16,7	16	8	F. arenoso	0,2	0,21
10	2	0	0,86	68,4	7,6	16	8	F. arenoso	0,08	0,07
11	1	3	2,74	70,8	13,2	8	8	Arenoso F.	0,11	0,12
12	4	2	1,88	54,3	5,7	18	22	F. arcillo arenoso	0,17	0,18
13	4	1	2,67	50,7	15,3	14	20	F. arcillo arenoso	0,15	0,16
14	2	4	2,10	66,1	11,9	10	12	F. arenoso	0,19	0,21
15	2	3	2,40	64,2	11,8	12	12	F. arenoso	0,17	0,18
16	2	2	7,21	56,9	13,1	12	18	F. arenoso	0,1	0,10
17	2	0	9,91	55,1	12,9	16	16	F. arenoso	0,05	0,04
18	1	3	1,05	65,8	8,2	14	12	F. arenoso	0,14	0,15
19	1	3	2,78	77,6	10,4	4	8	Arenoso	0,07	0,07

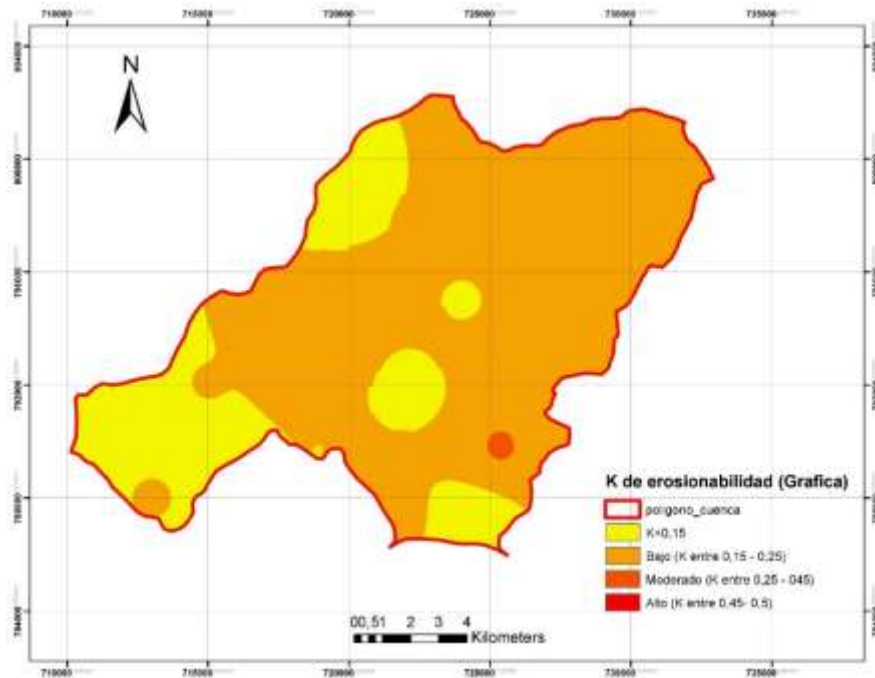


Figura 6. Interpolación del K de erosionabilidad d en la cuenca del Río Tona con el método del nomograma.

Tabla 10.

Áreas de la cuenca según el rango del factor K de erosionabilidad según el nomograma

K nomograma	Numero de pixeles	Área	Porcentaje %
K < 0,15	55.391	49'851.900	25,60
Bajo (K entre 0,15 - 0,25)	160.185	144'166.500	74,02
Moderado (k entre 0,25 - 0,45)	822	739.800	0,38
Alto (k entre 0,45 - 0,5)	0	0	0
Total, Área de la cuenca		194758200	100

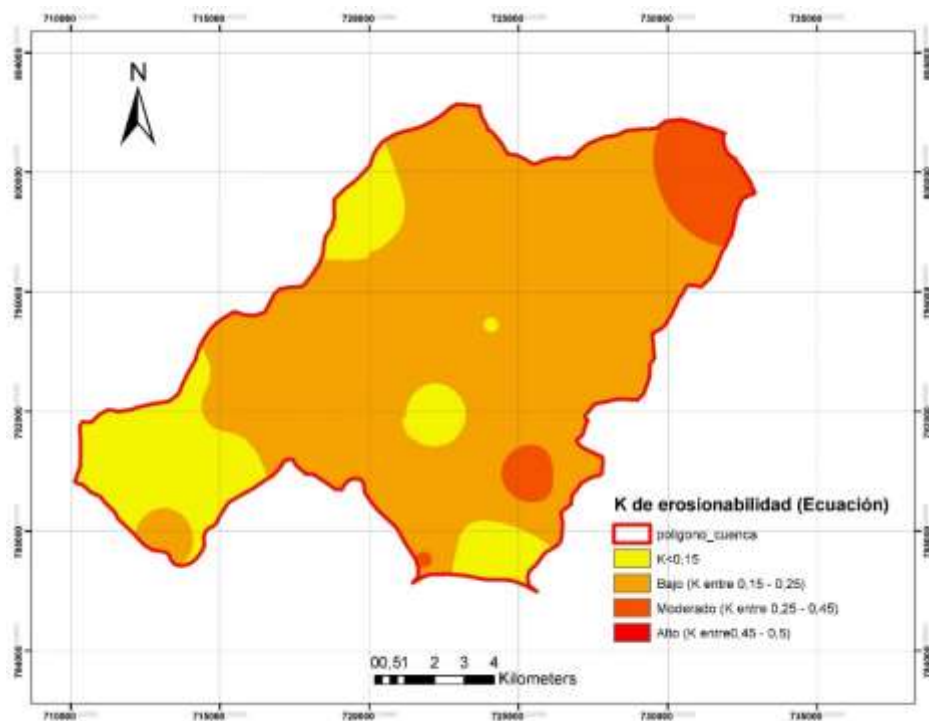


Figura 7. Interpolación del K de erosionabilidad en la cuenca del Río Tona con la ecuación.

Tabla 11.

Áreas de la cuenca según el rango del factor K de erosionabilidad para los valores de la ecuación

K ecuación	Numero de píxeles	Áreas (m ²)	Porcentaje %
K < 0,15	39.728	35'755.200	18,36
Bajo (K entre 0,15 - 0,25)	162.898	146'608.200	75,28
Moderado (k entre 0,25 - 0,45)	13.799	12'419.100	6,38
Alto (k entre 0,45 - 0,5)	0	0	0
Total, Área de la cuenca		194782500	100

En la Figura 6 y Figura 7 se observa los valores del factor K de erosionabilidad de la cuenca del río Tona oscilan entre 0.04 y 0.32 t*h/MJ*cm.

La diferencia visualizada a partir de los dos mapas de erosionabilidad está en que el k de erosionabilidad moderado por el método de la ecuación aumenta en el un 6%.

Tabla 12.

Valores de K según la textura del suelo.

Textura	K mín	K máx	Grado	Motivo
Arenoso	0	0,08	Bajo 0,05<K<0,15	E.E
Arenoso Franco	0,12	0,12	Bajo 0,05<K<0,15	M.S.E
Franco arenoso	0,04	0,32	Moderado 0,25<K<0,45	M.S.E

E.E: Escaso escurrimiento.

M.S.E: Moderada susceptibilidad al escurrimiento.

Los valores más bajos de erosionabilidad corresponden a suelos de textura Arenoso (hasta 0,08), los valores medios a suelos de textura Areno Franco (hasta 0,18) 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 esta, ya que este determinaría el valor de K por tratarse de suelos homogéneos en toda la cuenca según las muestras recolectadas.

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 12, están los rangos de erosionabilidad según la textura de suelo encontrados en los diferentes sitios de muestreo, comparados con los grados de susceptibilidad definidos por la Soil and Water Corsevation Society (1995).

En el caso de la estructura granular fina los valores de erosionabilidad corresponden a suelos con textura

franco arenoso y franco arcillo arenosos (entre 0.1 a 0.3), siendo este valor estrechamente relacionado con el porcentaje de limos, a mayor porcentaje de limos mayor es el K de erosionabilidad.

4. Conclusiones

Del mapa de uso de suelos de la cuenca de río Tona que se generó, podemos inferir que la mayor parte de la cuenca está compuesta por la zona boscosa o de bosques nativos al tener un área de 107.187.231,2 m² de un área total de la cuenca de 194.727.024,1 m², siendo esta zona el 55% de la totalidad de la cuenca, debido a esto tienen una gran envergadura en los resultados del k de erosionabilidad. La zona de bosque poco denso tiene un porcentaje del 33% en la cuenca, lo cual significa que los cultivos de alturas medianas están afectando significativamente la vegetación nativa y por supuesto las propiedades intrínsecas del suelo.

Las muestras que presentaron estructura de bloque presentan altas permeabilidades y bajos porcentajes de materia orgánica, también se puede concluir que los resultados de las propiedades del suelo pueden verse afectados por la temporada seca en que se tomaron las muestras y al existir un clima bimodal en Colombia estos resultados podrían presentar variaciones en las temporadas húmedas o de alta precipitación, pues dado que durante la temporada humedad los suelos con bajo contenido de materia orgánica serán más susceptibles a la pérdida de material, también se ven afectados los suelos por el aumento en el grado de saturación, disminuyendo la infiltración y generando mayor escurrimiento de material a las fuentes hídricas pertenecientes a la cuenca del río Tona.

Al realizarse la interpolación de los factores k de erosionabilidad de cada punto de muestreo a la totalidad de la cuenta, se puede visualizar que el K de erosionabilidad de la cuenca es muy bajo, bajo y moderado, pero esto no quiere decir que no lleguen a la cuenca gran cantidad de sedimentos, puesto que para su determinación es necesario tener en cuenta otros valores importantes como lo son la erosionabilidad, la longitud del terreno, la pendiente del terreno, la organización de los cultivos y las prácticas de conservación.

5. Recomendaciones

El nomograma de erosionabilidad es la manera más tradicional de estimar el factor K. A pesar de ser similar la misma ecuación usada en el proyecto, puede llegar a ser menos exacto, debido al

sesgo visual en que puede irrumpir el interesado. En este caso es recomendable apoyarse de una regla o algún otro elemento recto de tal forma que minimice el error.

Para tener mayor exactitud en el cálculo de textura del suelo, además de llevar las muestras a un laboratorio de suelos, es recomendable usar tamices de los números 140 y 270 con una abertura de 0.1mm y 0.05mm respectivamente.

Es necesario adaptar el manual de la USLE o MUSLE desarrollado por white Wischmeier y Smith (1978), haciendo investigaciones teórico prácticas de suelos en Colombia, ya que hay una gran diferencia de materia orgánica entre los suelos de Estados Unidos y los suelos de Colombia.

Para determinar con mayor exactitud la susceptibilidad de perdida de suelo, es aconsejable aumentar el número de muestreos o sitios a muestrear, para tener una mayor confiabilidad en los resultados del K de erosionabilidad.

Referencias Bibliográficas

- FAO. (s.f.). *Métodos Sencillos Para La Acuicultura*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm [citado 2 de marzo de 2019]
- Franco, Sanchez, Gómez, Otero, & Slamanca. (2015). Estudio nacional de la degradacion de suelos por erosion en Colombia. *IDEAM, Vol 2, No 2*, 13-22.
- IDEAM. (2004). Estudio Nacional del Agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. Informe Anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. *Instituto de Hidrología, M. y. E. A. -I. Bogotá, IDEAM: 162., Vol 3 No. 4*, 109-112.
- IDEAM. (s.f.). *Suelos Colombia*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/sueloscolombia>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi . (2013). *Guía de muestreo*. IGAC.
- Mancilla, G. (2008). *Uso y conservación de suelos: Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal*. Chile.
- Molano, J., & Batista, J. M. (2007). Calendario climatológico aeronáutico colombiano. *Sociedad Geográfica de Colombia* 25, 1-9.
- Pérez, U., & López, R. (2000). En Un Inceptisol De Los Andes. *Forest*. 44, 11-19.
- Puentes, R. (1983). *Una metodología para evaluar la capacidad de uso de las tierras: primeros resultados* (IICA Biblioteca Venezuela, . Obtenido de <http://books.google.com/books?id=geUqAAAAYAAJ&pgis=1>

Sadeghi, S. H., Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., & P., S. (2014). Revue de l'application du modèle MUSLE à travers monde. . *Hydrological Sciences Journal*. 59 , 365–375.

Sustituye, R. (Agosto de 2015). *A La Edición De Julio De, "México realización de pruebas Lefranc guía CFE 10000-73*. Obtenido de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/t/10000-73.pdf>).

Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. . *United States Department of Agriculture, griculture handbook N° 537.*, 58 .

Apéndices

Apéndice A Tabla de texturas para cada punto de muestra.

Puntos de muestra	%Arenas G	%Arenas MF	%Limo	%Arcilla	Textura
0	90	4	4	2	Arenoso
1	59,9	10,1	20	10	Franco arenoso
2	51,7	14,3	22	12	Franco arenoso
3	44	26	18	12	Franco arenoso
4	60,2	9,8	18	12	Franco arenoso
5	33,4	22,6	20	24	Franco arcillo arenoso
6	56,7	11,3	16	16	Franco arenoso
7	53,3	16,7	24	6	Franco arenoso
8	61,3	14,7	16	8	Franco arenoso
9	59,3	16,7	16	8	Arenoso
10	68,4	7,6	16	8	Arenoso Franco
11	70,8	13,2	8	8	Franco arcillo arenoso
12	54,3	5,7	18	22	Franco arcillo arenoso
13	50,7	15,3	14	20	Franco arenoso
14	66,1	11,9	10	12	Franco arenoso
15	64,2	11,8	12	12	Franco arenoso
16	56,9	13,1	12	18	Franco arenoso
17	55,1	12,9	16	16	Franco arenoso
18	65,8	8,2	14	12	Franco arenoso
19	77,6	10,4	4	8	Franco arenoso

Apéndice B. Tabla de materia orgánica para cada punto de muestra.

Puntos de muestra	%MO	%MO Usado
0	1,21	1
1	4,91	4
2	8,17	4
3	2,00	2
4	1,16	1
5	3,02	3
6	1,10	1
7	19,65	4
8	12,60	4
9	15,52	4
10	0,86	1
11	2,74	3
12	1,88	2
13	2,67	3
14	2,10	2
15	2,40	2
16	7,21	4
17	9,91	4
18	1,05	1
19	2,78	3

Apéndice C. Tabla de permeabilidad para cada punto de muestra.

Puntos de muestra	Conductividad hidráulica (K)	Código USLE
0	42,99	1
1	0,61	4
2	12,50	2
3	12,78	1
4	8,65	2
5	1,78	4
6	8,66	2
7	1,80	4
8	20,22	1
9	10,85	2
10	10,85	2
11	28,67	1
12	0,77	4
13	0,68	4
14	11,73	2
15	11,20	2
16	12,44	2
17	8,17	2
18	24,58	1
19	28,38	1

Apéndice D. Tabla de estructura para cada punto de muestra.

Puntos de muestra	Estructura	Código USLE
0	Bloque	4
1	Granular media gruesa	3
2	Granular media gruesa	3
3	Granular media gruesa	3
4	Granular fina	2
5	Granular muy fina	1
6	Granular medio gruesa	3
7	Granular fina	2
8	Granular fina	2
9	Granular media gruesa	3
10	Granular fina	0
11	Granular media gruesa	3
12	Granular fina	2
13	Granular muy fina	1
14	Bloque	4
15	Granular media gruesa	3
16	Granula fina	2
17	Granular fina	0
18	Granular media gruesa	3
19	Granular media gruesa	3