

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de diferentes métodos contra la prevención de la  
erosión en ríos de la costa sur de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Carmen Maria Santizo Solares  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020



**Análisis de diferentes métodos contra la prevención de la  
erosión en ríos de la costa sur de Guatemala**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de diferentes métodos contra la prevención de la  
erosión en ríos de la costa sur de Guatemala**


Trabajo de graduación presentado por Carmen Maria Santizo Solares  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

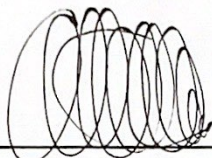
2020

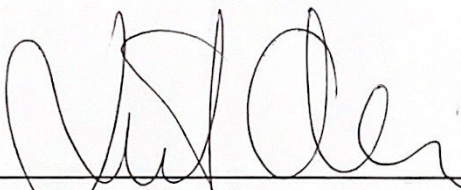


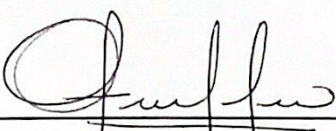
Vo.Bo.:

(f)   
Alvaro Rubio Haasler

Tribunal Examinador:

(f)   
Alvaro Rubio Haasler

(f)   
Roberto Godo Levensen

(f)   
Otoniel Echeverria

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2020.



No hay nada más satisfactorio que el esfuerzo propio, y las metas que nos definimos como individuo acorde a nuestros sueños. Primeramente, Doy infinitas gracias a Dios por permitirme cumplir uno de los sueños más grandes de mi vida, por guiarme con sabiduría, conocimiento y proporcionarme todo lo adecuado para cumplir mis metas. A mis padres Isabel Solares García y Alfredo Santizo Claveria por siempre enseñarme a esforzarme, por enseñarme a ser determinada, y dedicada en cada una de las cosas que hago. por todo el amor que siempre he recibido de ellos, ya que siempre me han enseñado a luchar por mis sueños. A mis hermanos, María Isabel Santizo y Alfredo Santizo por siempre proporcionarme ese apoyo incondicional que siempre me ha alentado a ser mejor cada día. A Javier Jo por su amor y apoyo incondicional a través de estos cinco años de carrera.

Al Colegio Capouilliez, por enseñarme el camino de la excelencia, ética y valores que han formado mi criterio a lo largo de toda mi vida como estudiante y que en complemento con la Universidad se ha logrado con éxito como futura profesional e individuo de la sociedad. A mi abuelo Adolfo Santizo que, con sus habilidades, amor y carácter me han inspirado.

A lo largo de toda mi carrera universitaria, agradezco al Ingeniero Godo, director del departamento de ingeniería civil, que como director desempeña un excelente papel ya que siempre demuestra estar interesado en cada uno de los pasos que uno da a lo largo de la carrera, que con su apoyo hemos logrado salir adelante. Al ingeniero Álvaro Rubio Haasler por ser mi asesor y proporcionarme con su ayuda todos los conocimientos necesarios para llevar a cabo esta investigación sin quien no habría podido realizar este trabajo de graduación.

De igual forma agradezco al Centro de estudio Ambientales y Biodiversidad de la Universidad por apoyarme y brindarme toda la ayuda necesaria para llevar a cabo dicha investigación. Al igual que agradezco a la Ingeniera Alma Santos, investigadora en el programa Sostenibilidad de Sistemas Productivos del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, ICC. Por confiar en mí y enseñarme con base a sus conocimientos en el área todo lo necesario para esta investigación.



<b>Prefacio</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Objeto de estudio</b>	<b>9</b>
<b>6. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>7. Marco teórico</b>	<b>13</b>
7.1. Definición de erosión . . . . .	13
7.2. Clasificación de los tipos de erosión . . . . .	13
7.2.1. Erosión por agua . . . . .	13
7.2.2. Erosión eólica . . . . .	15
7.2.3. Erosión por temperatura . . . . .	15
7.2.4. Erosión glacial . . . . .	16
7.3. Ciclo hidrológico . . . . .	16
7.4. Precipitación . . . . .	18
7.4.1. Tipos de precipitación . . . . .	18

7.4.2.	Intensidad de precipitación . . . . .	20
7.5.	La escorrentía en los suelos . . . . .	21
7.5.1.	Escorrentía . . . . .	21
7.5.2.	Escurrimiento . . . . .	21
7.5.3.	Infiltración . . . . .	22
7.6.	Pérdidas de suelo . . . . .	23
7.6.1.	Pendientes causantes de la erosión . . . . .	23
7.7.	Parámetros de suelos erosionables . . . . .	24
7.7.1.	Parámetros de las precipitaciones . . . . .	25
7.7.2.	Parámetros del suelo . . . . .	25
7.7.3.	Cubertura vegetal . . . . .	25
7.8.	Tipos de suelo . . . . .	26
7.9.	Proceso de erosión fluvial . . . . .	27
7.9.1.	Causas . . . . .	28
7.10.	Factores que intervienen en la erosión fluvial . . . . .	28
7.10.1.	Clima . . . . .	29
7.10.2.	Tipo de suelo . . . . .	29
7.10.3.	Relieve . . . . .	29
7.10.4.	El impacto de la actividad humana . . . . .	30
7.11.	Ríos . . . . .	31
7.11.1.	Origen de los ríos . . . . .	31
7.11.2.	Geomorfología de los ríos . . . . .	32
7.11.3.	Estrategias de un río para gastar su energía . . . . .	33
7.12.	Caudal . . . . .	33
7.12.1.	Tipos de flujo . . . . .	34
7.12.2.	Número de Reynolds . . . . .	34
7.13.	Metodologías para la estimación de erosión hídrica . . . . .	36
7.13.1.	Land Erodibility Assessment Methodology (LEAM) . . . . .	36
7.13.2.	Ecuación Universal de pérdida de suelos (USLE) . . . . .	38
7.13.3.	Ecuación Universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) . . . . .	41
<b>8.</b>	<b>Marco referencial</b>	<b>43</b>
8.1.	Ubicación . . . . .	43
8.2.	Geología . . . . .	44
8.2.1.	Localización y características geológicas y geomorfológicas de la costa sur . . . . .	44
8.2.2.	Geología de la cuenca Coyolate . . . . .	50
8.3.	Sistema fluvial . . . . .	50
8.4.	Relieve . . . . .	51
8.5.	Uso de la tierra . . . . .	52
<b>9.</b>	<b>Metodología</b>	<b>55</b>
9.1.	Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) . . . . .	55
9.1.1.	Factores que afectan en el resultado de la ecuación . . . . .	56
9.1.2.	Alcances del modelo USLE . . . . .	56
9.1.3.	Limitaciones del modelo USLE . . . . .	56
9.1.4.	Fin que tiene la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica . . . . .	57

9.1.5. Metodología para determinar el factor R . . . . .	57
9.1.6. Metodología para determinar el factor "K . . . . .	58
9.1.7. Metodología para determinar el factor topográfico L y S . . . . .	58
9.1.8. Metodología para determinar el factor de manejo (C y P) . . . . .	60
9.2. Caudal . . . . .	60
<b>10. Cálculos y resultados</b>	<b>61</b>
10.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) . . . . .	61
10.1.1. Cálculo de factores (USLE) . . . . .	61
10.1.2. Pérdida de suelo estimada en zona de estudio . . . . .	67
10.1.3. Caudal . . . . .	68
<b>11. Metodologías contra la erosión fluvial</b>	<b>69</b>
11.1. Descripción de metodologías . . . . .	69
11.1.1. Alfombra de refuerzo de césped de alto rendimiento (HPTRM) . . . . .	69
11.1.2. Geomanta MacMat®R . . . . .	71
11.1.3. Mantos permanentes con block de concreto adheridos . . . . .	72
11.2. Evaluación de metodologías de prevención . . . . .	73
<b>12. Conclusiones</b>	<b>77</b>
<b>13. Recomendaciones</b>	<b>79</b>
<b>14. Bibliografía</b>	<b>81</b>
<b>15. Anexos</b>	<b>83</b>
<b>16. Glosario</b>	<b>89</b>



---

## Lista de figuras

---

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Erosión en ríos . . . . .	5
2. Erosión por agua . . . . .	14
3. Erosión eólica . . . . .	15
4. Erosión por temperatura . . . . .	16
5. Erosión glacial . . . . .	16
6. Ciclo hidrológico . . . . .	17
7. Frente frío . . . . .	18
8. Frente cálido . . . . .	19
9. Desarrollo de una precipitación convectiva . . . . .	19
10. Precipitación orográfica . . . . .	20
11. Intensidad de precipitación . . . . .	21
12. Tipos de pendientes, clase y rangos de porcentaje . . . . .	24
13. Suelo perdido según el cultivo y de acuerdo a la pendiente . . . . .	24
14. Gráfica de índice . . . . .	26
15. Relieve . . . . .	30
16. Descripción del flujo laminar . . . . .	34
17. Descripción del flujo turbulento . . . . .	34
18. Ecuación número de Reynolds . . . . .	35
19. Rangos de número de Reynolds . . . . .	35
20. . . . .	39
21. Zonas fisioráficas de Guatemala . . . . .	44
22. Delimitación zona costera . . . . .	45
23. Tamaño de los sedimentos . . . . .	47
24. Columna estratigráfica simplificada de la planicie costera del Pacífico de Guatemala en frente de San José . . . . .	49
25. Planta perfil de los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate . . . . .	52
26. Tipos de superficies encontradas en la cuenca Coyolate . . . . .	52
27. Ecuación USLE . . . . .	55

28.	Indice modificado de Fournier . . . . .	57
29.	Ejemplificacion de valores R T/ha/a . . . . .	58
30.	Ecuación factor de longitud . . . . .	58
31.	Valores de m, en función de la pendiente . . . . .	59
32.	Ecuación de la estimación de inclinación de la pendiente expresada en % . . . . .	59
33.	Ecuación de la estimación de inclinación de la pendiente expresada en % . . . . .	59
34.	Ecuación combinada de ambos factores . . . . .	59
35.	Mapa de erosividad Coyolate . . . . .	63
36.	Mapa de erodabilidad Coyolate . . . . .	64
37.	Mapa de factor topografico Coyolate . . . . .	65
38.	Tipos de superficies . . . . .	65
39.	Mapa de cobertura Coyolate . . . . .	66
40.	Mapa de niveles de erosión hídrica Coyolate . . . . .	67
41.	Cuadro de decisión para evaluar las metodologías . . . . .	74
42.	Anexo 7 - “Gráfico Nomograma” . . . . .	85
43.	Anexo 8 - “Factor C - Factor vegetación” . . . . .	85
44.	Anexo 9 - “Cálculo factor LS” . . . . .	86
45.	Anexo 10 - “Factor C - Factor LS” . . . . .	86
46.	Anexo 11 - “Cálculo factor LS” . . . . .	87
47.	Anexo 12 - “Factor C - Factor LS” . . . . .	87

---

## Lista de cuadros

---

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
1. Descripción de clases y tipos de suelos . . . . .	37
2. LEAM . . . . .	38
3. USLE . . . . .	40
4. RUSLE . . . . .	42
5. Factores según tipo de superficie determinada según autores . . . . .	66
6. Caudales máximo según ICC . . . . .	68
7. Anexo 1 - “Factor C, para distintas cantidades de residuo vegetal en ton/ha aplicados a diferentes porcentajes y longitudes máximas de pendientes del terreno” . . . . .	83
8. Anexo 2 - “Factor C para terrenos con cubierta permanente (potreros)” . . . . .	83
9. Anexo 3 - “Factor C, para terrenos forestales no cultivados” . . . . .	84
10. Anexo 4 - “Factor P y distancias entre líneas guías en cultivos a nivel según la pendiente del suelo” . . . . .	84
11. Anexo 5 - “Factor P y espaciamiento de terrazas cultivo al contorno” . . . . .	84
12. Anexo 6 - “Factor P ancho máximo de fajas máximas longitud entre líneas guías a diferentes pendientes en cultivos de fajas al contorno” . . . . .	84



El estudio tiene como objetivo la evaluación de diferentes metodologías para la prevención de erosión de los ríos de la costa sur. Para poder llevar a cabo dicho estudio, se debió de estimar la erosión hídrica de una zona en específico. Siendo la cuenca del río Coyolate, en donde por medio de un sistema de información geográfica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de suelos (USLE), en la zona de la vertiente del Pacífico de Guatemala, ubicada en la costa sur. Se identificó la pérdida de suelos anual, que según la clasificación de la FAO PNUMA-UNESCO 1981 se determinó el nivel de erosión que posee la cuenca. Para el cálculo de factores, con el fin de estimar el factor de, se utilizó la información, de la erosividad y erodabilidad. Se utilizó como base el uso del suelo, Cultivo de hortalizas, Hule, Agricultura limpia Anual, Café, Caña de azúcar (ICC, 2001), posteriormente de ingresaron a Qgis los valores correspondientes a cada tipo de cultivo, con el fin de rasterizar dicha información y obtener un promedio del factor C.

Esta estimación se realizó generando y recopilando información de los diferentes factores que intervienen en el proceso erosivo y la USLE. Como base se utilizó información espacial en formato digital de diversas fuentes tales como el ICC, MAGA. Obteniendo información de la erosividad y erodabilidad del MAGA y según un modelo de elevación digital se evaluó el factor LS de la ecuación. Posteriormente para determinar el factor C, se ingresaron a Qgis los valores correspondientes a cada tipo de cultivo, con el fin de rasterizar dicha información y obtener un promedio de dicho factor. Finalmente, por medio de una herramienta del programa estimar la pérdida de suelos. Se determinó que en la parte alta de la cuenca se poseen pérdidas mayores a los 200 t/ha/a y en las partes media y bajas pérdidas menores (ICC, 2011).

Por consiguiente, se procedió a evaluar tres distintas metodologías de prevención de erosión, siendo HPTRM, Geomantas MacMat®R y Mantos Permanentes con block de concreto adheridos. En donde según las características evaluadas de cada uno y el entorno en donde se aplicaría se determinó que la metodología recomendada son los Mantos Permanentes con block de concreto adheridos.



The objective of the study is the evaluation of different methodologies for the prevention of erosion of the rivers of the south coast. In order to carry out this study, the water erosion of a specific area had to be estimated. Being the Coyolate river basin, where by means of a geographic information system using the Universal Soil Loss Equation (USLE), in the area of the Pacific slope of Guatemala, located on the south coast. The annual loss of soil was identified, which based on the classification of FAO UNEP-UNESCO 1981 the level of erosion that the basin has was determined. For the calculation of factors, in order to estimate the factor of  $C$ , the information on erosivity and erodibility was used. Soil use, vegetable cultivation, rubber, annual clean agriculture, coffee, sugar cane (ICC, 2011) was used as a basis, then the values corresponding to each type of crop were entered into Qgis, in order to rasterize said information and obtain an average of the factor  $C$ .

This estimate was made by generating and collecting information on the different factors that intervene in the erosive process and the USLE. As a basis, spatial information in digital format from various sources such as ICC, MAGA was used. Obtaining information on the erosivity and erodability of MAGA and based on a digital elevation model, the LS factor of the equation was evaluated. Later to determine the factor  $C$ , the values corresponding to each type of crop were entered into Qgis, in order to rasterize said information and obtain an average of said factor. Finally, using a program tool, estimate the loss of soils. It was determined that in the upper part of the basin there are losses greater than  $200 \text{ t / ha / y}$  and in the middle and low parts less losses (ICC, 2011).

Therefore, three different erosion prevention methodologies were evaluated, being HPTRM, Geomantas MacMat®R and Permanent Mantos with adhered concrete blocks. Where, based on the evaluated characteristics of each one and the environment where it would be applied, it was determined that the recommended methodology is Permanent Mantle with adhered concrete block.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La pérdida de suelos a causa de la erosión fluvial es uno de los fenómenos ambientales que más afectan las actividades de los agricultores, siendo uno de los primeros problemas a nivel nacional. A causa de esto se debe de tomar en cuenta que el suelo es un recurso renovable que merece ser conservado y preservado adecuadamente, con el fin de mantener sus niveles de profundidad y fertilidad.

La erosión fluvial es el efecto del desgaste de la superficie terrestre que tiene el agua de los ríos. De otra forma, es la manera en la que el agua impacta en la tierra, ya sea fluyendo en corrientes subterráneas o en la superficie, que consecuentemente arrastra sedimentos, alterando la distribución que posee la corteza terrestre. Este fenómeno está compuesto de tres procesos: desprendimiento de las partículas del suelo, transporte por el agente erosivo y la sedimentación. Las pérdidas tanto económicas como humanas a causa de la erosión hídrica del suelo, pueden alcanzar niveles significativos, por lo que se determina que es necesario tomar medidas oportunas, que ayuden a mejorar los procesos asociados o disminuir las consecuencias negativas.

En Guatemala, las cuencas que drenan hacia el océano pacífico son las más a ser erosionadas y las que tienen las más altas pérdidas de suelo; esto debido, a la presencia de suelos volcánicos, los cuales son altamente erosivos, fuertes pendientes y mayor intensidad de lluvias, cabe mencionar las altas concentraciones de población. La erosión fluvial, es un fenómeno que tiene un impacto significativo en los lugares que se encuentren alrededor del río, afectando a poblados, cultivos, entre otras cosas más, ya que el agua es uno de los principales factores erosivos de nuestro planeta. Se sabe que cada río posee su comportamiento, y el impacto que tiene cada uno en su entorno es distinto. En Guatemala debido a los comportamientos de las precipitaciones observados durante la época de invierno, se pretende evaluar el impacto de la erosión fluvial en la región de la costa sur.



Según estudios realizados por el instituto privado de investigación sobre Cambio Climático, se reporta que en Guatemala la vertiente del Pacífico es la más erosionada la cual consta de una pérdida de 710 t/ha/año, luego le sigue la vertiente del Golfo de México con 330 t/ha/año y por último la vertiente del atlántico que consta de 122 t/ha/año (ICC, 2016). Por lo cual de acuerdo con la clasificación de los niveles de erosión hídrica PNUMA-UNESCO 1981 se clasifica de menor a 10 t/ha/a como casi nula o ligera, de 10-50 t/ha/a moderada, de 50-200 t/ha/a fuerte y mayor a 200 t/ha/a, por lo que estas tasas tienden a ser muy fuertes y fuertes. Estudios hechos por Leiva, 2017 (Leiva, 2017) establecen que la erosión hídrica es la principal forma de degradación de los suelos agrícolas; el promedio nacional de pérdidas de suelos registradas en el país alcanza los 149 millones de toneladas anuales, los cuales representan un valor monetario de 727 millones de quetzales (Leiva, 2017).

Varias instituciones tales como La Agroindustria Azucarera Guatemalteca (AIA) se suma a los esfuerzos tanto nacionales como internacionales. Contando con el apoyo de instituciones como el centro guatemalteco de investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA) y el instituto privado de investigación sobre el cambio climático (ICC) han apoyado distintas investigaciones en donde se llevan a cabo estudios de erosión hídrica en las zonas más vulnerables o que se encuentran susceptibles a dicho fenómeno (ICC, 2011). El instituto privado de investigación sobre el cambio climático ICC ha sumado esfuerzos desde el 2012 para el desarrollo de estudios con el fin de estimar tasas de erosión hídrica, para que así se validen estructuras y prácticas de conservación de los suelos que algunos de sus socios han implementado.

El área de estudio se encuentra ubicada sobre la cuenca del río Coyolate, el cual forma parte de la vertiente del pacifico de Guatemala. Estudios desarrollados en la zona de estudio han sido aplicados con el fin de disminuir el riesgo de erosión hídrica. Evalúa los criterios de diseño considerados para la construcción de obras de conservación de suelos y las experiencias obtenidas, desde un punto de vista técnico-científico que busca mejorar la gestión de los suelos en la zona, en donde se determinó las tasas de erosión en un lapso de tiempo determinados, para que posteriormente se demostrara que la aplicación de la metodología

de acequias de ladera son estructuras de conservación de suelos, que pueden utilizarse en el manejo y conservación de los suelos (ICC, 2016).

ICC indica que el incremento de episodios extremos de precipitación que producen calamidades es un hecho. Establece que, en Guatemala en los últimos 15 años, se han registrado 4 episodios extremos de precipitación que han producido calamidades. Hasta la fecha se han desarrollado algunos estudios que tratan de predecir los efectos de dichas calamidades para que posteriormente se delimiten zonas de riesgo. Además, dicha institución en conjunto con la carrera de agronomía Tropical de la Universidad de San Carlos de Guatemala Campus Sur Occidente CUNSUROC y el Ingenio Pantaleón, han desarrollado la erosión causada por escorrentía en dicha zona.

Actualmente se han realizado alianzas de la borda del río Coyolate que busca priorizar los trabajos de mitigación para la reducción de riesgos, Profesionales por parte del Instituto Privado sobre Cambio Climático (ICC), representantes de la Agroindustria azucarera, bananera y palmera, y líderes comunitarios. se han reunido en las primeras semanas del 2020, con el fin de establecer una alianza con el nombre "Alianza de la borda del río Coyolate". Líderes Comunitarios, personal de la municipalidad y representantes del sector privado, han realizado recorridos por el río en conjunto con profesionales del ICC, con el fin de visitar los puntos más vulnerables.

Actualmente, en Guatemala se posee poca información acerca de la erosión en ríos de la costa sur, lugar en donde se ha desarrollado este fenómeno significativamente debido a la topografía que posee el país. Es por ello, que se busca el estudio de distintas metodologías que busquen satisfacer esta necesidad que afecta no solo a las comunidades que se encuentran en la costa sur, sino que cambien a las industrias que se ven afectadas por este fenómeno.

Figura 1: Erosión en ríos.



Fuente: (Anónimo, 2013)

Dentro de las metodologías que se describirán todas hacen uso de información principalmente, climática y edáfica. En el país la disponibilidad de esta información es limitada, ya que existen alrededor de 30 estaciones meteorológicas que registran datos climáticos a nivel nacional. Además, se cuenta con pocos estudios edafológicos recientes o con información precisa. Por lo anterior se sugiere que la utilización de metodologías o modelos que estimen pérdidas de suelo y riesgos de erosión, basadas en datos climáticos y estudios edafológicos complejos a nivel de diferentes espacios geográficos, es limitado y costoso, por lo que se hace necesario contar con información detallada, que actualmente no se encuentra disponible. Es por ello que, es imprescindible la utilización de metodologías que hagan uso de información limitada para la estimación de áreas que posean riesgos a erosión hídrica.

Este trabajo de investigación propone el estudio de un área en específico de la costa sur, en donde se vaya a estudiar la pérdida de suelo a través de una metodología, estableciendo el impacto que este tiene en su entorno tanto en pérdidas humanas como económicas. Con el propósito de determinar una metodología de prevención para poder mitigar la erosión hídrica que se tiene en el área, en virtud de que ya han sido validas dentro del área y otras cercanas al sitio de interés.

### 4.1. Objetivo general

Determinar y evaluar el método contra la erosión fluvial más eficiente aplicable a las características de los ríos de la costa sur en Guatemala.

### 4.2. Objetivos específicos

- Describir los distintos tipos de erosión fluvial que existen en la costa sur de Guatemala.
- Evaluar las problemáticas existentes a partir de casos históricos con el fin de determinar una solución viable contra la erosión fluvial.
- Determinar el comportamiento histórico de la erosión fluvial se tiene de los ríos de la costa sur de Guatemala.
- Comparar las diferentes metodologías propuestas de control de erosión aplicable a la problemática identificada.



## CAPÍTULO 5

---

### Objeto de estudio

---

El río Coyolate se ubica en la vertiente del Océano Pacífico, en el suroeste de Guatemala, la cuenca hidrológica abarca una superficie de 1.616 km<sup>2</sup>, la cual forma parte de los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Chimaltenango. Posee una altura superior a los 2,000 metros hasta que llega a los tramos medio y bajo, sobre la costa de 200 msnm, el cauce principal del Coyolate posee una longitud de 150 km.



La finalidad de este estudio, es evaluar metodologías en contra la erosión fluvial. Las cuales acorde al entorno y las características que poseen, resulte ser una medida efectiva en contra dicho fenómeno. Para el control de erosión, existen diversas metodologías como la RUSLE, LEAM y USLE. Para fines aplicativos en el área, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), nos proporciona estimaciones adecuadas. Esto debido a la facilidad de su aplicabilidad y proporciona estimaciones a largo plazo, lo que nos dice que resulta ser un buen indicador para estimar los valores de pérdida. De manera similar, busca trabajar con la con esta ecuación con el fin de estimar las pérdidas de suelos en un área en específico. De manera que se pueda clasificar, para que posteriormente con base a las características de la zona de estudio se evalúen tres distintas metodologías de control de erosión.

Inicialmente, tras el análisis de los parámetros que puedan generar riesgo, según la metodología de cálculo, se verificarán los niveles de erosión potencial para que posteriormente se realice un análisis de las distintas soluciones contra este fenómeno y así proporcionar en dicha área una solución efectiva y adecuada en torno a las condiciones en las que se encuentra. Para lograrlo, se crearán modelos de elevación digital, de cada uno de los factores estimados de la ecuación, los cuales nos permitan identificar las zonas de mayor riesgo y que, a futuro se puedan visualizar cambios significativos en la evolución del fenómeno de la erosión.

Como resultado, se definirán tres metodologías que se estimen aplicables a la zona y con base a las características que ofrezca cada una de las mencionadas, se evalúen y se estime la que sea efectiva proporcionando de acuerdo a sus características un control óptimo y eficiente del fenómeno generado, Sin embargo, este análisis se define como uno cualitativo ya que toma en cuenta las características de disponibilidad de materiales, mano de obra, funcionamiento y demás que se definirán en los apartados posteriores.



### 7.1. Definición de erosión

Los tipos de erosión depende directamente del agente natural que lo causa, sea el agua o el viento los elementos que más afectan en este fenómeno. Como en todo proceso en las superficies terrestres, la fuerza de gravedad posee un impacto muy importante (Cajal, 2019). Se sabe que además del agua y el viento existe otros tipos de siendo el hielo, la temperatura, la lluvia y el movimiento de las olas. También se tiene establecido que algunas de las actividades humanas, tales como la agricultura, la deforestación y el pastoreo pueden generar un incremento en el impacto de la erosión al medio ambiente.

Se tiene que el concepto de erosión también involucra desde el proceso de desgaste y el moldeo del suelo o de las cortezas rocosas del paisaje geográfico en su posición original, hasta el transporte de todos los materiales removidos por acción de los agentes involucrados.

La mayoría de los materiales del suelo removidos de esta forma son escombros de roca o tierra, que de forma gradual se van disminuyendo hasta ser cuerpos pequeños mientras estos son transportados (Cajal, 2019).

### 7.2. Clasificación de los tipos de erosión

#### 7.2.1. Erosión por agua

El agua que se encuentra en movimiento o escurriendo es el agente erosivo con más importancia de todos los que existen. Esto se debe a que el agua se caracteriza por ser una de las fuerzas más poderosas. Por la acción del agua, existen tres tipos de erosión:

Figura 2: Erosión por agua



Fuente: (Anónimo, 2013)

- **Fluvial:**

Este tipo de erosión generalmente es causada por la acción que ejerce la fricción o el roce constante del flujo del agua, según el arrastre de sedimentos de tierra en el cuerpo de agua del río. Actuando como un instrumento de erosión desgastándose unas a otras o superficies de tierras y rocas. Y así sucesivamente, este desgaste remueve más sedimentos mientras la velocidad y volumen del flujo incrementa.

En afluentes que se encuentren en suelos más áridos o duros, tanto el crecimiento como el constante flujo de agua y la disminución de su cauce, van tallando en la superficie un canal cada vez más ancho o profundo.

- **Precipitaciones:**

Las superficies de la tierra que no se ven afectadas por los ríos, se encuentran en una constante fuerza de erosión por la acción de las lluvias. Se tiene establecido que la erosión bajara su impacto en áreas en donde el suelo está protegido por árboles como los cuerpos de bosque o selva. De forma que el agua cae sobre la tierra menos agresiva lo cual permite que el suelo vaya filtrando y absorbiendo de manera natural. Sin embargo, en zonas inclinadas puede haber desplazamientos de sedimentos que consigo lleven tierra pudiendo arrastras rocas y árboles.

En suelos desnudos, se conoce el fenómeno de “erosión por salpicadura”, que consiste en que las gotas de lluvia pueden impactar con la suficiente fuerza de tal forma que rompa su estructura y genere la erosión. Al tener fuertes salpicaduras en la superficie, se pueden tapar los poros naturales de la tierra en donde se filtra y absorbe el agua. De forma que el agua se acumula en la superficie y se vuelve una escorrentía que por la gravedad se va llevando la tierra con ella, siendo esta erosión superficial. La lluvia en suelos desnudos puede generar efectos como zanjas, túneles y hasta canales.

- **Oleaje:**

Es la erosión que se tiene en las costas en producto en la mayor parte de la acción que generan las olas del mar. El impacto que posee el agua en conjunto con el impacto de los sedimentos, la abrasión de las partículas, piedras transportadas por el vaivén de las olas, van desgastando las orillas. Este efecto es más evidente en zonas en donde la fuerza de las olas va impactando gradualmente las paredes de los acantilados, mostrando el lecho de la roca. A causa de esta acción existen formas rocosas.

### 7.2.2. Erosión eólica

Conocido también como desertificación, es el desgaste y degradación de tierras áridas y rocosas. Su acción es el viento, se clasifica como uno de los elementos menos agresivos y que su impacto es gradual, es decir que pueden tardar años. Ocurre cuando los vientos fuertes soplan sobre suelos áridos y desprotegidos de vegetación o con poca vegetación. El viento transporta arena y partículas pequeñas de rocas que generan el desgaste de las superficies rocosas del terreno. Esto hace que las rocas poco a poco se fracturen y liberen partículas de aire, aumentando en el viento el factor erosivo. Con el traslado de materiales de un lado a otro, se van moldeando suelos y montañas. En zonas arenosas, el viento desplaza de forma fácil los cuerpos de arena como o dunas, pudiendo cambiar el paisaje completamente en cuestión de días u horas.

Figura 3: Erosión eólica



Fuente: (Anónimo, 2013)

### 7.2.3. Erosión por temperatura

Es un tipo de erosión que se desarrolla por los cambios de temperatura debido a la exposición de las superficies terrestres a luz solar. Las grietas que se generan en las rocas comprometen a la estructura que la mantiene unida por lo que con el tiempo se va separando lo suficiente para que la acción del suelo o gravedad las mueva.

Figura 4: Erosión por temperatura



Fuente: (Anónimo, 2013)

#### 7.2.4. Erosión glacial

La erosión glacial se desarrolla cuando las placas de hielo se desplazan ladera abajo en una pendiente. Al desplazarse el peso del suelo ejerce un efecto triturador sobre el mismo, cavando el suelo con fuerza. También, debido a la fuerza el hielo puede traerse porciones de roca del suelo al desplazarse que probablemente quedaron cubiertas de hielo y formas parte del cuerpo del glaciar. Siendo de esta forma de desgastar el suelo.

Figura 5: Erosión glacial

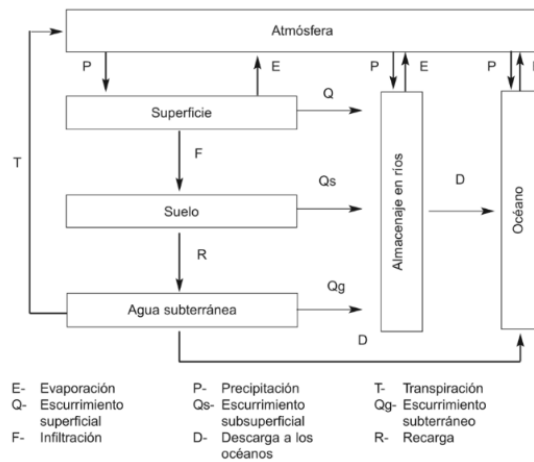


Fuente: (Anónimo, 2013)

### 7.3. Ciclo hidrológico

Se establece como ciclo hidrológico al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma sea agua superficial, agua subterránea, etc. (Béjar, 2004). Conforme el paso de los años se han sugerido distintos esquemas sobre el ciclo hidrológico; con el fin de proporcionar un gráfico sencillo que muestre las distintas formas y estados en las que se puede encontrar el agua en la tierra.

Figura 6: Ciclo hidrológico



Fuente: (Béjar, 2004)

Como todo ciclo, el ciclo hidrológico no posee fin ni principio, su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, lagos, mares y ríos, se evapora gracias al efecto de la radiación solar y viento. El vapor que resulta se transporta por medio de masas de aire en movimiento. En algunas ocasiones el vapor se condensa y forma nubes que, a su vez, llegan a ocasionar precipitaciones que caen a tierra.

Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua que se precipita puede volver a evaporarse, o puede ser captada por plantas o las construcciones para luego fluir por la superficie hasta las corrientes, o se infiltra. El agua que cae una parte es interceptada y una parte infiltrada y se la que se escurre por la superficie se evapora nuevamente. De las precipitaciones llega hacia las corrientes, una parte se infiltra y otra llega a los océanos y otras formas de masas de agua grandes como los lagos por medio de escurrimientos en las corrientes de los ríos.

El agua que logra infiltrarse, esto dependiendo de la capacidad de cada suelo, abastece a los depósitos subterráneos, de donde puede fluir hacia las corrientes de los ríos, o bien generar descargas hacia los océanos; lo que queda retenida en la capa vegetal del suelo regresa a la atmósfera por medio de transpiración.

El ciclo hidrológico es de básica importancia para delimitar el campo de la hidrológica, la cual comprende la fase entre las precipitaciones y su retorno a la atmósfera o por medio de escorrentía hacia el océano (Béjar, 2004).

## 7.4. Precipitación

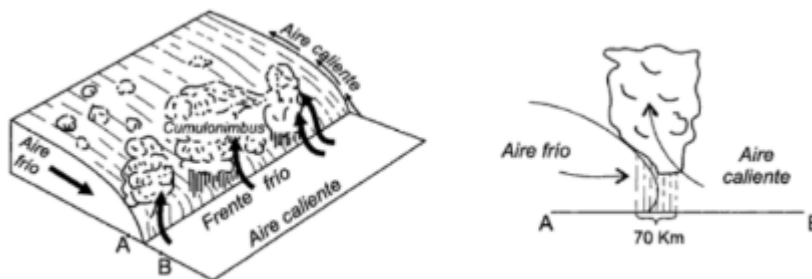
La precipitación es la caída de partículas líquidas o sólidas de agua. La precipitación forma parte del ciclo hidrológico que origina todas las corrientes superficiales y profundas, esto debido a lo cual su evaluación y conocimiento de su distribución, tanto en el espacio como en el tiempo, son problemas que son básicos en la hidrología (Maderey Rascon & Colaborador, 2006).

### 7.4.1. Tipos de precipitación

#### Precipitación ciclónica

La precipitación ciclónica está asociada al paso de una perturbación ciclónica. se presentan de dos formas: frontal y no frontal. La precipitación frontal puede ocurrir a partir de cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión. El tipo de precipitación frontal se asocia a un frente cálido o frío. En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío, en donde genera nubosidad de gran desarrollo vertical que va acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo. La precipitación derivada del frente frío generalmente es tormentosa, extendiéndose poco hacia adelante del frente.

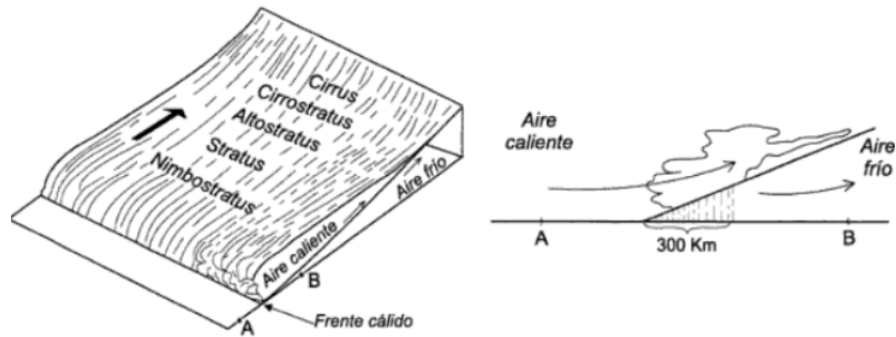
Figura 7: Frente frío



Fuente: (Maderey Rascon & Colaborador, 2006)

En los frentes que son cálidos el aire caliente asciende con relativa suavidad sobre la cuña fría, generalmente de escasa pendiente, en donde se desarrolla una nubosidad más estratiforme que en el frente frío, por lo tanto, poseen lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero con menor intensidad instantánea.

Figura 8: Frente cálido

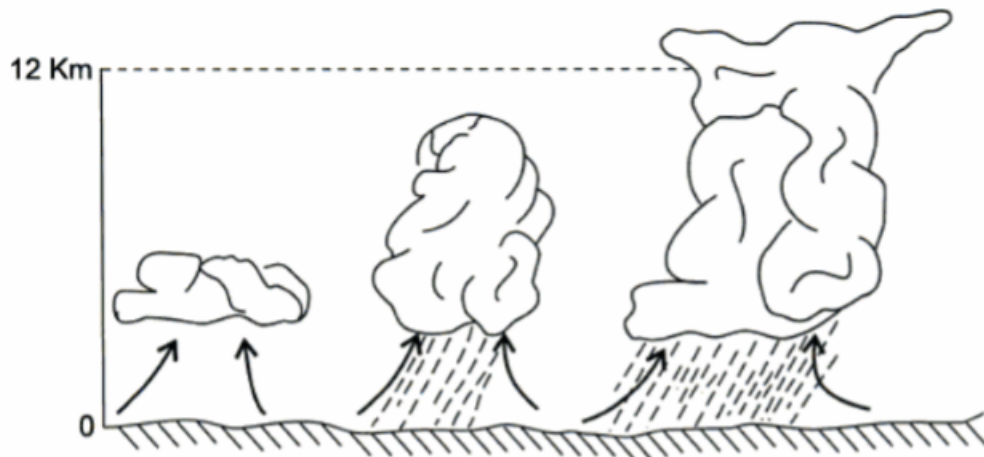


Fuente: (Maderey Rascon & Colaborador, 2006)

### Precipitación convectiva

La precipitación convectiva tiene origen debido a la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, y está se enfría, se condensa y se forma nubosidad del tipo , que es el origen de las precipitaciones en forma de chubascos o tormentas (Maderey Rascon & Colaborador, 2006). El ascenso de la masa de aire es debido, generalmente, a un mayor calentamiento en la superficie.

Figura 9: Desarrollo de una precipitación convectiva

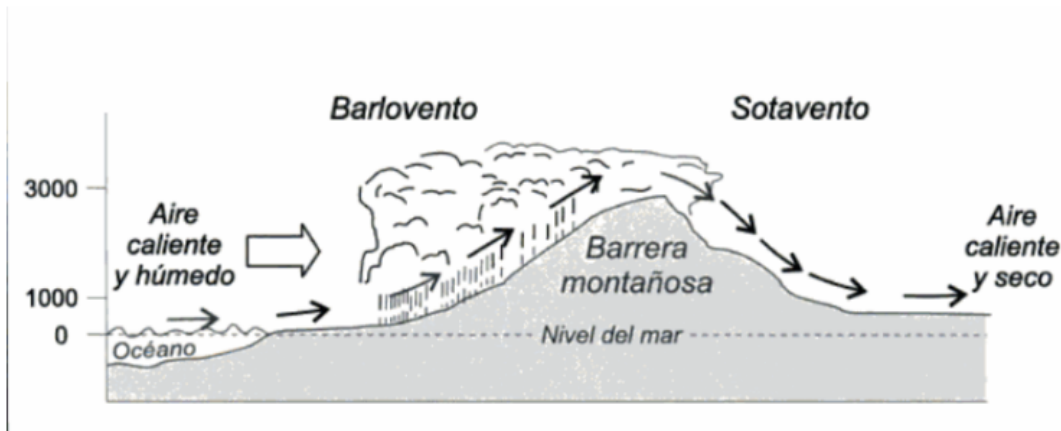


Fuente: (Maderey Rascon & Colaborador, 2006)

### Precipitación orográfica

Este tipo de precipitación tiene su origen en el ascenso de una masa de aire forzado por una barrera montañosa (Maderey Rascon & Colaborador, 2006).

Figura 10: Precipitación orográfica



Fuente: (Maderey Rascon & Colaborador, 2006)

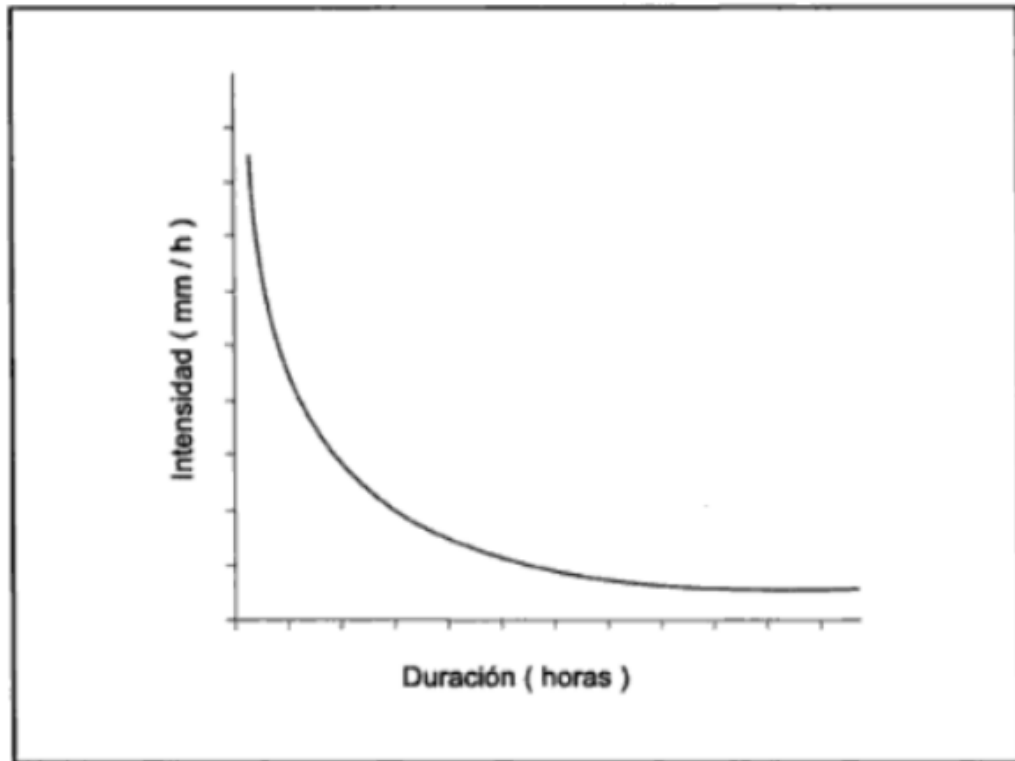
Algunas veces, en caso de una masa de aire que sea inestable, el efecto orográfico no supone más que el mecanismo de disparo de la inestabilidad convectiva. Posee la característica de que la precipitación será mayor en barlovento y disminuye rápidamente a sotavento. En las cadenas montañosas que sean importante, el máximo de precipitación se desarrolla antes de la divisoria o parte aguas. A veces, con menores altitudes, el máximo se llega a producir pasada ésta, esto debido a que el aire continúa en ascenso.

#### 7.4.2. Intensidad de precipitación

La intensidad de una precipitación suele medirse en milímetros por hora, esto quiere decir, precipitación por unidad de tiempo. Cuando se habla de precipitaciones muy intensas se habla de milímetros por minuto. Se tiene establecido que los valores más altos de precipitación registrados en el mundo han llegado a superar los 1000 mm en un día, y se ubicaron en Baguío, Filipinas, con alrededor de 1168 mm y en Teherrapundji, India, con alrededor de 1036 mm en 24 horas consecutivas (Maderey Rascon & Colaborador, 2006). Los casos anteriormente mencionados corresponden a un ciclón tropical y a una lluvia monzónica, respectivamente.

Al analizar todos los aguaceros que ha habido en un período suficientemente largo, resulta que los de mayor intensidad son los más breves, las de mayores intensidades sólo se dan en un período de tiempo muy corto, a medida que el tiempo del aguacero es mayor, la intensidad media del mismo va disminuyendo.

Figura 11: Intensidad de precipitación



Fuente: (Maderey Rascon & Colaborador, 2006)

La variación de la intensidad de las precipitaciones durante el curso del día, se afirma que en las precipitaciones debidas a los efectos convectivos propios de primavera, representativas de situaciones de inestabilidad, juega un papel que es muy importante durante el día, En las regiones continentales interiores la hora en la que se da el máximo de precipitación llega a coincidir en la mayor parte de las ocasiones con el máximo de temperaturas; a diferencia de las zonas costeras en donde las precipitaciones más intensas generalmente se desarrollan durante la noche (Maderey Rascon & Colaborador, 2006).

## 7.5. La escorrentía en los suelos

### 7.5.1. Escorrentía

Flujo de agua, el cual es producto de la lluvia que cae al suelo y que circula por medio de surcos, canales o cárcavas, hacia el drenaje principal de la cuenca. (Morocho, 2008).

### 7.5.2. Escurrimiento

Es la parte de la precipitación que aparece en las corriente superficiales fluviales, del tipo perennes, intermitentes o efímeras, y retorna al mar o a los cuerpos de aguas interiores (Morocho, 2008). Es decir, que es el deslizamiento virgen del agua, el cual no ha sido afectado por obras superficiales hechas por el hombre. De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en donde se desarrolla el escurrimiento.

El escurrimiento se puede dividir a partir de lo siguiente:

- Escurrimiento superficial o escorrentía: Parte del agua que escurre sobre el suelo y luego por medio de los cauces de los ríos.
- Escurrimiento subsuperficial: Parte del agua que se desliza por medio de los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento entra rápidamente a formar parte de las corrientes que son superficiales y a la otra le toma tiempo unirse a ellas
- Escurrimiento subterráneo: Parte del agua que debido a una profunda percolación del agua que se infiltra en el suelo, este se lleva a cabo en los mantos subterráneos y que, luego, generalmente, se descarga a las corrientes fluviales. A la parte de la precipitación que contribuye de forma directa al escurrimiento superficial se le llama precipitación en exceso.

El escurrimiento del tipo subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el escurrimiento base de los ríos. La parte del escurrimiento que entra rápidamente en el cauce de las corrientes es a lo que se llama escurrimiento directo y es igual a la suma del escurrimiento subsuperficial más la precipitación que cae directamente en los cauces. (Morocho, 2008)

El escurrimiento superficial y la porción de la precipitación en exceso que se dirige hacia las corrientes, lagos y océanos debido a movimientos gravitacionales. Este remueve, deposita y transporta las partículas de suelo desprendidas por las gotas de lluvia y él es responsable directo de todas las formas de erosión hídrica.

Al caer el agua proveniente de la lluvia, esta se une o se propaga en la superficie del suelo para producir un "escurrimiento difuso", que se define como el desplazamiento corto que experimentan las partículas que son transportadas por el agua superficial, aún en terrenos de pendientes suaves y con cobertura vegetal. Cuando este escurrimiento difuso es intenso y corresponde a un arrastre que es uniforme casi imperceptible de delgadas capas de suelo, bajo la acción de un manto de agua, se conoce como escurrimiento laminar.

Este escurrimiento difuso se convierte en "concentrado", al momento de no producirse un escurrimiento no uniforme sobre toda la superficie, sino que este se concentra en filetes líquidos, cuyo caudal y velocidad son suficiente para generar una acción erosiva. Este escurrimiento muy intenso del agua se concentra en surcos paralelos que al profundizan entre sí dando lugar a formarse cárcavas (Maderey Rascon & Colaborador, 2006).

### 7.5.3. Infiltración

Se conoce como infiltración a la velocidad máxima con la que el agua penetra el suelo. La capacidad de la infiltración va a depender de muchos factores; un suelo que es desagregado y permeable tendrá una capacidad de infiltración mayor que un suelo arcilloso y compacto (Maderey Rascon & Colaborador, 2006). Si una gran parte de los poros del suelo ya se encuentran saturados, la capacidad de infiltración del suelo va a ser menor a diferencia que si la humedad del suelo es relativamente baja. Si los poros del suelo en las capas superiores del mismo ya se encuentran saturados, la infiltración se realizará en función de la permeabilidad de los estratos que se encuentren en el inferior. Una precipitación intensa

puede provocar la colmatación de los poros superficiales, con partículas finas del suelo, reduciendo así la infiltración.

## 7.6. Pérdidas de suelo

Se tiene establecido por (Morgan, 1994) que la erosión es un proceso natural, pero su distribución en tiempo y espacio es el resultado de actividades humanas y físicas. Desde que la tierra se cultivó por primera vez, la erosión del suelo por el viento y el agua ha sido una problemática latente.

(Blum y col., 1994), indican que la armonización ecológica y espacial definen el uso sostenible del territorio, considerando que el suelo desempeña seis funciones que son básicas. Pero no siempre complementarias, que entran en la competición cuando el hombre utiliza el territorio, estas funciones se describen a continuación:

- Como soporte físico para el correcto desarrollo en las actividades socioeconómicas.
- Como finalidad principal que el suelo actúe como filtro, medio taponador y transformador protegiendo al medio ambiente, en especial a la cadena alimentaria y aguas subterráneas.
- Como medio que protege la herencia cultural que posee en forma de evidencias paleontológicas y arqueológicas.
- Como base para la vida humana y animal, producción de biomasa, suministro de alimentos, energía renovable y materias primas.
- Fuente de materias primas, suministrando arcillas, agua, gravas, minerales, gravas y otros.
- Servir como medio protector de los numerosos organismos del suelo y de reserva genética.

Uri Lewis (1998) mencionan que los impactos de la erosión que se encuentran fuera de la zona de origen afectan área que están colindantes en donde las personas afectadas tienen ninguna o poca influencia sobre la zona donde se genera la erosión.

### 7.6.1. Pendientes causantes de la erosión

Generalmente se podría esperar que aumente la erosión debido a la inclinación y la longitud de la pendiente, esto como resultado del incremento de las velocidades y volúmenes de la escorrentía superficial, ya que un terreno en pendiente más partículas son salpicadas abajo que arriba, de manera que aumenta la proporción en función de la pendiente (Morocho, 2008).

Figura 12: Tipos de pendientes, clase y rangos de porcentaje

Clase	Rango (%)	Tipos de pendientes
1	0-5	Pendientes planas
2	5-12	Pendientes ligeramente onduladas
3	12-25	Pendientes medianamente ondulada
4	25-50	Pendientes onduladas
5	50-70	Pendientes fuertes
6	>70	Pendientes extremadamente fuertes

Fuente: (Morocho, 2008)

La erosión en suelos, se da, principalmente en las zonas con pendiente, mientras mayor sea el ángulo de inclinación, mayor va a ser la erosión que vaya a sufrir el suelo, el agua poco a poco va comiendo las capas fértiles de tierra. Otras causas que hoy son más controlables son el uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes, al igual que el abandono de las tierras.

La erosión que se desarrolla en las fronteras agrícolas es muy severa, pero con el tiempo los agricultores tomaron medidas en contra de la erosión del suelo, de tal forma que llegaron a capacitarse para tomar medidas en contra de la erosión del suelo tomando el conocimiento necesario, en el siguiente cuadro se describe la pérdida del suelo en función de la pendiente y sistema de producción (Morgan, 1994).

Figura 13: Suelo perdido según el cultivo y de acuerdo a la pendiente

Cultivo	Pendiente %	Lámina perdida (mm)	Densidad aparente (dap)	Suelo perdido T/ha/año
Sin cobertura	10	14,5	1,11	160,95
Maíz	15	11,5	1,18	135,70
Sin cobertura	5	9,4	1,10	103,40
Fréjol V.	10	8,4	1,04	87,36
Maíz	7	7,0	0,99	69,30
Fréjol V.	2	6,7	1,07	71,69
Frutales	5	6,6	1,06	69,96
Frutales	4	1	0,89	8,90

Fuente: (Morocho, 2008)

## 7.7. Parámetros de suelos erosionables

Se establece que todos los modelos que son empíricos depende de una base de información reunida sobre unos pocos parámetros básicos; se realizará un breve análisis de algunos de los métodos utilizados con el fin de obtener esos datos.

### 7.7.1. Parámetros de las precipitaciones

Los parámetros de las precipitaciones para la medición de la cantidad de lluvia se describen de manera adecuada en todos los manuales de meteorología, se describen consejos prácticos para las actividades de campo. Por lo que la intensidad de lluvia se puede medir por medio de instrumentos que son especialmente diseñados con el objetivo de registrar constantemente la cantidad de lluvia. Pero regularmente la fuente de donde se obtiene información es el cálculo que se realiza por medio de diagramas de los registradores de las precipitaciones tal cual como se describe en (J. A. Hudson, 1981). Al igual que la energía de lluvia se puede medir directamente por medio de transductores o de materiales piezoeléctricos. O por medio de dispositivos que utilizan la acústica con un diagrama para convertir la energía en acústica que es medible.

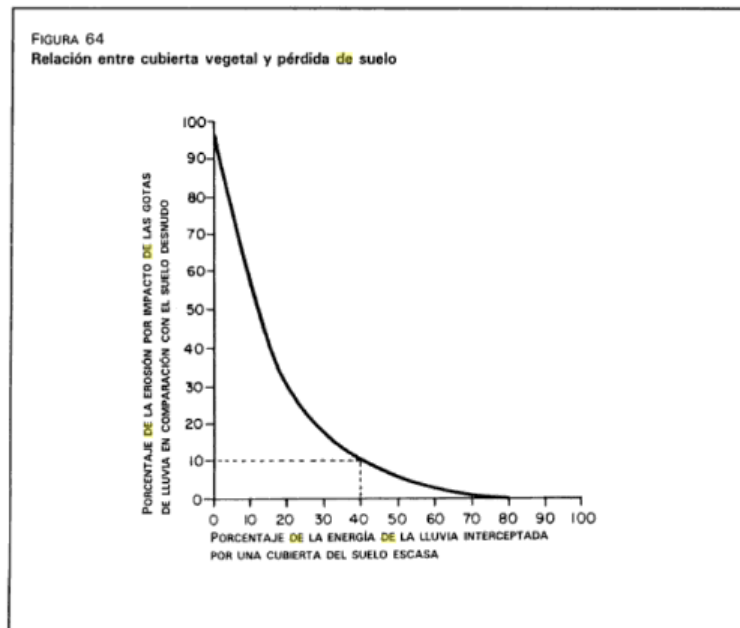
### 7.7.2. Parámetros del suelo

Actualmente se han desarrollado diversos métodos para calcular la del suelo, partiendo de propiedades que se estudian en un laboratorio siendo alguna la dimensión de las partículas y la estabilidad del material. Para que se pueda utilizar la ecuación universal de la pérdida de suelo se desarrolló una ecuación empírica utilizando seis componentes los cuales son: porcentaje de materia orgánica, porcentaje de limo más arena muy fina, estructura del suelo, permeabilidad y porcentaje de arena. Que se han plasmado en forma de un nomograma que es fácil de utilizar. La base de datos correspondiente estaba constituida por trece suelos típicos en los Estados Unidos, pero según (Vanelslande y col., 1984) se han manifestado serias dudas acerca de la aplicabilidad en los suelos de Hawái, Nigeria y Tanzania. Al igual que ocurre con la. Se sabe que las mediciones directas en el campo en términos absolutos son difíciles. Pero es posible obtener valores que son relativos para que se pueda establecer una comparación de distintos tipos de suelo por medio de un simulador de lluvia sencillo.

### 7.7.3. Cubertura vegetal

La cubierta vegetal del suelo que lo protege en contra de la energía de la escorrentía o lluvia de superficie influye directamente en la erosión. Diversos estudios han demostrado que la relación que posee no es lineal, generándose una reducción sustancial de la erosión siendo cuando el suelo se encuentra protegido por una cubierta con una densidad pequeña. La relación general de demuestra en la siguiente figura

Figura 14: Gráfica de índice



Fuente: (N. Hudson, 1997)

En el modelo SLEMSA, esta relación se utiliza para desarrollar el índice de eficacia del manejo de los cultivos. Para la medición que es directa de la cubierta vegetal, se han propuesto diversos métodos como la fotografía desde un terreno de gran altitud, fotografías aéreas, fotografías estereoscópicas y otros distintos sistemas para medir la luz que puede atravesar la cubierta. El método que ha sido más eficaz tiene origen en Zimbabwe y posee una base de datos de mediciones que han tomado extensionistas. El instrumento es un marco colocado en un cuadrante, compuesto de un espejo el cual está inclinado que por la reflexión permite al operario mirar hacia arriba a través de la cubierta y así evaluar la densidad (N. Hudson, 1997).

## 7.8. Tipos de suelo

El suelo se comprende a sí mismo como un miembro fijo del complejo geográfico, como el de otros seres naturales su estudio no ofrece dos aspectos, tal cuales son, uno geográfico y otro objetivo (Graux & Llano, 1975). La clasificación de los suelos se puede realizar siguiendo numerosos sistemas, según se examinen desde el punto de vista geológico, mineralógico, entre otros más. Entre los principales tipos de suelos están:

- Arenas y gravas: Son de tipo árido y sin cohesión, principalmente formados por fragmentos de roca o de minerales, de forma angulosa o redondeada. Se pueden clasificar por su tamaño medio (arena gruesa, grava, arena fina) y la homogeneidad que posee.

- Arcillas: Formadas por partículas microscópicas coherentes, procedentes de la composición química que conllevan de los constituyentes de las rocas. En estado seco son duras, pueden ser plásticas si el estado de humedad se encuentra en ciertos límites. Su origen puede ser, como el de los limos.
- Limos: Suelos finos, con poca o ninguna plasticidad, de granulometría generalmente uniforme. Su origen puede ser parcialmente orgánico o puramente mineral.

## 7.9. Proceso de erosión fluvial

Para poder comprender el proceso que conlleva la erosión fluvial debemos de entender el concepto de una cuenca hidrográfica, siendo una depresión del terreno limitada por puntos de mayor elevación que ella misma (Rodríguez, 2004). Una parte del agua que cae dentro del área de la cuenca es drenada hacia la corriente principal de la misma, situada en el eje central de la corriente principal. Estas unidades son de gran importancia dentro del proceso de la erosión del relieve terrestre.

El agua escurre de dos maneras: viajando por los cauces de los arroyos y los ríos, o al bajar por medio de las capas superiores del suelo. Hecho lo anterior una parte del agua se infiltra para alimentar a los depósitos de agua subterránea y otra se evapora. Así como existe el ciclo hidrológico del agua, también hay un ciclo de escurrimientos, siendo este último regido por los periodos de ausencia y presencia de lluvias.

El concepto de cuenca nos ayuda a entender la erosión que se desarrolla dentro de ella misma. Se produce un escurrimiento de agua de las partes altas a las bajas; al momento de hacerlo, se realizan tres trabajos: erosiona, hace más profundo el cauce; transporta sedimentos que desprende del suelo y rocas; los cuales se depositan a lo largo del valle o los conduce a cuerpos de agua como lagos u océanos (Rodríguez, 2004). El depósito de sedimentos arrastrados sucede cuando la energía cinética disminuye y puede moverse más material.

Los trabajos desarrollados anteriormente dependen de la pendiente o inclinación de la cuenca, lo cual influye en la velocidad que posee el escurrimiento y de la cantidad de agua que lleve la corriente. Aunque una parte mínima de energía se pierde con la erosión y transporte, eso es suficiente para destruir la cuenca a través del tiempo geológico, si los procesos epirogénicos y orogénicos no superan a los erosivos.

La erosión fluvial sucede de la siguiente manera: Las corrientes de forma natural erosionan porque los cauces de sus lechos son ásperos. De la fuerza que posee la corriente depende el tipo de material que se va a arrastrar, el cual puede ser constituido por limos, arcillas, arenas y objetos mayores sean guijarros y gránulos. A este tipo de erosión fluvial se le conoce como levantamiento directo.

La erosión también se hace fácil por medio del choque y rozamiento de partículas contra el lecho del río, así como de fragmentos contra fragmentos que nos ayudan a desintegrar

la carga, a esto se le conoce como erosión por abrasión. Además también se sabe que las burbujas de aire que se forman en el flujo de agua también crean erosión, pero a velocidades muy altas de 7 a 9 m/s (Rodríguez, 2004).

El transporte de los sedimentos se da de tres maneras: por solución, cuando la carga tiene material disuelto, por suspensión, si parte de la carga se mantiene suspendida gracias a la fuerza del agua y por carga en el fondo (Rodríguez, 2004). Cuando la corriente arrastra en el fondo gránulos, arena, que van saltando deslizándose o rodando. Posteriormente cuando la corriente no posee fuerza para llevar la carga ocurre el depósito de sedimentos. Debido a que las cuencas dependen directamente de la corriente que las erosiona, llega el momento que ese proceso las destruye, en donde queda solamente una planicie de inundación.

Los procesos de erosión fluvial nos explican por sí solos lo siguiente:

- Si estos grandes aplanamientos fueran debido principalmente a la erosión fluvial deberían de dejar siempre resaltes de diferenciación litológica, cosa que comúnmente no sucede.
- En muchos de ellos no se encuentran restos de las posibles herramientas de erosión depositadas por el hipotético sistema fluvial que los pudo originar.
- Lo que sí es frecuente en ellos es la presencia de restos de antiguos mantos de alteración, más o menos conservados.

### **7.9.1. Causas**

La erosión que se desarrolla en el suelo, es un fenómeno que es complejo, en el que intervienen dos tipos de procesos: el transporte de las partículas finales resultantes a la desertización y la ruptura de los agregados. Además de la capa de suelo que se pierde, este proceso contribuye a la desertización, las partículas que se arrastran por la corriente pueden llegar a actuar como un vehículo de transmisión de contaminación (metales, plaguicidas, minerales, nutrientes, etc.). Aunque la erosión fluvial es un tipo de fenómeno natural se estima que este ha sido acelerado por las actividades humanas. La erosión puede ser causada por cualquier actividad humana en donde se exponga al suelo al impacto del agua o viento, o en donde se aumente el caudal y la velocidad de las aguas de escorrentía.

Se establece que el riesgo por erosión fluvial es más propenso en períodos en donde las lluvias son intensas en donde el suelo se encuentra saturado de agua, con escasa cubierta vegetal, por lo que aumenta el movimiento del agua por la superficie del suelo. El efecto de la escorrentía que resulta elimina las cantidades importantes del suelo lo que da lugar a la erosión que actúa como ruta principal del agua, lo que aumenta el problema de erosión del mismo.

## **7.10. Factores que intervienen en la erosión fluvial**

Los factores que intervienen en el proceso de la erosión fluvial, son principalmente cuatro: relieve, clima, vegetación y tipo de suelo.

### **7.10.1. Clima**

Los climas que son propensos a favorecer el proceso erosivo son los que presentan las dos veces característica de presentar precipitaciones de carácter irregular, sequías prolongadas y precipitaciones de alta intensidad. También presentan fuerte evaporación y déficit en el balance del agua, que confiere al territorio una aridez más o menos acusada (Alonso y col., 2011).

Hay que tomar en consideración los climas que tienen intensos procesos tormentosos además con períodos de retorno muy altos. Una precipitación extraordinaria de gran intensidad moviliza una gran cantidad de sedimentos. A estos elevados períodos de retorno de estas precipitaciones de gran intensidad se une la gran variabilidad espacial, así como su naturaleza errática. Un solo proceso tormentoso con altas precipitaciones de gran intensidad puede marcar tasas de erosión especialmente extraordinarias. Para una correcta evaluación del riesgo por erosión se necesita caracterizar las precipitaciones de elevada intensidad y analizar su recurrencia y frecuencia.

### **7.10.2. Tipo de suelo**

Según Alonso (Alonso y col., 2011), la estructura del suelo define su susceptibilidad a la erosión. Esta se presenta como una propiedad dinámica que depende de múltiples factores: materia orgánica, rugosidad superficial, humedad del suelo, pedregosidad, textura, prácticas de cultivo, temperatura, perfil del suelo, etc.

La estabilidad de los agregados es un parámetro que está muy correlacionado con la erodabilidad del suelo, un suelo con una buena agregación mantiene cohesionadas sus partículas y porosidad, lo que reduce su erodabilidad (Alonso y col., 2011). En cambio, cuando estos agregados se dispersan, las partículas son más erosionables, se taponan los poros y el agua en lugar de infiltrarse, este escurre. Por lo tanto las características físicas y químicas de los suelos poseen una alta influencia en los mecanismos e intensidad de los procesos de degradación.

### **7.10.3. Relieve**

Se establece que la topografía de las laderas o vertientes son factores los cuales son primordiales en la erosión fluvial. La erosión fluvial es prácticamente inexistente en zonas que son llanas, sin embargo, si el terreno es inclinado predominará los desplazamientos generados hacia las partes más bajas por acción de la gravedad. Por lo que, la potencia erosiva del agua escurrida y la capacidad de transporte que posee son función de la velocidad, y ésta será mayor en cuanto la pendiente del terreno sea mayor.

Otra de las características del relieve significativo, en conjunto con la pendiente, es la longitud que posee la ladera. El caudal debe ser mayor a medida que aumenta la distancia a

la cumbre, de forma que el fenómeno erosivo que se produce es más intenso. Esto es evidente en los campos de los cultivos como en las parcelas de la erosión (USLE) (Alonso y col., 2011), o en fincas agrícolas en las laderas. Sin embargo, algunos autores no han encontrado una relación existente entre la pendiente y la erosión, o bien a resultado más compleja de lo que se esperaba (Alonso y col., 2011). Hay evidencias que demuestran que la tasa de erosión es mayor cuando es mayor la longitud de la pendiente, siendo este concepto aplicado en la USLE.

Figura 15: Relieve



Fuente: (Alonso y col., 2011)

#### **7.10.4. El impacto de la actividad humana**

El hombre y el tiempo son dos factores importantes para poder entender los procesos de la erosión. Los humanos alteran de alguna manera los suelos y debido a ello acelera los procesos erosivos. Algunos ejemplos de ello son roturaciones, laboreo, incendios, modificación de cauces, minas y modificación de cauces. Algunas actividades antiguas han demostrado que las grandes talas y roturaciones, coincidiendo con la necesidad de madera y alimentos; todo ello dio como resultado un incremento en los procesos erosivos. Aunque la distribución de las zonas que son gravemente perjudicadas por la erosión en América Latina depende, como es natural, de las condiciones físicas del suelo y de la topografía del mismo; siempre guarda una estrecha relación con el agente humano. Se sabe que la erosión mecánica del suelo debido a las operaciones de labranza puede llegar a ser el mayor proceso de degradación física de los suelos (Alonso y col., 2011).

## 7.11. Ríos

Los ríos, riachuelos, arroyos y quebradas se establecen como sistemas acuáticos de aguas corrientes o, que se asocian comúnmente a lugares de erosión, transporte o sedimentación de materiales. Aunque las corrientes forman parte de los ecosistemas terrestres en casi todo el mundo, éstas solo llegan a cubrir cerca del 1 por ciento de su superficie (Anónimo, 2013). Sin embargo, los ríos transportan al mar cerca de 37,000 km<sup>3</sup> de agua. Lo que representa una enorme cantidad, que, si se extiende por el manto terrestre, formaría una capa equivalente a 2,500 mm de lluvia

Según (Pérez & Restrepo, 2008), detalla otros datos que nos cuantifican el agua contenida en el planeta. Por lo que, el 2.8 por ciento del total, esto quiere decir, 1,337 km<sup>3</sup> se encuentran en la tierra, y los ríos cerca del 0.001 por ciento. Esto sin tomar en cuenta el agua en la atmósfera y el agua subterránea.

El agua que transportan los ríos está directamente relacionada con el ciclo hidrológico. Del agua que se escurre o cae como lluvia o nieve, solo una porción llega hasta los cauces de los ríos, parte del agua se evapora directamente en las rocas, el suelo y la vegetación, parte es absorbida por las raíces de las plantas y otras entra como agua subterránea.

### 7.11.1. Origen de los ríos

Los ríos presentan orígenes muy variados. En regiones volcánicas, la deposición de lava puede formar canales a lo largo de los cuales se encauza el agua que proviene de la lluvia o deshielo (Pérez & Restrepo, 2008). La mayor parte de los ríos tiene su origen por las excavaciones causadas por la fuerza de la corriente sobre el terreno. El agua de lluvia busca depresiones naturales y empieza a labrar las áreas de mayor vulnerabilidad hasta llegar a las partes más bajas y a los valles. Cañones muy pronunciados o profundos son el resultado de una erosión lenta provocada por las corrientes durante miles de años.

Se sabe que, a medida que sea mayor el volumen de agua y la pendiente, mayor va a ser la erosión que se produce y por ende la formación de varios tributarios de varios órdenes. La erosión mecánica implica la abrasión del sustrato y desgaste del mismo, y forma de esa manera los canales o lechos de los ríos. Pero los lechos también podrían formarse por la disolución química que posea el sustrato, por ejemplo, las rocas carbonatadas al paso de aguas cargadas de ácido carbónico u algún otro ácido. La velocidad con la que se forma depende del tipo de roca, de la pendiente, del clima que se tenga y de la composición química del agua. Mientras mayor sea la pendiente del área de los ríos, mayor será la capacidad con la que arrastran materiales abrasivos y más fuerte será el impacto que estos causen en el sustrato.

Se tiene que, en zonas boscosas tropicales, donde se presentan lluvias todo el año, los ríos mantienen sus volúmenes de agua más o menos constantes durante todo el año. A diferencia, las zonas cálidas y semiáridas durante varios meses del año no hay precipitaciones y los cauces de los ríos se secan totalmente. Cuando vuelven las lluvias, estas llegan a ser tormentosas y corren por caminos que son irregulares, formando cada vez otros nuevos, y dependiendo

de la fuerza de la corriente y del arrastre que posea que pueden ser materiales de varios tamaños, que pueden destruir a su paso la geometría del río.

### **Tipos de corrientes:**

Los ríos se llegan a clasificar según su actividad (diferencia de caudal dependiendo del momento), también se clasifican con base a la composición de las aguas y de la morfología que posean. A continuación, se mencionan los tipos de ríos que hay:

#### **Corrientes perennes**

Son el tipo de ríos que se forman dentro de regiones de abundantes precipitaciones, no suelen presentar cambios importantes en su caudal a lo largo del año, esto debido al constante aporte de agua que posee. Este tipo de ríos pueden llegar a nacer de corrientes subterráneas, sin la necesidad de encontrarse con grandes regiones de precipitaciones. Como es natural, los ríos siempre se encuentran expuestos a condiciones externas que pueden variar su caudal de mayor a menor dependiendo de las estaciones incluso de los días, llegando a perder el agua por medio de procesos de evaporación o ganándose con lluvias adicionales.

#### **Corrientes estacionales**

Estos ríos dependen directamente de las regiones donde las estaciones se encuentran muy diferenciadas entre sí, con temporadas húmedas y también en temporadas de sequía, se caracteriza por tener grandes altibajos en su caudal. Generalmente los ríos estacionales se encuentran en zonas de alta montañas, aunque en zonas bajas también se pueden llegar a dar, pero con menor frecuencia

#### **Corrientes intermitentes**

Se desarrolla en zonas con un clima muy seco o incluso puede llegar a ser desértico, su caudal tiene la característica de llegar a ser inconstante, pudiendo correr libremente durante un tiempo y luego desaparecer durante meses o incluso algunos años, volviendo a aparecer cuando las lluvias así lo permiten. Los ríos intermitentes tienen el peligro de que si en cada las lluvias poseen la característica de ser torrenciales pueden llegar a correr con gran violencia, eso sí, durante un corto período de tiempo.

#### **Corrientes alóctonas**

Ríos que atraviesan zonas secas o desérticas pero que tienen su nacimiento en zonas húmedas y lluviosas, por ejemplo ríos como el Nilo o Okavango.

### **7.11.2. Geomorfología de los ríos**

Los ríos también se pueden clasificar según su geomorfología, teniendo en cuenta factores como la cantidad de curvas o meandros (sucesión de dos curvas en arco sucesivas) que hace en el recorrido que describe o la cantidad de bifurcaciones y divisiones que presenta:

## **Ríos rectilíneos**

Aquellos ríos que presentan un canal principal y a una multiplicidad baja (pocas bifurcaciones), pero poseen la cualidad de ser muy inestables y terminan por desarrollar otros ríos. Debido a la configuración que poseen las aguas de este tipo de ríos poseen gran fuerza y son altamente erosivos allá por donde pasan.

## **Ríos anastomosados**

En este tipo de ríos se presentan varios canales, y a pesar de que estos poseen menos capacidad erosiva que los que son rectilíneos son muchos más capaces de transportar materiales y sedimentos. Al momento de tener menos energía cuando se encuentran con un obstáculo en su curso este tiende a rodearlo en lugar de erosionar, siempre que puedan adaptar su forma al relieve del terreno. Estos ríos también presentan en ciertas ocasiones islas sedimentarias en las que termina por crecer vegetación.

## **Ríos meandriformes**

Estos ríos generalmente poseen un único canal principal, pero con la característica de tener una gran cantidad de meandros en su recorrido, siendo muy sinuosos en su forma. Este tipo de ríos tiene la capacidad de ser erosivos y sedimentarios, debido a la variabilidad de sus aguas y distinta en ambas orillas de cada meando.

### **7.11.3. Estrategias de un río para gastar su energía**

A lo largo del curso de un río, este tratará de gastar su energía hidráulica, tanto más elevada cuanto mayor sea el cauce y la pendiente que posea. Para ello se realiza por dos medios: disminuir la pendiente en zigzag o acumular sedimentos erosionando el lecho. En el tramo superior, la erosión es muy acusada y el curso arrastra bloques enteros. En el tramo inferior, se encuentra dominando el zigzag: ríos en forma de meandros o se divide en brazos, como en los deltas. En el tramo que se encuentra en medio, el río asocia las dos estrategias construyendo un tipo de cauce con la característica de ser anastomosado. Los torrentes, canales anastomosados, meandros y barras longitudinales generalmente suceden de arriba hacia abajo. Sin embargo, si las condiciones geográficas cambian, en especial si se generan rupturas de la pendiente del lecho, el curso del río altera este gradiente.

## **7.12. Caudal**

Se denomina caudal o descarga al total de agua de una corriente que pasa por un punto en un determinado intervalo de tiempo. Hay muchas formas de determinar un caudal, pero la forma más simple de medirlo es multiplicar el área transversal de la corriente por su velocidad de flujo de un objeto flotante. Un ejemplo, es medir por medio de un objeto flotante su desplazamiento. La medición del caudal de una corriente se denomina aforo por los hidrólogos, y se expresa en litros o en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ). Se sabe que la medida de la descarga está determinada por la profundidad media, por la naturaleza del sustrato y la pendiente del lecho.

### 7.12.1. Tipos de flujo

Cuando se analiza el fluido de una corriente, es de suma importancia tener la capacidad de determinar el carácter del flujo. Dependiendo del comportamiento del flujo se determinan dos tipos de clasificación siendo los siguientes:

#### Flujo laminar

Según (Duarte, 2003), el término laminar se usa como sinónimo para describir un fluido el cual fluye por medio de láminas o capas. En el flujo laminar las partículas fluidas se mueven en trayectorias paralelas.

Figura 16: Descripción del flujo laminar



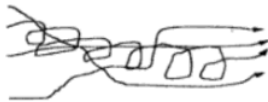
Fuente: (Duarte, 2003)

Se establece que el flujo laminar está gobernado por la ley de viscosidad de Newton y la viscosidad que posee el fluido es la magnitud predominante siendo la acción del mismo una forma de "amortiguamiento" para cualquier tendencia o forma de la turbulencia.

#### Flujo turbulento

El flujo turbulento posee la característica de que las partículas fluidas se mueven de manera desordenada y caótica.

Figura 17: Descripción del flujo turbulento



Fuente: (Duarte, 2003)

El flujo turbulento se presenta usualmente en los problemas de práctica en la ingeniería como los casos de flujos en tuberías, flujos en canales, flujos de máquinas hidráulicas, flujo resultante en zonas de rompientes y flujos en ríos.

### 7.12.2. Número de Reynolds

El comportamiento que posee un fluido, con respecto a las pérdidas de energía, dependen en su gran mayoría si el flujo se determina como laminar o turbulento. Debido a esta razón se desea tener medios para predecir el tipo de flujo sin tener la necesidad de observarlo. Se tiene establecido que la observación directa es imposible en los fluidos que se encuentran en conductos compactos. Se puede verificar analíticamente y demostrar experimentalmente que el carácter que posee un flujo en un tipo de conducto redondo depende de cuatro variables; la viscosidad del fluido, la densidad del fluido, la velocidad promedio del flujo y el diámetro del conducto. Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento

puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds. Desarrollando la ecuación que se describe a continuación:

Figura 18: Ecuación número de Reynolds

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu}$$

Fuente: (Mott & Pedraza, 1996)

Se establece que todas las unidades se pueden cancelar, por lo que  $N_R$  es adimensional, sin embargo, es importante recalcar que todos los términos de la ecuación deben de estar en términos que sean congruentes, con el fin de obtener el valor número correcto para el número de Reynolds. El número de Reynolds es el cociente de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido, entre la fuerza viscosa.

Los flujos que poseen un número de Reynolds grande debido a una alta o baja velocidad, o ambas, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que poseen la característica de tener alta viscosidad y/o se trasladen a bajas velocidades tendrán un número de Reynolds pequeño por lo que su flujo tenderá a ser laminar.

### Números críticos de Reynolds

Para las aplicaciones prácticas en flujos de conductos, se tiene que, si el número de Reynolds es menor a 2000, se determina que el flujo es laminar. Se tiene también que, si el número de Reynolds es mayor que 4000, se supone que el flujo es turbulento. Entre los valores de 2000 y 4000, es imposible predecir qué tipo de flujo existe, por lo cual este intervalo se conoce como región crítica. Si se determina que el flujo de un sistema se encuentra en la región crítica la práctica consiste en cambiar la rapidez que posee el flujo o el diámetro en donde transita para que así el flujo logre ser laminar o turbulento, lo que nos permite realizar un análisis preciso.

Por medio de una cuidadosa minimización de las perturbaciones externas, es posible poder mantener un flujo laminar para números de Reynolds hasta 50,000. Sin embargo, cuando el número de Reynolds es mayor que aproximadamente 4000, una perturbación menor de la corriente de flujo ocasiona un cambio súbito en el flujo laminar a turbulento, por lo que se supone lo siguiente:

Figura 19: Rangos de número de Reynolds

Si  $N_R < 2000$ . el flujo es laminar.  
Si  $N_R > 4000$ . el flujo es turbulento.

Fuente: (Mott & Pedraza, 1996)

## 7.13. Metodologías para la estimación de erosión hídrica

La estimación de la erosión hídrica se basa en la definición de los factores más relevantes que regulan los mecanismos de la erosión por medio de las mediciones, observaciones, técnicas de análisis estadísticos y experimentos que permitan establecer relaciones que sean significativas entre estos factores y las pérdidas de suelo. Sin embargo, las nuevas tecnologías han permitido la evolución de estos métodos de erosión hídrica hacia aquellos modelos más complejos con una estructura distribuida, tomando en cuenta la hidrología y la producción de sedimentos de manera integrada.

Los análisis a considerar podrán incluir la variación espacial y temporal de los parámetros involucrados en la formulación, tener en cuenta una correlación simple de entradas-salidas del sistema, identificar alguna de las relaciones causa-efecto dentro del sistema o establecer las respectivas ecuaciones simplificadas de todos los procesos que intervienen en el fenómeno, analizando en alguna opción las ecuaciones físicas que regulan el proceso erosivo.

El nivel que posee la estimación definirá el carácter cualitativo o cuantitativo. Con el fin de esquematizar el abanico de alternativas disponibles para el estudio de la erosión hídrica, métodos paramétricos o empíricos con formulaciones empíricas que pretenden interpretar los mecanismos erosivos con sus efectos y causas; y métodos estadísticos que relacionan por medio del análisis de regresión mediciones de degradación específica con parámetros asociados al proceso erosivo.

Según García Ruiz y López Bermúdez 2009,(López-Galindo y col., 2003), con la implementación de los modelos de erosión se pueden llegar a conocer mecanismos complejos del proceso erosivo y poder identificar las variables que lo controlan; para así poder estimar los límites de tolerancia permisibles; detectar y delimitar las áreas con mayor riesgo erosivo, para así poder actuar y adoptar de una manera más enfocada las actuaciones de conservación de suelos; pudiendo evaluar las zonas afectadas, cuantificar y delimitar la superficie afectada por el fenómeno. Para que posteriormente se propongan actuaciones de conservación de suelos con el fin de proporcionar una gestión sostenible de los agrosistemas, y estimar la erosión no sólo real sino la potencial que puedan registrarse. Además, para poder aplicar un modelo, se deben de conocer con rigurosidad, para ello se debe de conocer el fin de creación del mismo y sus limitaciones, esto significa utilizar de una manera adecuada el modelo sin mal uso ni abuso.

La utilidad y alcance de cualquiera de los modelos dependen de los objetivos que se quieran alcanzar, del tipo de geomorfología y de la superficie en donde se quiera aplicar, los parámetros que se utilicen, su representatividad y extrapolación del modelo, el rigor en la aplicación y medición de los parámetros, variables de los modelos. Por lo que a continuación se abordarán los modelos paramétricos (o empíricos), en donde se analizarán:

### 7.13.1. Land Erodibility Assessment Methodology (LEAM)

La evaluación de erodabilidad de la tierra (LEAM), desarrollada por Manrique, autor que se basa en la ecuación de Wischmeier elegida por su factibilidad de uso. Se determina que

es un modelo sencillo diseñado para los países en desarrollo que carecen de datos complejos y correctos acerca del suelo y clima. También fue diseñado para los estudios regionales y de cuencas hidrográficas, ya que hace un diagnóstico simple y rápido de la erosión potencial.

Los factores del modelo incluyen la erosión del suelo, la pendiente y la erosividad de las precipitaciones. Por otra parte, este modelo no tiene en cuenta la distribución de la cubierta vegetal, lo que representa una gran falta de capacidad ya que puede ser determinante al momento de evaluar el riesgo de erosión en la zona de estudio. La erosión del suelo se determinó por medio de la textura, estructura, materia orgánica y la permeabilidad

La evaluación de erodabilidad de la tierra se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$K = ((2,1x10 - 4x(12 - OM)xM1,14) + 3,25x(S - 2) + 2,5x(P - 3))/100$$

Donde:

- K: erosión del suelo. sol.
- OM: contenido de materia orgánica en
- M: término textural - (Limón - Arena Fina)
- S: código de estructura del suelo (1 a 4), 1 para una estructura de granada muy delgada y 4 para una estructura masiva o a granel. bloc.
- P: código de permeabilidad (1 a 6), que va desde 1 para suelos de drenaje rápido a 6 para suelos de drenaje muy lento.

Los valores del índice de erodabilidad K, que se encuentren entre 0.11 y 0.40, se dividen en tres suelos:

Cuadro 1: Descripción de clases y tipos de suelos

Clase de erosión del suelo	Tipos de suelos	Superficie en %
Bajo (0.10 - 0.7)	Vertisoles	2
Moderado (0.20 - 0.30)	Calcimagnesian, minerales crudos, fersiallitics, isohumics	93.6
Alto (0.30 - 0.40)	Poco evolucionado (b)	3.9

Fuente:(Anónimo, 2013)

## FODA Land Erodibility Assessment Methodology (LEAM)

Cuadro 2: LEAM

	<p><b>Fortalezas</b> Posee un diagnóstico simple y rápido de la erosión potencial.</p> <p>Proveen información básica para varios tipos de suelo, particularmente al riesgo de erosión específico para cada uno.</p>	<p><b>Debilidades</b> Esta metodología es poco usada debido a la ausencia de factores importantes para su estudio, como la cubierta vegetal, ya que esta no es tomada en cuenta.</p>
<p><b>Oportunidades</b> Algunos países carecen de datos complejos y correctos acerca del clima, por lo que la aplicación de LEAM resulta ser más simple en cuanto a su aplicación.</p>	<p><b>Estrategias FO</b> Si se presenta dificultad de obtención de información LEAM resulta ser una herramienta viable para la evaluación de la erosión.</p>	<p><b>Estrategias DO</b> Se podrá proporcionar resultados de pérdidas de suelos con base a la información básica, que se obtenga en el país.</p>
<p><b>Amenazas</b> Existen otras metodologías en donde se incluyen los factores de las prácticas de tierras y cubierta vegetal.</p>	<p><b>Estrategias FA</b> Proporcionar resultados rápidos y sin mayor complicación con el fin de proveer información básica para el analista.</p>	<p><b>Estrategias DA</b> Al momento de utilizar la ecuación de LEAM, se incluiría el análisis de cubierta vegetal por medio de herramientas como la teledetección.</p>

Fuente: Elaboración propia

### 7.13.2. Ecuación Universal de pérdida de suelos (USLE)

Según FAO (DE SUELOS, s.f.), USLE se establece como un método que emplea seis factores: erosividad R, susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P), para que con lo anterior se pueda estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, esto generalmente en un año. De los diversos modelos paramétricos existentes para describir la relación entre la erosión laminar debida a la lluvia y los principales factores que la controlan, el modelo más conocido, comprobado y estudiado es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) (Detema, 1995), desarrollada en el National Runoff and Soil Loss Data Center, fundado en 1954.

En 1958 Wischmeier, un estadístico del Servicio de Conservación de Suelo (SCS), tuvo como objetivo analizar e intercalar información disponible acerca de la relación de la precipitación con las pérdidas de suelos. Luego, en 1960 y 1978, Wischmeier y Smith tuvieron como objetivo el establecer un modelo empírico para predecir la erosión en terrenos agrícolas

(Detema, 1995), con el fin de que los especialistas en el tema de erosión pudieran escoger el tipo de medidas requerido para mantener las pérdidas de suelo dentro de los límites aceptables, con base al clima, pendiente y los factores de productividad. Finalmente, el modelo fue formalmente presentado por Walter Wischmeier y Dwight Smith en 1978, con base a las distintas investigaciones existentes en las entidades de los estados unidos en 1930.

La USLE es un modelo que fue diseñado con el fin de predecir el promedio de pérdidas de suelo a largo plazo, en terrenos agrícolas, bajo sistemas de cosecha y manejos en particular, pero este también puede aplicarse en condiciones no agrícolas, como aquellas relacionadas con las actividades de construcción (USDA, 1978). La ecuación del modelo se expresa como la multiplicación de seis factores, en donde si la selección de los factores es apropiada en un determinado sitio, la ecuación permite el cálculo del promedio de pérdidas de suelo durante un año en particular o durante una fracción del mismo.

La Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

Figura 20

A	Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el periodo seleccionado para R, generalmente toneladas (t) hectárea (ha) <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> .
R	El factor lluvia y escurrimiento, es el número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), más un factor para escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua. El EI para una tormenta es el producto de la energía total de la tormenta (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I).
K	El factor susceptibilidad de erosión del suelo, es la tasa de pérdida de suelos por unidad EI para un suelo específico, medido en una porción de terreno estándar (22.13 m de largo, 9% pendiente, en barbecho y labranza continua).
L	El factor de largo de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m).
S	El factor de magnitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.
C	El factor cubierta y manejo, es la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua.
P	El factor de prácticas de apoyo de conservación, es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como cultivo en contorno, barreras vivas, o cultivo en terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente.

Fuente: (Anónimo, 2013)

FODA USLE

Cuadro 3: USLE

	<p><b>Fortalezas</b> Facilidad de uso, simplicidad, y una base de datos amplia sobre la cual fue desarrollado.</p> <p>Predice las pérdidas de suelo a largo plazo.</p> <p>Incluye todos los factores importantes y necesarios para determinar la pérdida de suelos.</p> <p>Aplicable en terrenos agrícolas, bajo sistemas de cosecha y manejos en particular, también en condiciones no agrícolas.</p>	<p><b>Debilidades</b> Los métodos para estimar los seis factores no se encuentran disponibles en muchos lugares fuera de los estados unidos de Norteamérica.</p> <p>No fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas.</p> <p>Aplicación basada en supuestos de pendiente de terreno de suelos, cultivos y manejo uniformes.</p>
<p><b>Oportunidades</b> La productividad de muchos países está dada por el área agrícola.</p>	<p><b>Estrategias FO</b> Se ofrecen resultados en donde se incluyen todos los factores que pueden afectar al suelo.</p> <p>Nos permite aplicar la metodología en cualquier condición obteniendo resultados de forma simple y a largo plazo.</p>	<p><b>Estrategias DO</b> Aplicar la metodología que el mayor porcentaje del PIB depende del sector agrícola.</p>
<p><b>Amenazas</b> La aplicabilidad de la ecuación en praderas es limitada por lo que se debe de evaluar el entorno en donde se va a aplicar.</p>	<p><b>Estrategias FA</b> Guatemala cumple con las características solicitadas por dicha ecuación, por lo que su utilización nos proporciona una facilidad y simplicidad de cálculo de pérdidas de suelo en las regiones estudiadas.</p>	<p><b>Estrategias DA</b> Fortalecer la obtención de los factores utilizados para obtener las pérdidas de suelo dentro de la microcuenca.</p>

Fuente: Elaboración propia

### 7.13.3. Ecuación Universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)

Como sus siglas lo indican la RUSLE es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, esta ecuación permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo. Esta metodología permite determinar los sectores críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos que son tolerables, permitiendo elegir la práctica de control de erosión hasta un nivel de pérdida de suelo que es tolerable (Oñate-Valdivieso, 2004).

Como ya se ha dicho anteriormente el modelo RUSLE está sustentado en el análisis estadístico de datos de 10,000 campo año. RUSLE es conveniente para estimar la erosión media anual de una pendiente. Está se utiliza sólo para calcular la pérdida de suelo por erosión laminar y erosión en surcos (No para erosión en cárcavas) (Detema, 1995). Utiliza un método de análisis de factores para estimar la erosión del suelo, estos representan la erosividad de las precipitaciones, la erodabilidad del suelo, la topografía del paisaje el cual es descrito por la longitud de la pendiente, forma y ángulo, y la vegetación.

La expresión general de la RUSLE es la siguiente:

$$A = R * K * LS * C * P$$

- A: es la pérdida de suelo promedio anual en [t/ha/año]
  
- R: es el factor de erosividad de las lluvias en [MJ/ha\*mm/hr]
  
- K: es el factor de erodabilidad del suelo en [t/ha.MJ\*ha/mm\*hr]
  
- LS: es el factor topográfico (está se encuentra en función de la longitud inclinación-forma de la pendiente). esta es adimensional.
  
- C: es el factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional.
  
- P: es el factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo). adimensional.

## FODA RUSLE

Cuadro 4: RUSLE

	<p><b>Fortalezas</b>  Predice las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo.</p> <p>Permite determinar los sectores críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos que son tolerables, permitiendo elegir la práctica de control de erosión hasta un nivel de pérdida de suelo que es tolerable.</p>	<p><b>Debilidades</b>  Está se utiliza sólo para calcular la pérdida de suelo por erosión laminar y erosión en surcos (No para erosión en cárcavas)</p> <p>No fue diseñado para estimar rendimientos de sedimento en pendientes que son complejas donde puede ocurrir sedimentación, ni en grandes cuencas.</p>
<p><b>Oportunidades</b>  Posee nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surco e inter-surcos.</p> <p>Capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variables</p>	<p><b>Estrategias FO</b>  Ofrece determinar a largo plazo los sectores críticos de pérdidas de suelo lo que nos permite realizar un mapeo de las zonas de mayor riesgo.</p>	<p><b>Estrategias DO</b>  Proporcionar información de acuerdo al tipo de estudio realizado, que sea del tipo fluvial. Por</p>
<p><b>Amenazas</b>  RUSLE aún se encuentra siendo desarrollada, y puede ser que se introduzcan nuevas modificaciones.</p> <p>No fue diseñado para estimar rendimientos de sedimento en pendientes complejas.</p>	<p><b>Estrategias FA</b>  De acuerdo al área en donde se manejara el estudio nos brindara estimaciones a largo plazo de acuerdo al tipo de topografía tolerable que describe el área.</p>	<p><b>Estrategias DA</b>  Fortalecer la estimación de sedimentos por medio de incluir el factor de cárcavas si fuese necesario.</p>

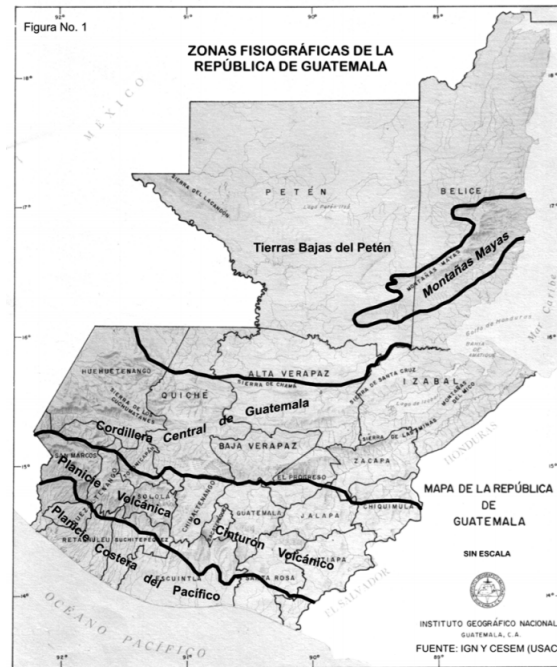
Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación de las metodologías aplicadas a la zona de estudio, se determinaron las características de manera general, describiendo el área regional. Que en este caso es la costa sur. Posteriormente se eligió un área de estudio en donde se tuviera mayores susceptibilidades a erosionar, en este caso, el río Coyolate, elección debida a que es en donde actualmente se han generado o desarrollado varios estudios, causada a problemas de erosión fluvial afectando al entorno ambiental, para que de esta manera se comprenda de una manera general la problemática que enfrenta la región en cuanto a este tipo de fenómenos.

### **8.1. Ubicación**

La cuenca Coyolate se encuentra en la vertiente del Océano Pacífico, al suroeste de Guatemala. Entre los volcanes de Fuego y Acatenango, que se encuentran en la parte alta de la cuenca, los cuales contribuyen al aporte de materiales depositando una extensa llanura de material volcánico. En el tramo inicial de la cuenca se encuentran fuertes inclinaciones, salvando una diferencia de altura la cual es superior a los 2,000 metros hasta llegar a los tramos medio y bajo, sobre la cota de los 200 msnm, lugar en donde las pendientes se tornan suaves. Se establece que el cauce principal del Coyolate tiene una longitud de 150 km y la cuenca abarca una superficie de 1.616 km<sup>2</sup>, formando parte de los departamentos de Chimaltenango, Suchitepéquez y Escuintla (Herrera Villatoro, 2005).

Figura 21: Zonas fisiográficas de Guatemala



Fuente: (Herrera Villatoro, 2005)

## 8.2. Geología

### 8.2.1. Localización y características geológicas y geomorfológicas de la costa sur

En el territorio de la República de Guatemala se reconocen cuatro zonas fisiográficas las cuales son, de sur a norte las que se mencionan a continuación:

- Planicie costera del Pacífico
- Provincia volcánica o cinturón volcánico
- Tierras bajas del Petén.
- Cordillera central de Guatemala

Sin embargo el área de estudio se lleva a cabo en la planicie costera del Pacífico.

#### Localización

La República de Guatemala posee una extensión territorial de 108,889 km<sup>2</sup>, situada en el istmo centroamericano entre los paralelos de 13° 44' y 18°30' de latitud al norte y meridianos de 87°30' y 92°13' de longitud al oeste. Se encuentra delimitada al este y al norte por México,

al este con el golfo de Honduras y Belice, al sureste se encuentra El Salvador y Honduras, y al sur con el Océano Pacífico.

Se tiene que a lo largo del litoral Pacífico, los productos de la erosión de las tierras Altas Volcánicas han creado una planicie costera con un ancho promedio de 50 kilómetros (Herrera Villatoro, 2005). Esta zona fisiográfica está compuesta por material aluvial del periodo cuaternario y que se distingue por tener elevaciones menores de los 300 m sobre el nivel del mar.

Figura 22: Delimitación zona costera



Fuente: (Herrera Villatoro, 2005)

Los fluvios que corren desde el altiplano volcánico, al cambiar su pendiente han depositado grandes cantidades de materiales que han formado esta planicie de poca ondulación y de aproximadamente 50 kilómetros de ancho a lo largo de la costa del Pacífico (Herrera Villatoro, 2005). Sin embargo, el drenaje es deficiente. Son comunes las extensas áreas sujetas a inundación, particularmente en la parte oeste. En Guatemala, las playas de arena negra son áreas de pantano de mangle y algunos esteros caracterizan a la región.

El país se encuentra integrado por tres vertientes hidrográficas principales:

- Vertiente del Mar Caribe: constituida por 7 cuencas principales que ocupan un área de 34,096 km<sup>2</sup> (31 por ciento del territorio Nacional)
- Vertiente del Pacífico: formado por 18 cuencas principales con un total de 23,990km<sup>2</sup> (22 por ciento del territorio nacional).
- Vertiente del Golfo de México que posee 10 cuencas (las mayores del país), constando

de una área de 50,803 km<sup>2</sup> (el 47 por ciento del territorio Nacional).

### **Caracterización geomorfológica**

La costa sur de Guatemala se extiende a lo largo de la frontera con México hasta llegar a Acajutla en El Salvador, en donde describe una forma de S suave y alargada. Detrás de esa línea costera se encuentra una planicie llana, la cual se encuentra formada por barras de arena, lagunas, pantanos y ríos. El canal de Chiquimulilla, con aproximadamente 120 km de largo, ha sido formado por medio de la interconexión y control de los ríos y lagunas a lo largo del tramo (de León, s.f.). Las barras de arena se encuentran interrumpidas por bocabarras sometidas a la influencia de las mareas, las cuales tienden a cerrarse. Se sabe que el cierre y más tarde reapertura de las mismas, provocan cambios drásticos en la hidrología y ecología del sistema costero.

### **Geomorfología y procesos**

Debido a la geología de la región, los ríos bajan de las tierras altas volcánicas y encuentran el camino hacia el mar por medio de algunos valles existentes, las tierras que se encuentran en lo bajo están ocupadas por lagunas, canales y pantanos, los cuales forman una zona húmeda muy extensa. Los procesos geológicos continúan, los ríos suministran sedimentos como limo, arcilla y arena a la planicie húmeda (Herrera Villatoro, 2005). La arena que alcanza la línea de costa se adiciona a la playa y el limo y la arcilla que abandonan las bocabarras, se transportan por medio de suspensión y se disipa en aguas más profundas, finalmente se depositan en la plataforma continental e incluso en el talud del mismo.

### **Dinámica costera**

Se reporta que en Guatemala la vertiente del Pacífico es la más erosionada obteniendo 710 t/ha/año duplicando la tasa de erosión de la vertiente del Golfo de México la cual obtiene una tasa de 330 t/ha/año y casi seis veces más que la vertiente del atlántico constando de 122 t/ha/año («Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate», 2011). Leiva, nos indica que el promedio nacional de pérdida de suelos por erosión hídrica alcanza 149 millones de toneladas anuales, que representan, un valor monetario aproximado de 727 millones de quetzales.

Los factores principales que gobiernan la dinámica morfológica de la costa sur son: el suministro de arena a la costa por medio de los ríos y los transporte litorales debidos al oleaje y las corrientes marinas. Se ha estimado que el suministro total promedio de arena al sistema costero ha sido de  $3 \times 10^6$  ton/año (de León, s.f.).

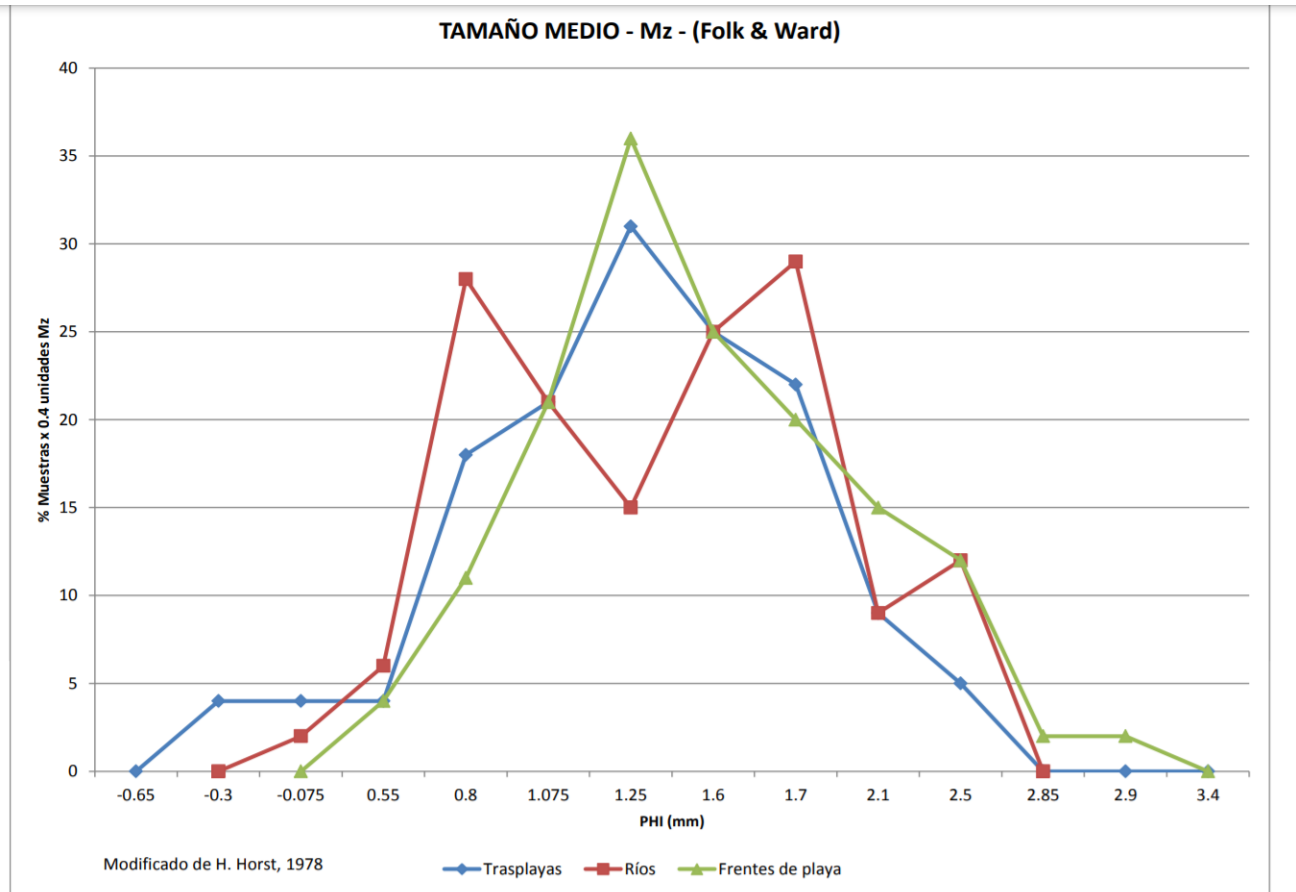
Esto equivale a la agresión anual promedio de 1 m. Probablemente de 400000 a 1000000 ton de arena y material fino que se depositan en el sistema lagunar, aproximadamente de 2 a 5 mm/año.

### **Textura de los sedimentos**

Las curvas de frecuencia del tamaño medio que se basan en métodos estadísticos, la sedimentación reciente en la costa suroeste de Guatemala, demuestran una distribución semejante para las arenas de los ríos que de los frentes de las playas y de las trasplayas (de León, s.f.).

Los tamaños que se encuentran varían entre arena fina y arena gruesa, regularmente se encuentra arena media, las arenas de playa y de río se pueden identificar por la curva de frecuencia de tamaño de grano. Las curvas para las arenas de río, además de señalar mala clasificación que las de la playa, nos exhiben colas en el extremo de grano grueso

Figura 23: Tamaño de los sedimentos



Fuente: (de León, s.f.)

Los sedimentos de la costa sur provienen de una sola fuente y en cada muestra se representa un solo mecanismo de transporte, además de un solo ambiente de depositación. La explicación de ser polimodal, esto quiere decir que tiene muchas formas de manifestarse, es la complejidad mineralógica de las rocas que generan los sedimentos., la rapidez de la erosión, de la depositación y transporte.

### Composición de los sedimentos

El orden de abundancia que posee las arenas se muestra que, en las fracciones separadas de granos del tamaño de 2 mm. Las fracciones separadas de un grano más grueso poseen más fragmentos de roca, plagioclasa y menos minerales máficos(Herrera Villatoro, 2005).

Las arenas muy finas contienen minerales máficos y muy pocos fragmentos de roca (an-

desíticas, basálticas, ácidas y lavas) No se identificó algún fragmento de toba soldada, esto pudiendo ser debido a que este tipo de roca es altamente sensible de ambiente.

### **Geología regional y tectónica**

Las rocas y sedimentos que constituyen a la costa sur están directamente relacionados con la convergencia de placas que ocurre en la fosa mesoamericana, en el océano Pacífico, en donde la placa de Cocos se subduce bajo la placa caribeña. Se tiene que la fuente de sedimentos de la costa sur es la cadena volcánica y los afloramientos que cortan los ríos en el paso hacia el mar (de León, s.f.). Por lo cual, el mayor o menor aporte de sedimentos por parte de los ríos se ve fuertemente influenciado por la actividad volcánica y la alternancia de las estaciones entre lluviosas y secas.

Los ríos que se encuentran en la vertiente del pacífico arrastran fragmentos de roca volcánica (lava andesítica, principalmente) hasta la zona litoral generando sistemas de deltas y barras de arena.

#### **a. Subsuelo:**

El territorio guatemalteco se encuentra comprendido por la geografía física dentro de una plataforma continental que se extiende desde Tehuantepec en México hasta las tierras bajas de Otranto en Colombia. Perteneciendo en conjunto con El Salvador, Honduras y parte de Nicaragua, a la América Central Septentrional, siendo está estructural e historia geológica parte del continente americano.

Según el "Proyecto de Perforación Profunda del Mar", El pozo Costa afuera Número 496, perforado aproximadamente a 22 km de la costa, en el denominado cañón de San José, al sur del puerto del mismo nombre, en donde se encuentra situado en la parte central de la costa pacífica de Guatemala se demuestran los siguientes tipos de sedimentos (de León, s.f.).

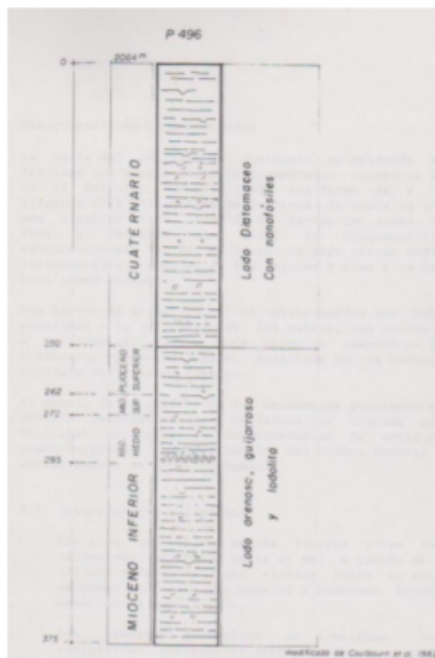
- Lodo arenoso, guijarroso y lodolita.
- Lodo diatomáceo.

Por lo cual la deposición de los sedimentos del tipo a se llevó a cabo con base al Mioceno inferior hasta el Plioceno Superior. Durante el Cuaternario el tipo de Sedimentos depositados cambió a diatomáceo.

### **Estratigrafía**

En Guatemala se pueden distinguir 17 grandes litografías las cuales son diferenciables a gran escala; de las cuales se mencionan las unidades litológicas de la región de la costa sur, haciendo especial énfasis en el tipo de roca por la que se constituyen, la zona donde afloran y la edad de las mismas (de León, s.f.).

Figura 24: Columna estratigráfica simplificada de la planicie costera del Pacífico de Guatemala en frente de San José



Fuente: (de León, s.f.)

a. Rocas volcánicas (Qv):

Esta clase de roca (lavas, lahares y tobas), se determina que son propias del cinturón volcánico ya que su origen se debe a la aparición de la cadena volcánica que se localiza en Guatemala (Herrera Villatoro, 2005), yendo de oeste a este. Aflorando en los departamentos de Escuintla, Retalhuleu y Mazatenango, también se encuentra en el sur y oeste de San Marcos y en el sur de los departamentos de Sololá, Quetzaltenango, Sacatepéquez, Chimaltenango Guatemala y Jutiapa. Dicha clase de roca tuvo su origen y formación al principio del periodo cuaternario.

b. Aluviones Cuaternarios (Qa): La mayor concentración de este tipo de encuentra localizada en el sur del país, a lo largo de toda la franja costera del Pacífico, en los departamentos de Retalhuleu, San Marcos, Escuintla, Jutiapa, Santa Rosa y Mazatenango (Herrera Villatoro, 2005). También se encuentran en el noroeste y noreste del departamento de El Petén. así como en algunas costas de Belice y en los márgenes del río Motagua y lago de Izabal. Son rocas tan recientes del cuaternario que aún sigue el proceso de deposición.

### Hidrología

Los ríos que se encuentran en la cuenca hidrográfica del Pacífico se caracterizan por ser cortos, de curso rápido e impetuoso; dentro de los que podemos mencionar están el río Suchiate (Frontera natural entre México y Guatemala, a la altura de San Marcos). y el río La Paz (Frontera natural entre el salvador y Guatemala a la altura del departamento de Jutiapa) (de León, s.f.).

La zona de estudio puede subdividirse en 14 cuencas hidrográficas, que de oeste a este son: Naranjo, Suchiate, Samalá, Ocosito, Nahualate, Coyolate, Madre Vieja, Acomé, María Linda, Achiguate, La Paz, Los Esclavos y Paso Hondo. Este litoral posee una extensión de 402 km, se tiene que el litoral pacífico es la costa más extensa con 254 km (Herrera Villatoro, 2005).

- a. Vertiente del Pacífico: Los ríos perteneciente a esta vertiente son cortos (promedio de 110 km), se originan a una altura media de 3000 msnm y poseen pendientes fuertes en las partes altas de las cuencas (mayor que el 32 %) (Herrera Villatoro, 2005), cambiando bruscamente a pendientes mínimas la cual es la planicie costera. Esto genera zonas que son susceptibles de inundación en la parte baja al momento de producirse crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, debido a que su drenaje es en las mayores partes deficientes, de tipo subdendrítico en las cabeceras y lineal subparalelo en la parte media y baja de las cuencas, donde muchos de los ríos no desembocan directamente en el mar, sino que corren paralela a la línea de la costa antes de desembocar en el, de esta manera da lugar a que se forman esteros, canales y lagunas.

También se tiene que los ríos que conforman las cuencas, cuando es periodo lluvioso y al suceder erupciones volcánicas en los volcanes que son activos al norte de la vertiente, puede llegar a acarrear lahares que provocan la inestabilidad de los cauces y provocan las inundaciones en las partes bajas de los ríos. Se tiene que esta vertiente ocupa el 25 % del país.

### 8.2.2. Geología de la cuenca Coyolate

La geología de la cuenca del Coyolate se encuentra determinada por el aporte de material del cinturón volcánico en las parte altas de la cuenca. Los materiales arrojados y depositados por actividad volcánica se encuentran comprendidos entre arenas, cenizas, tobas, sedimentos lahares (ICC, 2011). Estas se encuentran en las planicies al pie de las montañas volcánicas como resultado del proceso de erosión sedimentación y transporte. En el cauce del río se presentan condiciones de compactación y resistencia bajas esto debido a las condiciones abruptas de depósito (escorrentías abruptas), las cuales se dan año tras año en la época lluviosa, impidiendo la consolidación de materiales, lo que genera una morfología irregular e inestable.

## 8.3. Sistema fluvial

- a. Patrón de drenaje:

El cauce principal del Coyolate se origina en el departamento de Chimaltenango. Sus afluentes principales son los ríos Coyolate, Pantaleón y Cristóbal. Se tiene que los afluentes del río Pantaleón se originan en las faldas de los volcanes de Fuego y Acatenango. El patrón de drenaje predominantes en la cuenca del río Coyolate es paralelo, aunque cabe mencionar que en las partes altas también se presenta un tipo de patrón dendrítico, Según Marín 2002 citado por (Fuentes Montepeque, 2008) menciona que el drenaje paralelo se presenta en las áreas dominadas, por una pendiente regional, lo cual le impone una

dirección predominante con cauces paralelos, este patrón se encuentra comúnmente en algunos de los pie de montes y laderas estructurales plegadas. Por otro lado, el drenaje que se denomina dendrítico está constituido por materiales que son homogéneos en su composición, sin tener algún control estructural lo que constituye uno de los patrones más comunes.

b. Tipo de cauce y transporte de sedimentos:

Según Schum, determina que los cauces por su naturaleza se clasifican en dos distintos tipos siendo: cauces de lechos rocosos y cauces aluviales. En el caso del río Coyolate, este se clasifica como un tipo de cauce aluvial, en donde fluye como un canal, cuyo fondo y márgenes están constituidos por material transportado por el río, bajo condiciones de flujo actuales. Sin embargo, hay libertad de cambios en dimensiones, patrón, pendiente y forma del cauce en respuesta a cambios.

En el río Coyolate, se tiene una influencia significativa en los materiales geológicos derivados de las actividad volcánica que describe la región (Fuentes Montepeque, 2008), menciona que los sedimentos que se encuentran en suspensión son transportados sin tocar el fondo y los de fondo son los que se transportan por medio del deslizamiento o rodando sobre el lecho del cauce.

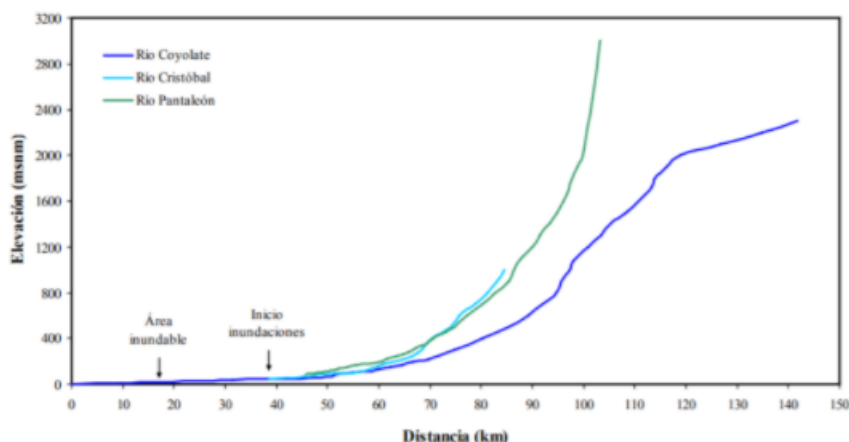
El drenaje superficial corresponde al de las planicies aluviales o sea el tipo trezado y meándrico, esto a cauce de la clasificación del cauce por su forma en planta. Martínez, 2001 citado por (Fuentes Montepeque, 2008), menciona que el cauce trezado se origina por varios cauces que se cruzan entre sí, este tipo se presenta cuando el caudal sólido que lleva el río es superior al que este puede transportar.

A diferencia del cauce denominado meándrico que caracteriza las zonas bajas de los ríos, estos ríos con una forma de "S" tienden a erosionar las orillas en la parte externa, lo que produce un fenómeno muy característico de avance de los meandros, mientras que en su parte interna al momento de reducir su velocidad se produce sedimentación.

## 8.4. Relieve

Con base a Orozco y flores 2006 citado por (Fuentes Montepeque, 2008), describen que la topografía de la parte alta de la cuenca del río Coyolate y media es principalmente muy empinada y accidentada. Las pendientes del terreno que predomina supera el 30 por ciento. En la parte baja se establecen elevaciones que son inferiores a los 100 msnm, la pendiente del terreno se describe como relativamente plana, en donde predominan las pendientes que son inferiores al 1 por ciento. En la parte media de la cuenca se describen según Alvord citado por (Fuentes Montepeque, 2008), se estima que el 17.50 % en donde se clasifica como moderada. La pendiente media del cauce principal, según el método analítico citado por herrera se estima en 1.83 %, clasificado como una pendiente suave principalmente en la parte baja de la cuenca, hacia su desembocadura en el Océano Pacífico, a continuación, se describe la planta perfil de los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate.

Figura 25: Planta perfil de los principales afluentes de la cuenca del río Coyolate



Fuente: (Fuentes Montepeque, 2008)

En la parte media de la cuenca se observa el aumento de la pendiente del cauce siendo aproximadamente el 100 %, además se determina que es la región en donde se registran las mayores lluvias. La parte baja de la cuenca está delimitada a partir de la altura del puente Coyolate, de este punto hasta la desembocadura en el mar la pendiente del cauce principal se disminuye hasta que llega a valores que son menores al 1 %, considerada esta zona como susceptible a ocurrencia de inundaciones (Fuentes Montepeque, 2008).

## 8.5. Uso de la tierra

Actualmente la cuenca se encuentra en una fuerte presión de los sistemas productivos agrícolas, siendo un 73.33 % de la superficie. Sin embargo, el 14.4 % representa la cobertura forestal de la cuenca. Estos porcentajes nos indican una baja retención del agua de precipitación, con la consecuente generación de crecidas de mayor longitud y una rápida concentración del caudal en el lecho del río. Por otro lado, tomando en cuenta la superficie urbanizada es del 1 % de la superficie lo que corresponde a centros urbanos (ICC, 2011). A continuación se detallan los distintos usos de tierra de la cuenca.

Figura 26: Tipos de superficies encontradas en la cuenca Coyolate

Tipo de Superficies	Ubicación de la cuenca	porcentaje de superficie (%)	Observaciones
Áreas urbanas		1	Se concentra en las partes altas de la cuenca, este parametro no es significativo
Cultivos de hortalizas	Parte Alta	3.1	
Hule	Parte Alta	0.3	
Agricultura limpia anual	Parte Alta	15.7	Esta categoria engloba a los granos de (Maiz, frijol y sorgo)
Café	Parte media	13.8	
Caña de azúcar	Parte Baja	29	

Fuente: (ICC, 2011)

En cuanto a las masas forestales, predomina el bosque latifoliado en la parte media de la cuenca, a diferencia de la parte más alta en donde se encuentran pequeños bosques coníferos. Estos representan un 14.4 % del total de la superficie de la cuenca. Dentro de la línea costera se encuentra la presencia de manglares (ICC, 2011).

Algunos lugares de la parte media de la cuenca existen minas descubiertas, que en conjunto con depósitos de arena y material piroclástico del volcán de fuego, forman parte importante del sedimento de la cuenca.



Para la evaluación de las metodologías de prevención de erosión en la zona de estudio, se necesitó una descripción previa de las características importantes de la cuenca, tales como la ubicación, geología del lugar, sistema de drenaje, uso de tierra y entre otras más. Sin embargo, para calcular las pérdidas de suelo generadas, se utilizó la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE), debido a que predice las pérdidas de suelo a largo plazo, incluye todos los factores importantes y necesarios para determinar la pérdida de suelos.

### 9.1. Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE)

La USLE está basada en más de 2,000 pruebas realizadas a parcelas de tamaño estándar, que representan un medio o lugar erosionado, pruebas que fueron realizadas por Wischmeier durante 20 años. Esta parcela tenía un 9 % de pendiente con 22.13 metros de longitud y 1.86 metros de ancho. Fue desarrollado en suelos de textura media, con pendientes de 9 a 12 % preferentemente en un rango de 3 a 18 % y longitudes de hasta 122 metros (Salguero, 2020).

La ecuación que se utiliza es la siguiente

Figura 27: Ecuación USLE

$$\mathbf{A = R * K * L * S * C * P}$$

Fuente: (Salguero, 2020)

Donde:

- A = Pérdida media anual de suelo expresada en (Ton/Ha \* año)
- R = Factor de erosividad expresada en (MJoules/Ha \* mm/h)

- K = Factor de erodabilidad expresada en (Ton/Ha / (Ha/MJ \* h/mm))
- L = Factor de longitud de pendiente
- S = Factor de inclinación de la pendiente
- C = Factor de cobertura y manejo de cultivos
- P = Factor de prácticas de conservación de suelos.

L, S, P, C= adimensionales, por comparación con parcelas experimentales originales-

### 9.1.1. Factores que afectan en el resultado de la ecuación

- Factores que afectan al factor LS: terrazas, muros de piedra, barreras vivas.
- Factores que afectan al factor K: incorporación M.O., aplicación de enmiendas, prácticas conservacionistas, abonos verdes.
- Factores que afectan al factor P: cultivos en contorno, acequias de ladera, canales de desviación, zanjas de absorción.
- Factores que afectan al factor C: cultivos de cobertura, densidades de siembra, mulching, asociación de cultivos.

### 9.1.2. Alcances del modelo USLE

Esta ecuación representa ser una metodología sencilla para evaluar el riesgo por erosión hídrica laminar y en surquillo en distintas condiciones. Constituye ser una herramienta de utilidad para generar especificaciones de diseño de prácticas de conservación de suelos. Además, Ofrece un marco de referencia para el estudio de los factores que afectan en la erosión hídrica. Sin embargo, permite estimar el requerimiento de conservación de tipos específicos de utilización de la tierra en unidades de tierra con diferentes características o atributos

### 9.1.3. Limitaciones del modelo USLE

Se tiene que dentro de las limitaciones de la USLE no se estima con precisión la erosión para un objeto en específico. No estima el depósito de sedimentos tampoco proporciona información acerca de los sedimentos esto incluye: tamaño, densidad, área superficial, etc. No realiza estimaciones sobre la concentración de sedimentos en la escorrentía. No estima la erosión por flujo concentrado (Cárcavas) (Salguero, 2020).

#### 9.1.4. Fin que tiene la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica

Tiene como objetivo el desarrollo de medidas efectivas de control de erosión y la evaluación de los riesgos potenciales acerca de la erosión hídrica.

#### 9.1.5. Metodología para determinar el factor R

El índice modificado de Fournier (IMF) se encuentra dado por una relación entre la suma del cuadrado de las precipitaciones mensuales para un determinado año, respecto de la precipitación media anual (FAO, 2014), su expresión está dada a continuación:

Figura 28: Índice modificado de Fournier

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_m}$$

Fuente: (FAO, 2014)

Donde:

- $IMF_j$  índice modificado de Fournier.
- $P_{ij}$  Precipitación mensual del mes  $i$  (mm), del año  $j$ .
- $P_m$  Precipitación media anual (mm).

Procedimiento:

1. Se debe de identificar las estaciones meteorológicas dentro de la zona.
2. Obtener los valores de las precipitaciones en mm, de todas las estaciones identificadas.
3. Determinar la precipitación mensual de cada estación.
4. Posteriormente obtener un promedio anual de las precipitaciones mensuales.
5. Con base a cada precipitación anual de cada estación tabularla.
6. Obtener un promedio de la cantidad de años de precipitación analizada, para obtener un  $R_n$ .

Figura 29: Ejemplificacion de valores R T/ha/a

<b>AÑO</b>	<b>R</b>	<b>AÑO</b>	<b>R</b>	<b>AÑO</b>	<b>R</b>	<b>AÑO</b>	<b>R</b>	<b>AÑO</b>	<b>R</b>
1950	661	1960	275	1970	679	1980	524	1990	1003
1951	418	1961	725	1971	705	1981	917	1991	651
1952	231	1962	196	1972	532	1982	479	1992	858
1953	799	1963	441	1973	957	1983	752	1993	1120
1954	574	1964	563	1974	461	1984	939	1994	442
1955	636	1965	626	1975	368	1985	547	1995	756
1956	435	1966	567	1976	673	1986	783	1996	607
1957	454	1967	590	1977	575	1987	396	1997	668
1958	458	1968	274	1978	1159	1988	493	1998	1031
1959	833	1969	320	1979	730	1989	365		

Fuente: (Salguero, 2020)

### 9.1.6. Metodología para determinar el factor "K

Este factor expresa la susceptibilidad que posee el suelo a ser erosionado, para su cálculo se utiliza un nomograma que incluye distintas características del suelo, previo a la utilización del nomograma se debe de obtener información física del suelo en el área de estudio (materia orgánica, porcentajes de partículas primarias, capacidad de permeabilidad y tipo de estructura) (Salguero, 2020).

Para poder encontrar el valor de K en el nomograma, se debe de ingresar el valor del porcentaje de limo + arena fina en el eje Y de la gráfica de la izquierda y desde ese punto de proyecta una línea horizontal que coincida con la curva del porcentaje de arena respectivo (Salguero, 2020). Al momento de interceptar la curva del contenido de arena, se proyecta desde ese punto una línea vertical que va hacia abajo hasta que coincida con el tipo de permeabilidad del suelo y desde ese punto se proyecta una línea horizontal que va hacia la izquierda la cual debe de coincidir con el eje Y de la gráfica y a la derecha se encuentran los valores del factor K.

### 9.1.7. Metodología para determinar el factor topográfico L y S

Factor de longitud:

La longitud es la distancia que separa el punto donde el escurrimiento superficial se origina hasta el lugar donde el agua de escorrentía ingresa de nuevo a un drenaje (natural o superficial), o bien donde la pendiente decrece y el depósito de sedimento comienza (Salguero, 2020). El factor L se determina a partir de la siguiente ecuación:

Figura 30: Ecuación factor de longitud

$$L = (\text{longitud de la pendiente en el campo}/22.1)^m$$

Fuente: (Salguero, 2020)

Figura 31: Valores de m, en función de la pendiente

Pendiente	Valor de m
< 0.5 - 1	0.15
0.5 - 1	0.2
1 - 3	0.3
3 - 5	0.4
> 5	0.5

Fuente: (Salguero, 2020)

Factor de inclinación:

Gradiente que está expresado en unidades de ascenso o caída vertical por unidad de distancia horizontal o por 100 unidades de distancia horizontal, cuando la pendiente se expresa en porcentaje el factor "S" se estima a partir de la siguiente ecuación:

Figura 32: Ecuación de la estimación de inclinación de la pendiente expresada en %

$$S = 0.065 + 4.56 \text{ sen } \theta + 65.61 \text{ sen } \theta^2$$

Fuente: (Salguero, 2020)

Tambien,

Figura 33: Ecuación de la estimación de inclinación de la pendiente expresada en %

$$S = 0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2$$

Fuente: (Salguero, 2020)

En donde se estima que S: Es la estimación de inclinación de la pendiente expresada en porcentaje. L y S, se pueden calcular de forma individual o de forma conjunta, utilizando la siguiente ecuación:

Figura 34: Ecuación combinada de ambos factores

$$LS = (\text{longitud de la pendiente en el campo}/22.1)^m 0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2$$

Fuente: (Salguero, 2020)

También, por medio del método gráfico, utilizando el nomograma respectivo donde en el eje X, se encuentra la distancia en metros y desde ese punto se proyecta una línea la cual es vertical que coincida con la curva correspondiente al porcentaje dependiente que se encuentra en un rango de 0.5 a 50 por ciento. Al interceptar la curva de la pendiente se proyecta una línea la cual es horizontal que va hacia la izquierda del nomograma donde se encuentran los respectivos valores del factor LS.

### 9.1.8. Metodología para determinar el factor de manejo (C y P)

Factor de cobertura y manejo

Relación que resulta al momento de comparar las pérdidas de suelo que ocurre en las áreas con cobertura vegetal protectora. Esto toma en cuenta el tipo y densidad de cobertura vegetal del suelo y todas las prácticas de manejo relacionadas, tales como el tiempo de realizar las operaciones de un tipo de cultivo, control de las malezas, riego, labranzas, fertilización (Salguero, 2020). Para encontrar este valor se utilizan los cuadros de los anexos 1, 2 y 3.

Factor de prácticas de conservación de suelos

Relación que existe entre las pérdidas del suelo que ocurren cuando el suelo está bajo una determinada práctica de conservación de suelo y las pérdidas de suelo que ocurren en la misma área sin prácticas de conservación. Este posee un valor de 1 el cual tiende a ser reducido por prácticas de conservación que son especiales, dentro de las cuales se mencionan las más comunes en áreas cultivadas, cultivos de contorno. Las prácticas de conservación que afectan al factor P, actúan en la retención de sedimentos, facilitan la infiltración, lo que disminuye el escurrimiento (Salguero, 2020). Para poder encontrar este valor se utilizan los siguientes cuadros en los anexos 4,5,6.

## 9.2. Caudal

Para la determinación del caudal de la zona en estudio, se procedió a utilizar información desarrollada por el instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), obtenida del estudio hidrológico del Coyolate (ICC, 2011). Dicha institución utilizó la metodología de la crecida índice la cual parte del estudio regional de los datos de caudal, en un determinado territorio, en donde se establecen las regiones hidrológicas a partir de las características morfológicas, climáticas y de uso de la tierra. Se realiza una agrupación de todos los registros de caudal que están disponibles para cada región hidrológicas, y posteriormente se elabora una correlación entre el caudal máximo y la superficie de drenaje.

- a. Coefficiente de Manning Este coeficiente indica la resistencia que posee el agua al fluir en un terreno determinado, por consiguiente, influye en la velocidad y altura del nivel de agua. Se tiene que el coeficiente se debe de determinar en cada sección, para el lecho del río y tomando en cuenta los márgenes izquierdo y derecho (ICC, 2011).
- b. Tipo de flujo Se llega a clasificar con base a la relación entre las fuerzas gravitacionales e inercial en el fluido Cuando las fuerzas gravitacionales son mayores que las inerciales será flujo subcrítico a diferencia de cuando las fuerzas inerciales son mayores que las gravitacionales se habla sobre un flujo supercrítico (ICC, 2011).

Para la evaluación de las metodologías de prevención de erosión en la zona de estudio, se necesitó una descripción previa de las características importantes de la cuenca, tales como la ubicación, geología del lugar, sistema de drenaje, uso de tierra y entre otras más. Posteriormente por medio del uso de sistemas de información geográfica, se delimitó la zona de estudio (cuenca hidrográfica), para que por medio de la información adquirida de la ICC y entidades como el maga de obtuviera la pérdida de suelos que se tiene en la zona en estudio, a partir de lo anterior se pretende clasificar las pérdidas de suelo que se tiene en niveles de erosión de acuerdo a la PNUMA-FAO y finalmente comparar tres metodologías propuestas aplicables a la problemática de la zona.

## 10.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

### 10.1.1. Cálculo de factores (USLE)

Se utilizó la herramienta de Qgis Desktop 3.12.2 with GRASS 7.8.2, en donde se utilizaron las herramientas de toolbox, vector y ráster. La información espacial en el formato digital empleada como punto de partida se obtuvieron de las siguientes fuentes:

- Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático (ICC).
- Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).

Para que se pudiera llevar a cabo este estudio se contó con datos hidrológicos, meteorológicos y también con información existente en diferentes capas digitales (formato SHAPE) todas las mencionadas anteriormente fueron proyectadas en el sistema de coordenadas

WGS84, UTM huso 15 Norte con el fin de homogeneizar el sistema de proyecciones y poder así trabajar la información digital siguiente:

- Modelo de elevación digital (DEM).
- Capa vectorial de polígonos con información sobre límites de las cuencas de la República de Guatemala.
- Capa vectorial de polígono con información sobre la composición de suelos proporcionado por el MAGA.
- Capa vectorial generada a partir de información pluviométrica de la zona (precipitación mensuales (mm)).
- Capa de cobertura vegetal en formato shape.

Para poder implementar la ecuación Universal de pérdida de suelos (USLE) en Qgis se determinó de forma individual el cálculo de para uno de los factores que componen la ecuación, por medio de una serie de operaciones utilizando la calculadora RASTER que se encuentra integrada en el programa, ya que por medio de esta se permitió crear y administrar modelos, encadenados a la secuencia de herramientas de geoprocetos y suministrar la salida de las capas ráster para cada factor. Lo que a su fin nos permite operar todas las capas resultantes para obtener la cartografía de riesgo de erosión potencial.

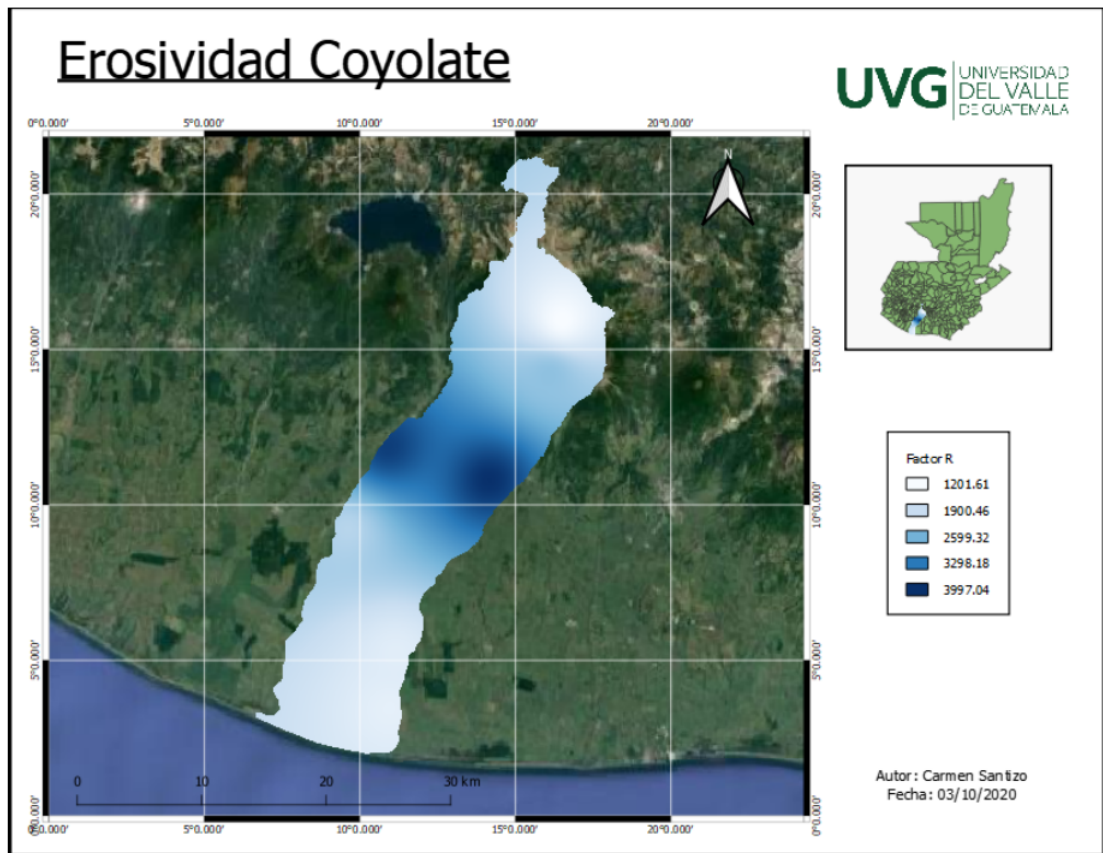
a. Delimitación de la cuenca

Para delimitar la zona en estudio y construir el análisis de erosión se partió de la capa vectorial de polígonos con información de los límites de las cuencas, identificando la zona en estudio. Al momento de localizar la zona fue necesario definir la proyección para el archivo SHAPE.

b. Erosividad (Factor R)

La erosividad de la zona de estudio se obtuvo a partir de información de la base de datos digital de la República de Guatemala, el cual fue realizado por: Proyecto de Asistencia Técnica de Información (CATIE-ESPREDDE), del programa de Emergencias por Desastres Naturales (MAGA-BID). extrayendo información de la lluvia por medio del mapa digital llamado "EROSIV" (MAGA, 2001). Sin embargo la literatura del MAGA señala que el factor R está en función de dos características, la energía de las lluvias, misma que se considera como el mejor elemento para estimar la capacidad erosiva de las mismas y la intensidad máxima que se tenga durante treinta minutos. Sin embargo, debido a la falta de datos se utilizó el Índice Modificado de Fournier (como se describe en el marco teórico), de forma equivalente al factor R.

Figura 35: Mapa de erosividad Coyolate

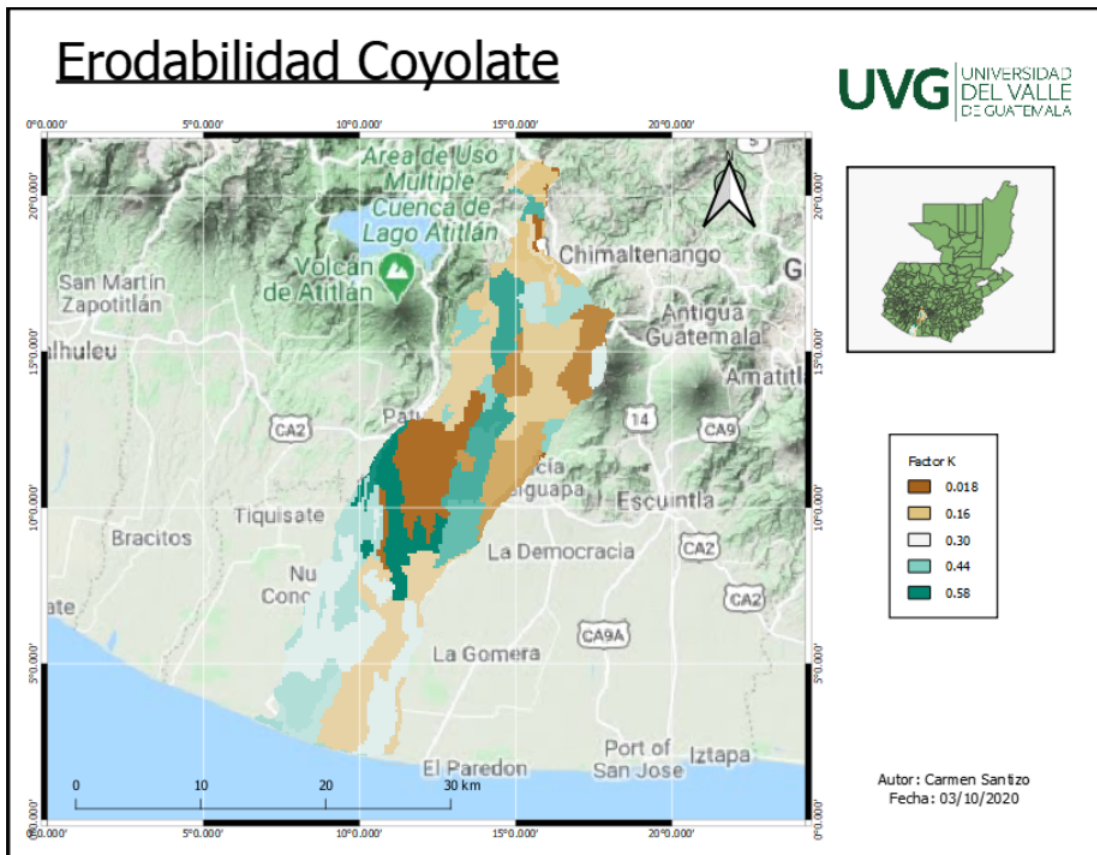


Fuente: Elaboración propia

c. Erodabilidad (Factor K)

Para obtener la erodabilidad en la zona de estudio se obtuvo información de la base de datos digital de la República de Guatemala, el cual fue realizado por: Proyecto de Asistencia Técnica de Información (CATIE-ESPRED), del programa de Emergencias por Desastres Naturales (MAGA-BID) (MAGA, 2001). Se obtuvo información del mapa generado por la entidad, el cual posee información de la erodabilidad de los suelos, se llama "ERODAB". Este factor caracteriza la sensibilidad del suelo con respecto a la erosión, esta puede ser calculada por medio de nomogramas que incluye distintas características del suelo, generadas según un estudio previo de suelos hechos en la zona de estudio. Sin embargo, debido a la imposibilidad de obtener la información. Por otro lado, el mapa generado por el maga, se describe como una serie de suelos y para llevarla a cabo se realizó una investigación de los parámetros que definen el factor K o erodabilidad debida a cada unidad.

Figura 36: Mapa de erodabilidad Coyolate

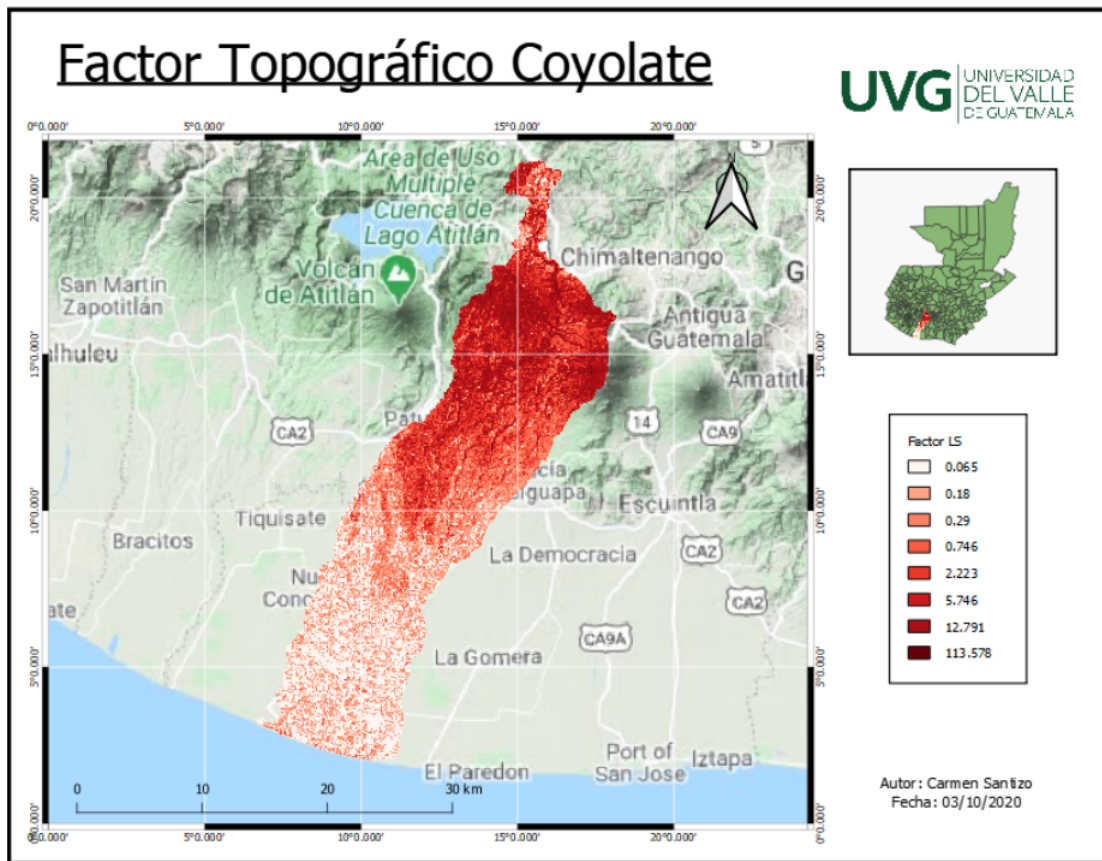


Fuente: Elaboración propia

- d. Factor topográfico (LS) El factor topográfico se calcula a partir de dos factores: la inclinación de la pendiente (S) y su longitud en (L). Para poder calcular ambos, se utilizó la capa del modelo de elevación digital (DEM) de la zona. Posteriormente se utilizó la herramienta de processing toolbox de Qgis, utilizando el proceso de LS-factor field based, Esta herramienta utiliza solo un Modelo Digital de Elevación (DEM) como entrada y deriva áreas de captación de acuerdo con Freeman (1991). Específicamente está basado en el cálculo del factor de longitud pendiente (LS) utilizado para la Ecuación Universal de Pérdida de suelos (USLE), basado en la pendiente y el área de captación (específica), este último como sustituto de la longitud de pendiente.

Al momento de utilizar la herramienta, se debe de ingresar en elevation el recorte del DEM en la zona de estudio, Ingresar el autor para el cálculo de LS que para esta investigación fue Wischmeier & Smith 1978, posteriormente se ingresaron los valores como en los anexos.

Figura 37: Mapa de factor topografico Coyolate



Fuente: Elaboración propia

e. Cobertura (Factor C) Para la elaboración del mapa de uso de suelo se establecieron los usos de suelo que se tenían dentro de la cuenca, esto de acuerdo a la descripción de uso de Suelo que se demuestra a continuación:

Figura 38: Tipos de superficies

Tipo de Superficies	Ubicación de la cuenca	porcentaje de superficie (%)	Observaciones
Áreas urbanas		1	Se concentra en las partes altas de la cuenca, este parametro no es significativo
Cultivos de hortalizas	Parte Alta	3.1	
Hule	Parte Alta	0.3	
Agricultura limpia anual	Parte Alta	15.7	Esta categoria engloba a los granos de (Maiz, frijol y sorgo)
Café	Parte media	13.8	
Caña de azúcar	Parte Baja	29	

Fuente: (ICC, 2011)

Posteriormente según el cuadro siguiente, se determinó el factor C de acuerdo a cada tipo

de cobertura vegetal que se tiene dentro de la cuenca, utilizando los Factores C (FAO 1989) y Factor C (saberio 2002, Gómez 2002 y CATIE 2003) (Lianes y col., 2009).

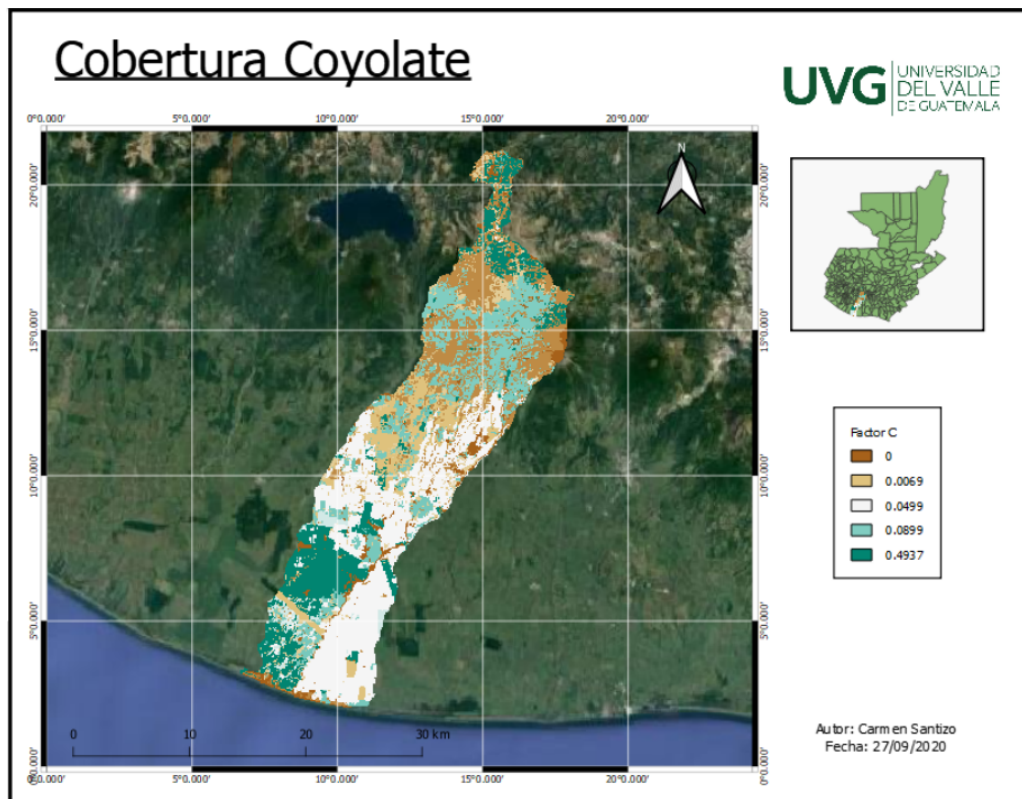
Cuadro 5: Factores según tipo de superficie determinada según autores

Tipo de Superficies	Factor C (FAO 1989)	Factor C (CATIE 2003, Saborio 2002, Gómez 2002)
Bosque Natural	0.519	
Matorral claro, substrato herbáceo denso		0.003 - 0.030
Pastizal cultivado (manejado)		0.003-0.040
Café	0.062	
Cultivos permanentes asociados (densos)		0.010 - 0.300
Papá-zanahoria o papa- cebolla	0.615	
Cultivos Anuales	0.495	
Tomate/chie dulce	0.263	

Fuente: (Lianes y col., 2009)

Luego, según la capa vectorial proporcionada por el centro de Investigación Ambiental y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala, llamada uso del suelo 2012. Se recortó el área en estudio de la capa de uso del suelo 2012, y posteriormente se creó una columna en la base de datos de factor C, en donde por capa tipo de cobertura se le asignó el valor del factor C determinado. Finalmente a partir de la capa de polígono con los valores de C para cada tipo de uso del suelo se generó una capa ráster que representa cada valor ingresado.

Figura 39: Mapa de cobertura Coyolate



Fuente: Elaboración propia

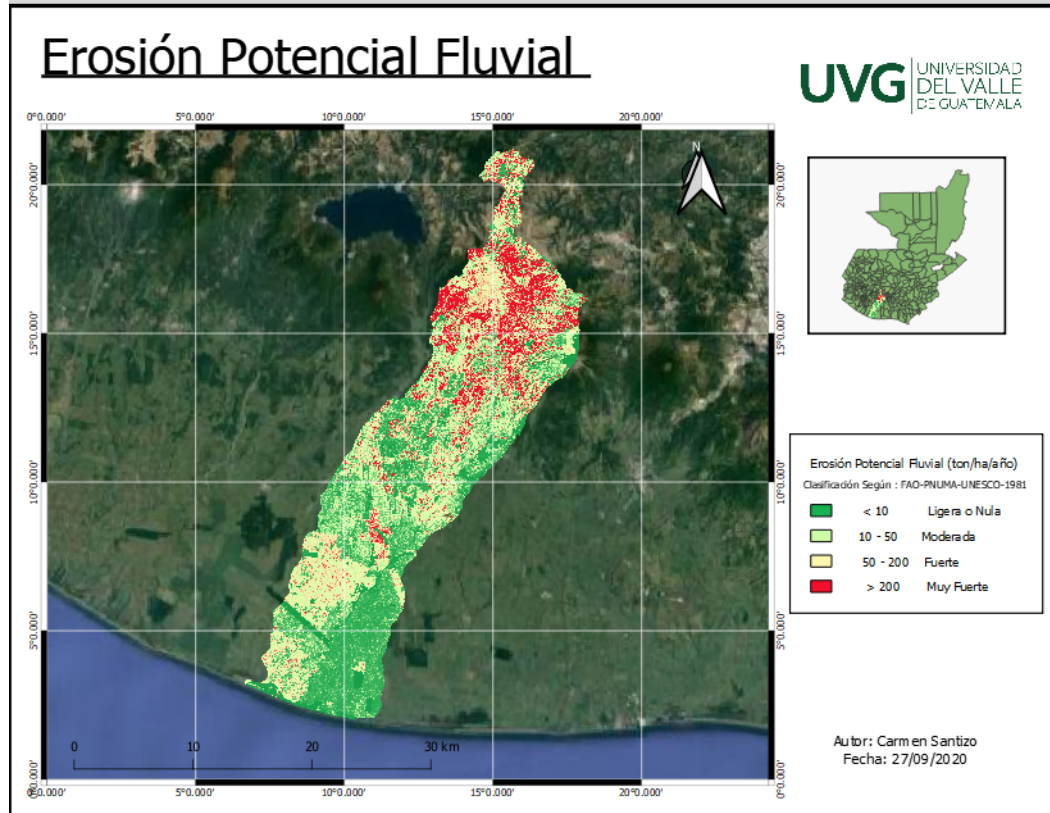
f. Práctica de conservación (P)

Las prácticas de conservación siendo el factor P, se denomina la proporción de pérdida de suelo con base a una práctica de apoyo como algún tipo de cultivo en contorno, cultivo en terrazas o barreras vivas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente. Según estudios hechos en la zona de estudio se establece que uno de los problemas es el uso inadecuado y degradación de los recursos naturales y el ambiente. Lo anterior debido a que se identificaron escasas prácticas de conservación de los suelos, por lo que se define que el valor que toma este factor es igual a 1.

### 10.1.2. Pérdida de suelo estimada en zona de estudio

Para el cálculo de la pérdida de suelos en la zona de estudio, se procedió a calcular en base a las capas generadas mencionadas anteriormente por medio de la ecuación de la USLE (Figura 28). Se ingresó dicho calculo a la calculadora RASTER de Qgis, como se muestra en el anexo, obteniendo una pérdida de suelos, de acuerdo a la clasificación de los niveles de erosión hídrica propuesta por la FAO-PNUMA-UNESCO-1981. Por medio de la cual se determinó lo dicho anteriormente.

Figura 40: Mapa de niveles de erosión hídrica Coyolate



Fuente: Elaboración propia

### 10.1.3. Caudal

Según ICC, las frecuencias teóricas que mejor se ajustan para proporcionar resultados correctos son Gumbel y Log - normal. También determinaron valores de causal según la curva envolvente (ICC, 2011).

Cuadro 6: Caudales máximo según ICC

Subcuenca	La Presa	Puente Coyolate	Cerro Colorado	Pantaleón	
Superficie (km <sup>2</sup> )	75	502	1123	131	
Crecida índice (m <sup>3</sup> /s)	8	167	387	41	
Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)	21	417	963	103	Gumbel
Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)	27	551	1272	136	
Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	32	651	1504	161	
Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)	14	293	677	72	Log-normal
Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)	22	447	1032	111	
Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	33	680	1570	168	
Caudal T10 (m <sup>3</sup> /s)	23	477	1102	118	Curva envolvente
Caudal T25 (m <sup>3</sup> /s)	28	623	1439	154	
Caudal T50 (m <sup>3</sup> /s)	33	730	1686	180	

Fuente: (ICC, 2011)

---

## Metodologías contra la erosión fluvial

---

La erosión es un fenómeno que se encuentra ligado a las condiciones ambientales y características del lugar en donde se desarrolle. Para llevar a cabo la evaluación de metodologías para un control de dicho fenómeno, fue necesario describir características importantes de la zona de estudio, tal cuales son el relieve, geología, sistema fluvial, uso de la tierra, etc. Además, se realizó el análisis de pérdidas de suelo por medio de un sistema de información Geográfica en donde por medio de información de capas de los factores que componen la ecuación se estimó la pérdida de suelos anual y se visualizan las zonas en donde se desarrollaba un tipo de erosión fuerte.

Sin embargo, según la información generada y analizada de la zona de estudio, se tiene como objetivo el análisis tres distintas metodológicas que debido a sus características, ventajas y desventajas se estiman las adecuadas en torno a todo lo dicho anteriormente, por lo que se describen a continuación:

### 11.1. Descripción de metodologías

#### 11.1.1. Alfombra de refuerzo de césped de alto rendimiento (HPTRM)

Desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU, el cual utiliza un tapete de refuerzo para césped con el fin de proteger al suelo susceptible a erosión El material de dicha alfombra se definió según lo definido por el Consejo de Tecnología de Control de Erosión (ECTC), Hoja informativa sobre tecnología de aguas pluviales, Epa, FHWA y Alfombras de refuerzos (Black, 2011). Sus materiales consisten en fibras sintéticas no degradables, monofilamentos, mallas y/u otros elementos, transformados en una matriz tridimensional con la capacidad de soportar el crecimiento denso de las raíces de la hierba propia del lugar de instalación, que crece a través de la alfombra, es una geored de polipropileno o poliéster tejido, ambos diseñados para la resistencia a la erosión en diques con pendientes pronunciadas.

Adicionalmente para su ajuste al terraplén utiliza anclaje de percusión introducido en el suelo (PDEA) desarrollado originalmente en 1983 como un dispositivo único, versátil y moderno que en su mayoría puede ser desplegado rápidamente en la mayor parte de sitios con condiciones que son elegibles. El diseño original de dicho sistema promete ser un anclaje ligero, el cual es resistente a la corrosión que no afecta al suelo durante su instalación. Proporciona una fácil instalación ya que se puede instalar desde el nivel del suelo utilizando un tipo de equipo convencional. Posee la facilidad de ser tensionado a una capacidad portante exacta y estar operando en su totalidad y de manera inmediata luego de su instalación.

a. Funcionamiento

La metodología HPTRM presenta ser un diseño trilobal patentado que promueve de manera rápida el desarrollo de las raíces para la vegetación a largo plazo. Este sistema proporciona beneficios ambientales, como filtrar contaminantes de las aguas pluviales para mejorar la calidad del agua y fomentar hábitats óptimos para la vida acuática, y aumentar la resistencia por medio de la vegetación. Por otro lado, los blindajes duros pueden reducir la vegetación del entorno y afectar de manera significativa al ecosistema acuático (Engineers, 2017).

Debido a la forma que posee el anclaje y el punto excéntrico de su cable o también llamado tendón, cuando se aplica la carga del anclaje va a rotar en el suelo aproximadamente 90° y bloquear la carga. Cuando la carga ejercida sobre el suelo por el sistema de anclaje incrementa, un cuerpo de suelo por encima del anclaje es comprimido y esto proporciona una resistencia a cualquier otro movimiento que posea el anclaje. El tamaño y funcionamiento del cuerpo de tierra se puede visualizar como si fuera un cono truncado o tronco (Black, 2011).

El tamaño y propagación del cono, dependerá de lo siguiente:

- El tamaño del anclaje
- El ángulo de fricción del suelo
- La profundidad de instalación
- La carga aplicada

b. Especificaciones

Se pueden encontrar distintas áreas de anclajes, diferencias por la forma. También se encuentran en tamaños diferentes según sea el requerimiento del proyecto. Posee una Cabeza de anclaje, un cable de tendón de acero inoxidable, plato de carga, candado o cuña. Posteriormente para el HPTRM se pueden adquirir según sea el fabricante los rollos de protección a longitudes deseadas, esto con base al diseño establecido (Engineers, 2017).

c. Comportamiento en suelos granulares

Según un típico suelo el cual es no cohesivo consistente en partículas que se aseguran y compactan al aplicar una carga. Arenas gruesas dentro de un rango de 0.6mm - 2mm y gravas las cuales son más gruesas que 2 mm, componen este tipo de suelos (Engineers, 2017). Estos sistemas de anclajes funcionan excepcionalmente bien en suelos granulares no cohesivos libremente drenados, los cuales muestran cortas extensiones hasta el bloqueo de carga, cargas más altas y conos truncados más grandes.

d. Consideraciones para el diseño

1. Tipo de suelo/condiciones de instalación para su anclaje.
2. Ángulo del talud
3. Existe presión del agua de poro dentro del terraplén.
4. Si hay dentro del área alguna sobrecarga que afecta a la estabilidad del talud.
5. Hay alguna instalación o tubería enterrada que podría obstruir dicho anclaje.
6. Determinar si la obra se encuentra dentro de un área sísmica.
7. Profundidad del plano de falla crítico.
8. Carga que se le debe de aplicar al talud (utilizando un programa geotécnico estándar).
9. Factor de seguridad (1.2 y 1.5).
10. Vida útil del diseño.

### 11.1.2. Geomanta MacMat®R

Metodología utilizada cuando se requiere un tipo de revestimiento con mayor resistencia, especialmente en lugares en donde se presenten mayores velocidades de flujo de agua o mayor duración de los períodos de crecida (Benassi, 2017). Formado por la unión de un MacMat®S, adicionalmente una red en malla hexagonal de doble torsión, de manera que adiciona a las Geomantas, la característica de resistencia mecánica de las redes metálicas.

Una de las característica principal es dar soporte debido al desenvolvimiento de la vegetación y, debido a su estructura artificial, aumentar la resistencia de las márgenes en contra de la erosión (Benassi, 2017).

a. Funcionamiento:

La combinación de la malla hexagonal de doble torsión y el MacMat®S, se fija al suelo por medio de estacas, que puede soportar sin generarse daño flujos más intensos que pueden arrastrar, materiales en suspensión o flotantes de esta manera permiten una mayor integridad de la misma contra impactos (Benassi, 2017).

b. Especificaciones:

Provisto de rollos con anchos de 1 m hasta 4 m y de diferentes largos. La malla o también llamada red es la misma que la utilizada en la fabricación de los gaviones. Generalmente, se utilizan rollo con ancho de 2 m con el fin de reducir los traslapes y facilitar la manipulación.

El MacMat®S, es cubierto con pedriscos en el obrador y, posteriormente, recubierto con emulsión asfáltica en frío, de manera que forma un colchón igualmente flexible, y al mismo tiempo más pesado y resistente. El elemento, así preparado, posteriormente se coloca sobre el margen, ya perfilado, con el auxilio de una grúa (Benassi, 2017).

Sin embargo, cabe destacar que puede ser utilizado con sus vacíos llenos de tierra o pedrisco, o a su vez ser consolidados en el obrador con emulsión asfáltica o, directamente en obra, con concreto proyectado. Brinda mejores resistencias si el revestimiento de sus

márgenes se encuentra por arriba de la línea de agua permanente en función de poder ser asociada con la vegetación. También, puede ser utilizada por debajo del agua colmatada o con pedrisco suelto, siendo este casi de menor resistencia que el anterior.

- c. Consideraciones para el diseño: Si se encuentra en situaciones donde hay un talud susceptible a procesos erosivos, con gran altura e inclinación acentuada, en donde la solicitud de esfuerzos que se requiera es mayor, esta se define como una solución indicada, ya que debido a sus ventajas de la geomanta Geomanta MacMat® a una malla hexagonal de doble torsión, lo que nos atribuye una mayor resistencia a tracción (Benassi, 2017).

A continuación se debe de tomar en consideración lo siguiente:

1. Verificar tipo de suelo
2. Establecer variación del nivel de agua en el canal.
3. Período de sumersión, acción de la corriente y olas.
4. Establecer la velocidad máxima e intensidad de crecida.
5. Aplicabilidad de un factor de seguridad entre 1.2 y 1.5
6. Garantizar una buena adherencia entre la geomanta y el suelo.
7. Verificación del desarrollo de la vegetación.

### **11.1.3. Mantos permanentes con block de concreto adheridos**

Es una esfera de bloques de concreto con vegetación que se utiliza para estabilizar taludes, canales, orillas de río, mar y laderas. Este consiste en bloques de concreto unidos e incrustados en una geomalla que es de alta resistencia (Flexamat, 2017). Hay un espaciamiento específico entre los bloques lo que le proporciona una flexibilidad al tapete que nos permite el crecimiento de la vegetación, esto es opcional. La alfombra está empaquetada en rollos, lo que hace que su transporte e instalación sea eficiente.

- a. Funcionamiento:

La unión de la geomalla y el hormigón hace que se conviertan en una armadura dura y flexible de alta resistencia contra la erosión (Flexamat, 2017). Además, con la ayuda de la vegetación se establece como una solución permanente para el control de erosión, por lo cual la vegetación también ayuda en la resistencia a la erosión del área en estudio.

- b. Especificaciones:

Este tipo de metodología de prevención es seguro de cortar, posee un rendimiento de velocidad de flujo de 9.14 m/s (Flexamat, 2017). El diseño en rollo hace que la instalación sea más eficiente y a la misma vez el personal lo puede instalar con su equipo propio. Cabe destacar que se adapta con facilidad al paisaje, proporciona seguridad para que el automovilista cruce, también se determina que es seguro para los peatones y la vida silvestre (Flexamat, 2017). Por otra parte, se tiene que este reduce los costos de construcción, esto quiere decir un bajo costo de material, menos mano de obra y finalización más rápida del proyecto.

Fabricado en anchos estándar según sea el proveedor. las longitudes se pueden adaptar a los requisitos del proyecto. Las condiciones del sitio y los requisitos del proyecto determinan el material de base adecuado (Flexamat, 2017).

c. Consideraciones para el diseño:

1. Considerar un factor de desperdicio.
2. Comprender el proceso de instalación
3. Planificar el área de preparación para colocarlo.
4. Preparar el trabajo antes de la instalación (retirar tocones, rocas, tierra, etc.)
5. 3-4 ganchos móviles (ajustadores de la manta) según sea necesario para la instalación.
6. Grúas para rollos grandes.
7. Para la instalación verificar que el cucharón de las máquinas a
8. utilizar sean sin dientes en la excavadora.
9. Puede ser necesaria la utilización de anclajes en U de 18" o anclajes de percusión de placa cruzada para varilla de refuerzo.
10. Verificar instrumentos necesarios para costuras y bordes.
11. Verificar la pendiente.

## 11.2. Evaluación de metodologías de prevención

Este trabajo de investigación tiene como objetivo determinar una metodología adecuada conforme a las características que definen a la zona de estudio. De forma general se describió la geología regional de la costa sur, esto con el fin de determinar el origen de los suelos que se tienen en la región, posteriormente se eligió una zona de estudio que tuviera mayores susceptibilidades o problemáticas con respecto a la erosión fluvial. Según la ecuación Universal de la USLE, y sus factores R (erosividad), K (erodabilidad), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (Prácticas de conservación). Se estimaron las Pérdidas de suelos anual que se tiene dentro de la cuenca del Coyolate. Como podemos observar En la figura 40, se puede observar que en la parte alta de la cuenca se cuenta en su mayoría con una erosión potencial mayor a las 200 t/ha/a, en la parte media de la cuenca se tienen pérdidas de suelos menores a los 200 t/ha/a y en la parte baja se tienen pérdidas relativamente moderadas fuertes y ligeras o nulas.

Con base a la literatura estudiada se tiene que la erosión es producida debido a fuertes pendientes, que conlleva a generar altos niveles de flujo y que posteriormente afecta al suelo según sea el tipo que se tiene. Como se puede observar en la Figura 37 se tiene que la cuenca presenta las mayores pendientes en la parte alta de la zona, por lo que esto concuerda con las pérdidas mayores a las 200 t/ha/a que se presentan en la Figura 40. Esto nos dice que la parte alta del Coyolate está sujeta a una erosión potencial muy fuerte, esto quiere decir que el río Coyolate posee una susceptibilidad a erosionar muy alta.

Con base a todo lo anterior, se procedió a investigar tres tipos de metodologías aplicables a resolver este tipo de fenómenos y eventualmente se evaluaron conforme a las características de la zona. Se definieron tres tipos, metodologías que se encuentran con distintos proveedores aquí en Guatemala. Estas metodologías son:

- Alfombra de refuerzo de c/jesped de alto rendimiento (HPTRM).

- Geomanta Geomanta MacMat®R.
- Mantos permanentes con block de concreto adheridos.

Para la evaluación y elección de las metodologías, se procedió a desarrollar un cuadro de decisión en donde se determinó un rango de evaluación siendo el valor 0 una calificación baja y 10 una calificación alta.

Figura 41: Cuadro de decisión para evaluar las metodologías

<i>Rango de evaluación</i>		0 -10			
Metodología					
HPTRM		Geomanta MacMat®R		Mantos permanentes con block de concreto adheridos	
<i>Característica</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Característica</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Característica</i>	<i>Evaluación</i>
Resistentes a erosión en diques con pendiente pronunciadas.	7	Proporciona un tipo de revestimiento de mayor resistencia acorde a las velocidades de flujo.	9	Flexibilidad del manto debido a espaciamentos.	9
Facil instalación	8	Brinda soporte debido al desenvolvimiento de la vegetación	10	Permite crecimiento de la vegetación.	10
Facilidad de ser tensionado a una capacidad portante maxima.	9	Puede soportar sin generarse daños, flujos intensos con materiales en suspensión o flotantes.	8	Fácil transporte e instalación.	9
Puede operar en su totalidad de manera inmediata luego de su instalación.	10	Mayor resistencia a la tracción.	8	Simula ser una armadura dura y flexible de alta resistencia en contra la erosión.	9
Desarrollo de vegetación.	8	recubrimiento especial de malla para protección contra corrosión.	5	Buen rendimiento en velocidades de flujos altos	9
Disponibilidad de material.	8	Disponibilidad de material.	8	adaptable con facilidad al paisaje	8
Buen desempeño en suelos tipo arena.	9	Buen desempeño en suelos tipo arena.	9	Seguridad en el movimiento de vehiculos y peatones	9
Alta durabilidad	8	Alta durabilidad	6	Disponibilidad de material	7
seguridad en el movimiento de vehiculos y peatones	5	Disponibilidad de materiales	8	Para mayor fijación puede utilizar anclajes	8
Costo en materiales	8	Costo en materiales	6	Costo en materiales	8
Totales	80		77		86

Fuente: Elaboración propia

Evaluando la metodología HPTRM, se definió que son resistentes a diques con pendientes pronunciadas, debido a que en Guatemala no se observan que los ríos de la zona posean pendientes pronunciadas se le asignó un valor intermedio, son fáciles de instalar esto nos da una ventaja debido que hay lugares de difícil acceso, cabe mencionar que estas cualidades poseen las tres metodologías. Poseen una facilidad de ser tensionado a una capacidad portante máxima. Una cualidad muy importante es que puede operar en su totalidad de manera inmediata luego de la instalación. Desarrolla la vegetación, esto una mayor resistencia, cualidad que poseen las tres metodologías. Por otra parte, en cuando a la disponibilidad del material, se puede encontrar en varios proveedores aquí en Guatemala. Su durabilidad en larga debido a su composición de poliéster. Cabe recalcar que posee un buen desempeño en la arena. La seguridad del movimiento de vehículos y peatones es buena, pero no posee movilidad de maquinaria pesada lo que nos deja que desear debido a que esas zonas son áreas de cultivos, su costo en materiales esa relativamente bajo. Por lo que esta solución nos proporciona una buena resistencia, pero no la idealmente adecuada debido al manejo de maquinaria pesada cerca de esos lugares.

La Geomanta MacMat®R proporciona un tipo de revestimiento de mayor resistencia acorde a las velocidades de flujo, característica que poseen las tres metodologías, Soporte para la vegetación como antes mencionado. Es importante mencionar que puede soportar el paso de materiales en suspensión y flotantes, una buena cualidad debido a que en Guatemala

no se tiene un control de desecho y la mayor parte de las comunidades tienden a desechos por medio de los ríos. Mayor resistencia a tracción, una buena cualidad debido a al alto flujo de agua. Cabe mencionar que la capacidad de la malla depende que si se encuentra sumergido puede tender a corroerse, por lo que es necesaria la protección de la corrosión.

Con algún tipo de material especial, al igual que su mantenimiento. Lo que podría generar gastos a futuro teniendo estimado gastos por mantenimiento. Posee un buen desempeño en las arenas esto debido al trabajo de la geomanta y la malla lo que proporciona una buena resistencia. De igual forma, esta metodología se encuentra en el país lo que se puede pedir al proveedor que se desee, el costo en materiales puede ser relativamente alto lo que nos indica un puntaje menor debido a que conlleva a una cantidad mayor de materiales.

Los mantos permanentes con block de concreto adheridos, nos proveen de una flexibilidad del manto debido a los espaciamientos entre los bloques lo que nos da la posibilidad del crecimiento de la vegetación que adicionado a las características de los bloques de concreto nos proporcionan una mayor resistencia. Debido a que el manto es en rollo suele ser fácil de transportar e instalar, por lo último fácil de adecuarse al paisaje en donde se implemente. Cabe recalcar que simula ser una armadura dura y flexible de alta resistencia en contra de la erosión. Posee un buen rendimiento a flujos con velocidades altas. además, es segura para el movimiento de transporte y peatones. De igual forma a las anteriores este material es fácil de encontrar en el país, según sea el caso o el estudio de suelos a profundidad que se tenga del agua puede ser utilizado por medio de la acción de la gravedad o para mayor fijación se puede utilizar anclajes. Según sea el caso suele ser una metodología baja en costos lo que le proporciona un puntaje alto debido a las condiciones de la zona de estudio.



1. Se determinó que el tipo de erosión fluvial con base a las tasas de erosión estimadas, para el Coyolate, por medio de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) se encuentran, según la clasificación de la FAO, en la parte alta en un nivel de erosión moderada, esto sin considerar el efecto de las prácticas de conservación de los suelos; Sin embargo la modelación de la erosión hídrica con el sistema de información geográfica mostró que en la partes altas en donde se tienen mayores pendiente, se desarrolla fuertes pérdidas de suelo, a diferencia de las partes bajas de la cuenca en donde se demuestran perdidas menores a los 200 ton/ha/a
2. Se determinó que los ríos de la costa sur bajan de las tierras altas de origen volcánico, encontrando el camino hacia al mar por medio de algunos valles existentes. Por lo anterior describiendo una topografía de alta a baja lo que genera zonas de erosión potencial fuerte. Además, se establece que los ríos son cortos lo que genera flujos de mayor velocidad También se tiene que los productos de las tierras altas volcánicas han generado planicies costeras compuestas de material aluvial cuaternario, material que son sensibles al proceso erosivo, adicionando a esto que los ríos de la cuenca del pacifico se caracterizan por ser cortos de cursos rápidos e impetuosos.
3. Se tiene que el transporte de sedimentos, son producto de la erosión de tierras Altas volcánicas, determinando que los fluvios que corren desde el altiplano volcánico, al cambiar de pendiente aumentan las velocidades de flujo, lo que tiende a generar pérdidas de suelo críticas. adicionalmente a esto se le agregan cuando es época lluviosa por estar cerca de las zonas volcánicas pueden llegar a acarrear sedimentos y hasta lahares que provocan inestabilidad de los cauces.
4. El tipo de drenaje del río Coyolate es paralelo. Sin embargo, se describe que en las partes altas se presenta un tipo de patrón dendrítico, por lo que este tipo de ríos, tienden a erosionar las orillas en la parte externa, lo que produce un tipo de fenómeno de avance de meandros, y al momento de reducir sus velocidades produce sedimentación. Según las características físicas de los suelos del Coyolate, estos tienden a erosionarse con facilidad debido a su composición arenas, limos y arcillas, en donde el material predominante son las arenas.

5. Con base a la evaluación de las propuestas HPTRM, Geomantas MacMat ®R y Mantos Permanentes con block de concreto adheridos. Y los resultados de la erosión potencial, se determinó que según el área de aplicabilidad que en este caso es al río Coyolate, la protección sugerida con base a la estimación de las características es la de mantos permanentes con block de concreto adherido. Ya que este tipo de manto nos provee de una manera fácil, eficiente y adaptable, la protección de las laderas de los ríos. Además, demuestra ser más manejable en cuanto a la cantidad de personal logrando reducir costos y resistente porque simula ser una armadura dura y al mismo tiempo flexible de alta resistencia en contra del fenómeno de la erosión fluvial.

---

### Recomendaciones

---

1. Utilizar la USLE ya que representa ser un método de fácil uso para poder estimar las áreas críticas y/o susceptibles al proceso de erosión fluvial en alguna otra área que se tenga de interés.
2. Para obtener resultados más exactos en cuanto a la estimación de erosión fluvial, se recomienda realizar trabajo de campo para obtener estudios de los suelos detallados sobre el área de interés, al igual que implementar el método de parcelas de cultivos para el factor de cobertura vegetal e identificar las prácticas de conservación implementadas en el lugar.
3. Continuar con el desarrollo de la metodología aplicada a la zona estimada, con el fin de evaluar con exactitud con base a el desarrollo de su diseño la viabilidad exacta de dicha metodología.
4. Entidades gubernamentales encargadas del estudio y desarrollo de prácticas de conservación promover más la implementación de metodologías de prevención de erosión para que así se eviten problemáticas derivadas del fenómeno.



- Alonso, J., Bermúdez, F. & Rafaelli, S. (2011). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. métodos de estimación*. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia. [https://books.google.com.gt/books?id=bSpiNY%5C\\_nwOIC](https://books.google.com.gt/books?id=bSpiNY%5C_nwOIC)
- Anónimo. (2013). Diferentes tipos de erosión. <https://diferentestipos.com/erosion/>
- Béjar, M. (2004). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://books.google.com.gt/books?id=-JjGDwAAQBAJ>
- Benassi, J. (2017). Revestimientos de canales y cursos de agua. *Manual Técnico*.
- Black, P. E. (2011). The U.S. Flood Control Program at 75: Environmental Issues1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 48(2), 244-255. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00609.x>
- Blum, W. y col. (1994). A concept of sustainability and resilience based on soil functions: the role of the ISSS in promoting sustainable land use.
- Cajal, A. (2019). Los 6 Tipos de erosión y sus características. <https://www.lifeder.com/tipos-de-erosion/>
- DE SUELOS, P. D. L. E. (s.f.). Tema 1: Predicción de la erosión de suelos.
- de León, A. M. C. (s.f.). Susceptibilidad a la Licuefacción en la planicie costera del Pacífico de Guatemala.
- Duarte, J. (2003). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Univ. Nacional de Colombia. <https://books.google.com.gt/books?id=ETqRTGieUyYC>
- Engineers, A. C. U. (2017). U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS USES TURF REINFORCEMENT MAT TO REBUILD NEW ORLEANS LEVEES. <https://www.estormwater.com/erosion-control/us-army-corps-engineers-uses-turf-reinforcement-mat-rebuild-new-orleans-levees>
- Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate. (2011). <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2017/07/Estudio-Hidrologico-Coyolate.pdf>
- FAO. (2014). *Estimación del factor R de la U.S.L.E., en un transecto OESTE-ESTE de Chile central*. <http://www.fao.org/3/XII/0473-B2.htm>
- Flexamat. (2017). Permanent Erosion Control Solutions. *Manual Técnico*.

- Fuentes Montepeque, J. C. (2008). *Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones, en la cuenca del río Coyolate*. (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Graux, D. & Llano, J. (1975). *Fundamentos de mecánica del suelo, proyecto de muros y cimentaciones*. Editores técnicos asociados. <https://books.google.com.gt/books?id=96EEoaVynI4C>
- Herrera Villatoro, L. C. E. (2005). Caracterización e investigación geológica de los materiales utilizados en la construcción civil en Guatemala. *Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil*.
- Hudson, J. A. (1981). Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophysical Journal International*, 64(1), 133-150.
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://books.google.com.gt/books?id=m1DFcx3B0dYC>
- Leiva, J. (2017). La degradación de suelos agrícolas en Guatemala. *Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2), 135.
- Lianes, E., Marchamalo, M. & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*.
- López-Galindo, F., Muñoz-Iniestra, D., Hernández-Moreno, M., Soler-Aburto, A., del Carmen Castillo-López, M. & Hernández-Arzate, I. (2003). Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 19-41.
- Maderey Rascon, L. & Colaborador, J. (2006). *Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico*. Unam. <https://books.google.com.gt/books?id=0S3XDWsDzSAC>
- MAGA. (2001). Base de Datos Digital de la República de Guatemala a escala 1:250,000. *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación*, 1(1), 2.
- Morgan, R. (1994). A predictive model for the assessment of soil erosion risk, journal of agricultural engineering research. *Vol. 1*(1), pp. 245-253.
- Morocho, E. (2008). *Universidad Estatal De Bolívar*. <https://books.google.com.gt/books?id=VpgzAQAAMAAJ>
- Mott, R. & Pedraza, C. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. Pearson Educación. <https://books.google.com.gt/books?id=xUavR0u66PEC>
- Oñate-Valdivieso, F. (2004). Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. *Revista electrónica de la REDLACH, Loja, Ecuador*, 1(1), 27-32.
- Pérez, G. & Restrepo, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia. <https://books.google.com.gt/books?id=FA5Jr7pXF1UC>
- Rodríguez, A. (2004). *Geografía General*. Pearson Educación. <https://books.google.com.gt/books?id=1Zc4NYGXhVhC>
- Salguero, M. R. (2020). Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica (USLE) Universal Soil Loss. *Area de tecnología - Universidad de San Carlos de Guatemala*, 1(1), 10.
- Vaneland, A., Rousseau, P., Lal, R., Gabriels, D. & Ghuman, B. (1984). Testing the applicability of a soil erodibility nomogram for some tropical soils. *IAHS Publ*, 144, 463-473.

Cuadro 7: Anexo 1 - “Factor C, para distintas cantidades de residuo vegetal en ton/ha aplicados a diferentes porcentajes y longitudes maximas de pendientes del terreno”

TIPO DE RESIDUO VEGETAL	CANTIDAD (TON/ha)	PENDIENTE (%)	LONGITUD MÁXIMA (m)	FACTOR C
Ninguno	0	Todos	--	1.0
Paja o heno	2.47	1-5	61	0.20
Sin eliminación de rastrojo y tirado sobre el suelo	2.47	6-10	30	0.20
Incorporación de rastrojo	3.71	1-5	90	0.12
Incorporación de residuos vegetales con maquinaria	3.71	6-10	46	0.12
	5.00	1-5	120	0.06
	5.00	6-10	60	0.06
	5.00	11-15	46	0.07
	5.00	16-20	30	0.11
	5.00	21-25	25	0.14
	5.00	26-33	15	0.17
	5.00	34-50	10	0.20

Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA Dic. 1978

Cuadro 8: Anexo 2 - “Factor C para terrenos con cubierta permanente (potreros)”

TIPO Y ALTURA	% DE COBERTURA	DENSIDAD DE CUBIERTA VEGETAL					
		% DE CUBIERTA DEL SUELO					
		0	20	40	60	80	95
No apreciable	--	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
Malezas o arbustos con una altura promedio de 50 cm.	25	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
	50	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
	75	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
Arbusto con una altura promedio de 2 metros	25	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
	50	0.34	0.16	0.08	0.030	0.012	0.003
	75	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
Arbustos con altura promedio de 4 metros	25	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
	50	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
	75	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003

Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA Dic. 1978

Cuadro 9: Anexo 3 - "Factor C, para terrenos forestales no cultivados"

% DEL AREA CUBIERTA POR ARBOLES	% DEL AREA CUBIERTA POR HOJARASCA NO MENOR DE 5 cm.	FACTOR
100 - 75	100 - 90	0.0001 - 0.001
70 - 45	85 - 75	0.002 - 0.004
40 - 20	70 - 40	0.003 - 0.009

Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA  
Dic. 1978

Cuadro 10: Anexo 4 - "Factor P y distancias entre líneas guías en cultivos a nivel según la pendiente del suelo"

% DE PENDIENTE	VALOR DE P	LONGITUD MAXIMA EN m
1 - 2	0.60	120
3 - 5	0.50	100
6 - 8	0.50	60
9 - 12	0.60	45
13 - 16	0.70	20
17 - 20	0.80	15
21 - 25	0.90	10

Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA  
Dic. 1978

Cuadro 11: Anexo 5 - "Factor P y espaciamiento de terrazas cultivo al contorno"

% DE PENDIENTE	MANEJO DEL SUELO	
	AL CONTORNO	EN FAJAS
1 - 2	0.40	0.20
3 - 8	0.50	0.25
9 - 12	0.60	0.30
13 - 16	0.70	0.35
17 - 20	0.80	0.40
21 - 25	0.90	0.45

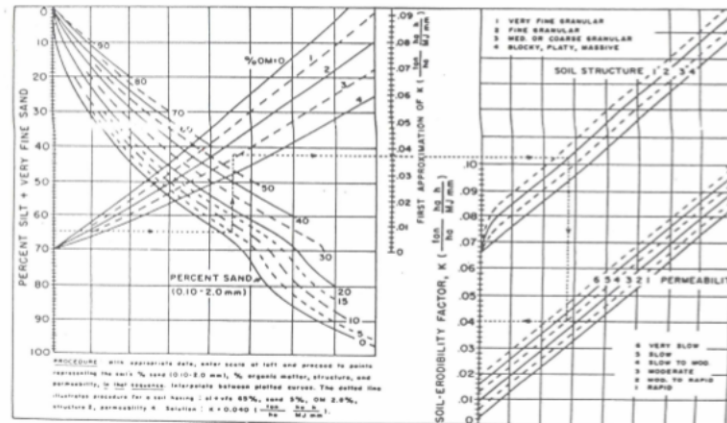
Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA  
Dic. 1978

Cuadro 12: Anexo 6 - "Factor P ancho máximo de fajas máximas longitud entre líneas guías a diferentes pendientes en cultivos de fajas al contorno"

% DE PENDIENTE	MANEJO DEL SUELO	
	AL CONTORNO	EN FAJAS
1 - 2	0.40	0.20
3 - 8	0.50	0.25
9 - 12	0.60	0.30
13 - 16	0.70	0.35
17 - 20	0.80	0.40
21 - 25	0.90	0.45

Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA  
Dic. 1978

Figura 42: Anexo 7 - “Gráfico Nomograma”



Fuente: (Salguero, 2020)

Figura 43: Anexo 8 - “Factor C - Factor vegetación”

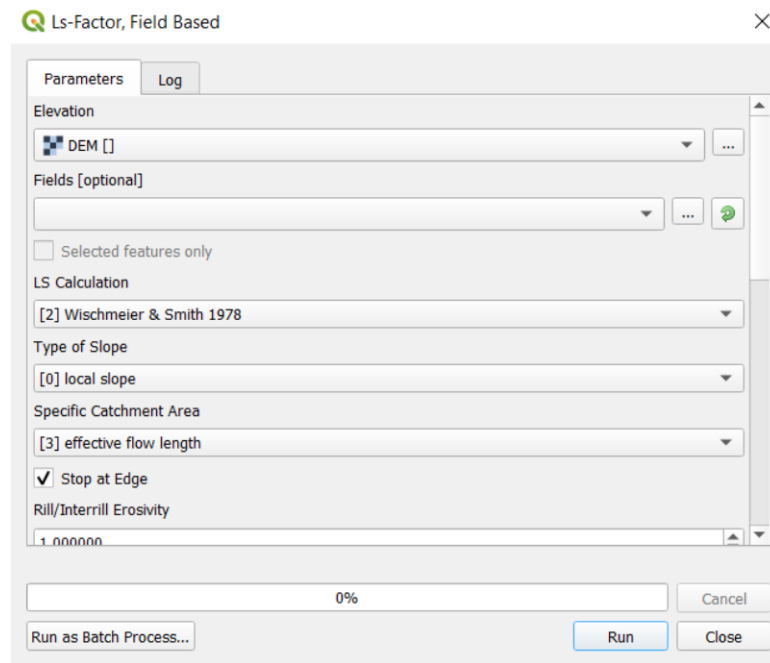
230 AGRONOMÍA COSTARRICENSE

Cuadro 5. Factor vegetación (factor C) de coberturas arbóreas, de matorral y pastos en la cuenca del río Brrís.

Cobertura	FACTOR C Moore 1987	FAO 1989	ICE 1999	Saberío 2002 Gómez 2002 CATE 2003	Marchamalo 2004, 2007	Linares 2009
<b>Bosque</b>						
Bosque primario	0,0001					
Bosque natural		0,003	0,001-0,003			0,003
Selva virgen		0,001				
Bosque denso				0,003-0,010		
Bosque claro, sustrato herbáceo denso				0,003-0,010		
Bosque claro, sustrato herbáceo degradado				0,010-0,100		
Bosque secundario		0,007			0,003	
Charral, pasto	0,018					
Charral					0,012	
Bosque degradado						0,037
<b>Matorral/Pastos</b>						
Matorral denso				0,003-0,030		
Matorral claro, sustrato herbáceo denso				0,003-0,030		
Matorral claro, sustrato herbáceo degradado				0,030-0,100		
Piramo				0,003-0,040		
Pasto		0,009	0,01-0,015		0,013	
Pasto (natural o mejorado)		0,008				
Vegetación natural baja (altura:50cm)		0,012				
Pastizal natural completo				0,030-0,010		
Pastizal natural pastoreado				0,040-0,200		
Pastizal cultivado (manejado)				0,003-0,040		
Pasto de corta						0,012
Potrero						0,013
Potrero carga normal						0,002
Potrero degradado						0,002
Potrero muy degradado						0,016
<b>Cultivos permanentes</b>						
Café, café con macadamia o pejíbeye	0,300					
Cultivos perennes		0,079	0,086			
Café		0,09			0,080	
Banano		0,062				
Cacao		0,05				
Cultivos permanentes asociados (denso)				0,010-0,300		
Cultivos permanentes no densos				0,100-0,450		
Huertos de subsistencia				0,300-0,900		
Árboles frutales						0,003
<b>Cultivos anuales</b>						
Caña, caña brava	0,050					
Cultivos anuales		0,495	0,340			
Papa-zanahoria o papa-cebolla		0,615				
Maíz		0,519				
Tomate/chile dulce		0,502				
Café		0,263			0,050	
Cultivos anuales de ciclo corto (1-6 meses)				0,300-0,800		
Cultivos anuales de ciclo largo (6 meses)				0,400-0,900		
Cultivos (cobertura baja)					0,650	
Cultivos (cobertura media)					0,500	
Cultivos (cobertura alta)					0,400	
Papa-bricoli						0,260
Papa-zanahoria						0,300
Papa-zanahoria papa						0,300
Papa-papa-bricoli						0,300
Papa-zanahoria-bricoli						0,360

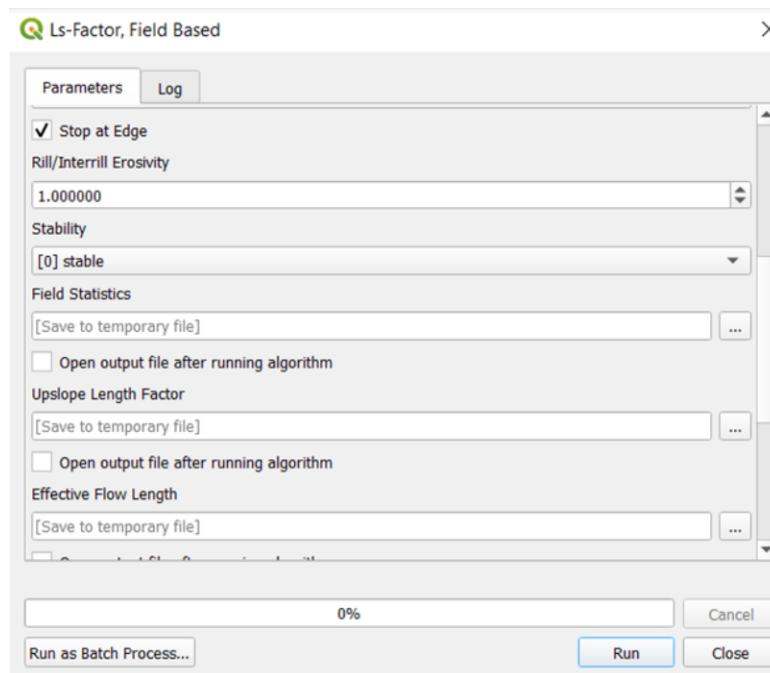
Fuente: *Una Guía para la planificación de la conservación del suelo*. Manual 537. USDA Dic. 1978

Figura 44: Anexo 9 - "Cálculo factor LS"



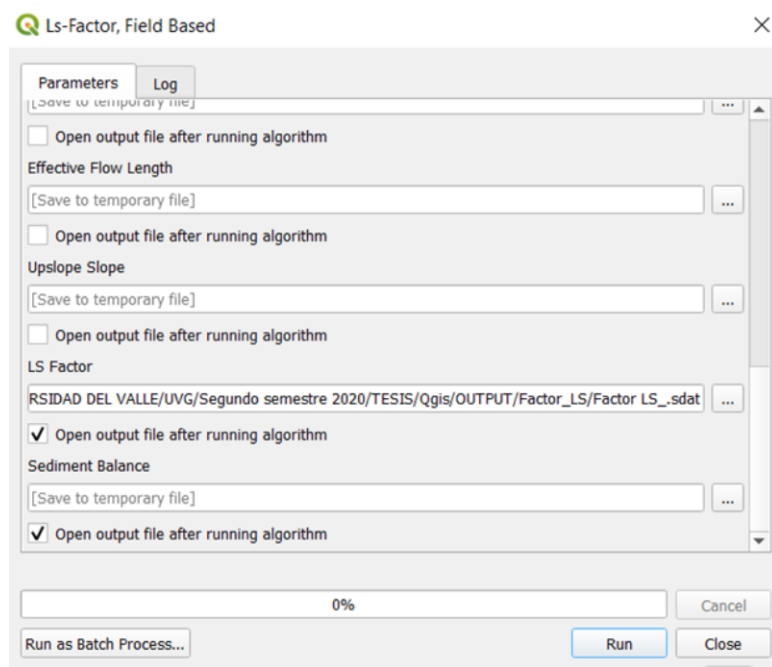
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 45: Anexo 10 - "Factor C - Factor LS"



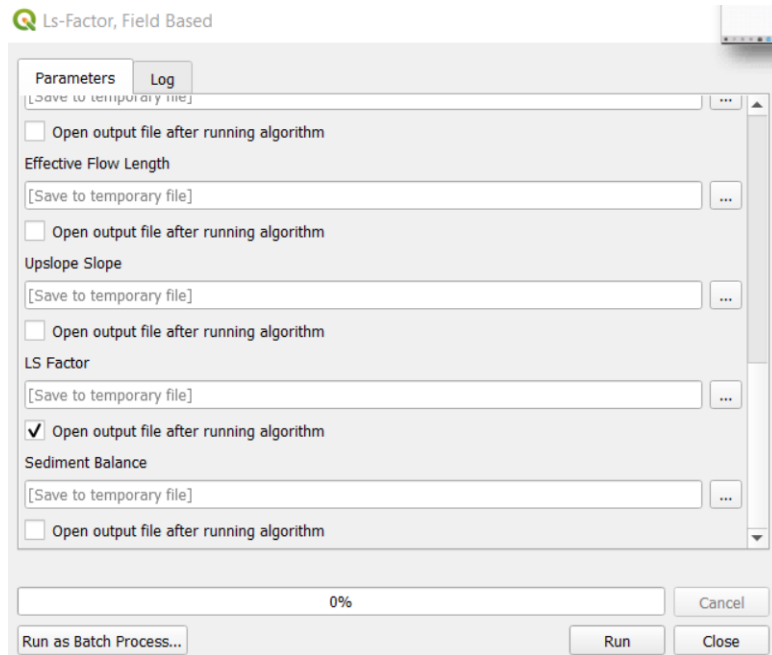
Fuente: *Elaboración propia*

Figura 46: Anexo 11 - "Cálculo factor LS"



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 47: Anexo 12 - "Factor C - Factor LS"



Fuente: *Elaboración propia*



1. Erosión fluvial Es la erosión debida a la acción del agua.
2. Susceptibilidad Capaz de recibir el efecto o acción que se indica.
3. Medanos Acumulación de arena en forma de media luna que forma y empuja el viento en la costa o en el desierto.
4. Precipitación La caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre.
5. Escorrentía Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.
6. Erosividad La capacidad de erosionar que exhibe cada agente actuante, ya sea por impacto si se trata de lluvia, o por arrastre en el caso del viento y cursos de agua o hielo.
7. Erodabilidad Susceptibilidad del suelo a la erosión por agua o viento.
8. Corrientes lólicas Masas de agua que se mueven siempre en una misma dirección.
9. Aloctónas No es originario del lugar en que se encuentra.
10. Anastomosados Que posee una estructura trenzada.