



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Trabajo de Tesis Para optar al grado de Máster en Ciencias del Agua

Título del Trabajo

“Influencia de las características morfométricas en la erosión de la cuenca del Río Tamulasco y su efecto en el aporte de sedimentos al Embalse Cerrón Grande, El Salvador”

Autor

Licdo. José Luis Sierra Ortez

Tutor: PhD. Heyddy Calderón Palma (IGG-CIGEO- UNAN-Managua).

Asesor: MSc. Yader Santiago Caballero Arbizú (CIRA- UNAN-Managua).

MSc. Oscar Armando Amaya Monterrosa (LABTOX- UES).

Managua, 01 de abril del 2019.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Trabajo de Tesis Para optar al grado de Máster en Ciencias del Agua

Título del Trabajo

“Influencia de las características morfométricas en la erosión de la cuenca del Río Tamulasco y su efecto en el aporte de sedimentos al Embalse Cerrón Grande, El Salvador”

Autor

Licdo. José Luis Sierra Ortez

Tutor: PhD. Heyddy Calderón Palma (IGG-CIGEO- UNAN-Managua).

Asesor: MSc. Yader Santiago Caballero Arbizú (CIRA- UNAN-Managua).

MSc. Oscar Armando Amaya Monterrosa (LABTOX- UES).

Managua, 01 de abril del 2019.

DEDICATORIA

“La paciencia es un árbol de raíz amarga, pero de frutos muy dulces”

Tras mucho tiempo de esfuerzos y sacrificios, final y felizmente se ha concluido este trabajo de investigación, el cual dedico a Dios todopoderoso y a mi familia, los pilares fundamentales de mi vida; mi madre, mi esposa, mis hermanos, abuelos, tíos, primos y sobrinos, ese grupo de personas que siempre están dispuestos a caminar de nuestra mano, aún en las caídas, nunca se apartan de nuestro lado, demostrando que el amor es real, existe, por ello, la familia, al igual que la satisfacción de un esfuerzo total y de un trabajo bien hecho en cada uno de nuestros emprendimientos, es para siempre y nos llena de orgullo y ganas de seguir adelante en este viaje tan lleno de contrastes que llamamos vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por la oportunidad brindada al financiar los estudios de maestría en la región centroamericana y favorecer a muchos otros estudiantes como yo.

A la Universidad de El Salvador (UES), quien a través del Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX) apoyó esta investigación desde sus inicios y permitió el análisis de muestras.

A la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), por brindar apoyo en toda la fase de campo de esta investigación, así como información necesaria para la realización de la misma.

Al Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” (CENTA), por el apoyo técnico y acompañamiento en el desarrollo de diferentes etapas de esta investigación.

Al Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/ UNAN-Managua), por brindarme la oportunidad de cursar esta maestría y por acompañarnos con una excelente planta docente y aun mejores seres humanos, gracias por todo hermanos nicaragüenses.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios todo poderoso por permitirme concluir con esta nueva etapa de mi vida profesional y nunca abandonarme en esta carrera llamada vida.

A mi familia, por ser después de Dios mi apoyo incondicional y mi fuerza en los momentos de mayor necesidad.

A mi esposa, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo, contra todo, pero juntos.

Al Ing. Rodolfo Cáceres, por creer en la importancia de esta investigación y brindar todo su apoyo para que llegara a buen término.

Al Licdo. Oscar Amaya Monterrosa por su apoyo, comprensión y motivación a finalizar esta investigación.

Al Sr. Edwin Aguilar, por haber sudado la camisa a mi lado en las largas jornadas de campo, gracias.

A la PhD. Heyddy Calderón, por su tiempo, apoyo y acompañamiento brindado a lo largo de esta investigación.

Al Máster Yader Caballero por su apoyo como asesor de esta investigación.

A la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) por apoyarme en la finalización de mi trabajo de grado.

A los motoristas, personal de campo, laboratorio y demás instancias de CEL y CENTA, quienes desinteresadamente brindaron sus conocimientos, consejos y tiempo para la realización de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMEN.....	XIV
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 ÁREA DE ESTUDIO.....	17
2.1 Ubicación y división político administrativa.....	17
2.2 Clima.....	18
2.3 Geología.....	18
2.4 Uso de suelo.....	19
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
4 OBJETIVOS.....	22
4.1 Objetivo general.....	22
4.2 Objetivos específicos.....	22
5 JUSTIFICACIÓN.....	23
6 MARCO TEÓRICO.....	25
6.1 El suelo y su degradación.....	25
6.2 La erosión del suelo.....	25
6.3 Erosión hídrica.....	26
6.3.1 Erosión por salpicadura y erosión laminar.....	27
6.3.2 Erosión por surcos o en regueros.....	27
6.3.3 Erosión en barrancos o cárcavas.....	27
6.4 Factores que afectan la erosión.....	27

6.4.1	Clima.....	28
6.4.2	Cobertura vegetal.....	28
6.4.3	Tipos de suelo.....	29
6.4.4	Uso de suelo.....	30
6.4.5	Topografía.....	30
6.5	Erosión en cuencas hidrográficas.....	30
6.5.1	Morfometría y erosión.....	31
6.5.2	Transporte de sedimentos en la cuenca.....	32
6.6	Estimación de la erosión.....	32
6.6.1	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	33
6.6.2	Radionúclidos como trazadores ambientales.....	35
7	METODOLOGÍA.....	36
7.1	Generalidades.....	36
7.2	Análisis morfométrico.....	36
7.2.1	Parámetros de forma.....	36
7.2.2	Coefficiente de Gravelius (Ic):.....	36
7.2.3	Parámetros del relieve.....	38
7.3	Selección y ubicación de los sitios de muestreo.....	40
7.4	Estimación de la pérdida de suelo.....	41
7.4.1	Metodología USLE.....	41
7.4.2	Método del Cesio 137 (¹³⁷ Cs).....	43
7.4.3	Carga de Sedimentos.....	44
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
8.1	Análisis morfométrico.....	46
8.1.1	Generalidades.....	46
8.1.2	Suelos.....	47
8.1.3	Morfometría.....	47
8.1.4	Relieve.....	49

8.1.5	Índice de Posición Topográfica.....	49
8.2	Estimación de la pérdida de suelo.....	54
8.2.1	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).	54
8.2.2	Metodología del Radionúclido ¹³⁷ Cs.	59
8.3	Carga de sedimentos	61
9	CONCLUSIONES.....	62
10	RECOMENDACIONES	64
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	65
12	ANEXOS.....	72
	Anexo 1: Fotografías	72
	Anexo 2. Ejemplo de formato utilizado para pruebas de infiltración.....	78
	Anexo 3. Análisis de lluvia.....	79
	Anexo 4. Cálculos utilizados en la elaboración del ráster del factor K.....	80
	Anexo 5 “Propuesta de especies forestales para la reforestación de la cuenca alta del río Tamulasco, Chalatenango”.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA.....	17
Figura 2. Mapa de Usos de Suelo, Cuenca del río Tamulasco. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA.....	19
Figura 3. Esquema del Análisis de vecinos circular para el cálculo del TPI. Fuente: Jenness, 2006.....	39
Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA.....	40
Figura 5. Diseño y dimensión de las trampas de sedimento.....	44
Figura 6. División de la cuenca del río Tamulasco.	46
Figura 7. Curva hipsométrica y gráfica de frecuencias altitudinales de la cuenca del río Tamulasco.....	49
Figura 8. Comparativa de dos escalas de TPI para la cuenca del río Tamulasco.....	50
<i>Figura 9. Clasificación de las formas del relieve de la cuenca del río Tamulasco</i>	51
Figura 10. Perfil longitudinal del río Tamulasco y poblados importantes.	52
Figura 11. Cauce del río Tamulasco, parte alta.	52
Figura 12. Comparativa entre el ancho del cauce. A) Cauce del río Tamulasco, parte alta; 1- cauce encañonado, 2- anchura reducida, 3- lecho con rocas de gran tamaño B) Cauce del río Tamulasco, parte media. 1- disminución en la altura del margen, 2- aumenta el ancho del río, 3- el tamaño de las rocas del lecho disminuye.	53
Figura 13. Factor R, erodabilidad de la lluvia.	54
Figura 14. Factor K, erodibilidad del suelo.	55
Figura 15. Factor LS, longitud y grado de la pendiente.	56
Figura 16. Factor LS (Longitud y grado de la pendiente).	57
Figura 17. Factor A, Pérdida de suelo en Ton/ha/año según el modelo USLE.....	58
Figura 18. Detalle de los sitios de muestreo del ¹³⁷ Cs.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. División político administrativa del área de la cuenca.....	17
Tabla 2. Clasificación de geoformas a partir del TPI.....	39
Tabla 3. Tipos, capacidades y uso de suelo de la cuenca del río Tamulasco.	47
Tabla 4. Parámetros morfométricos generales de la cuenca del río Tamulasco.....	48
Tabla 7. Lluvia promedio anual (mm).....	79
Tabla 8. Valores IMF	79
Tabla 9. Valores de erosividad de lluvia (Factor R - USLE)	79
Tabla 10. Parámetros de campo utilizados para el cálculo del Factor K.....	80
Tabla 11. Parámetros y valores K obtenidos a partir de la tabla 10	81

ABREVIATURAS.

ANP	=	Área Natural Protegida
Bq	=	Becquerel
CEL	=	Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa
CENTA	=	Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal
cm	=	Centímetro
Cs	=	Cesio
FAO	=	Food and Agriculture Organization of the United Nations
h	=	Hora
Ha	=	Hectárea
IF	=	Índice de Fournier
IFM	=	Índice de Fournier Modificado
Km	=	Kilometro
Km ²	=	Kilómetro cuadrado
LABTOX	=	Laboratorio de Toxinas Marinas
m ²	=	Metro cuadrado
MAG	=	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MARN	=	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Mg	=	Mega gramo (tonelada)
MJ	=	Megajoule
mm	=	Milímetro
msnm	=	Metros sobre el nivel del mar
Ton	=	Tonelada
TPI	=	Topographic Position Index
UES	=	Universidad de El Salvador
UNESCO	=	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USDA	=	United States Department of Agriculture
USLE	=	Universal Soil Loss Equation

RESUMEN

La erosión en cuencas hidrográficas es uno de los principales problemas que enfrenta el recurso suelo a nivel mundial; acciones como la deforestación, la inadecuada implementación de prácticas agrícolas y el cambio de uso de suelo contribuyen al agravamiento de este problema. En El Salvador, la cuenca del río Tamulasco afronta estos y otros desafíos, y adquieren relevancia debido a que dicha cuenca es uno de los principales afluentes del Embalse Cerrón Grande, humedal de importancia ecológica y económica para el país y que actualmente enfrenta graves problemas de eutroficación y asolvamiento. Tomando en cuenta estos aspectos se realizó la presente investigación con el propósito de determinar el grado de la erosión hídrica que actualmente sufre la cuenca, la influencia de la orografía sobre este fenómeno y como esto se traduce en aporte de sedimentos al embalse cerrón Grande. Inicialmente se realizó la caracterizar morfológicamente el terreno de la cuenca para establecer la influencia que estas características ejercen en los procesos de erosivos en la cuenca; se calculó la tasa de pérdida de suelo en la cuenca mediante la implementación de dos metodologías de cuantificación indirecta, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y la actividad del radionúclido ¹³⁷Cs; así como también se determinó la producción de sedimentos, de fondo y suspendidos, mediante metodologías convencionales de análisis de calidad de agua. Los análisis realizados mostraron que la cuenca del río Tamulasco se ve influenciada en gran medida por las condiciones de su pendiente más que por la forma misma de la cuenca, también se evidencio que más del 8% del terreno de la cuenca posee tasas de erosión severas, superiores a las 200 Ton/Ha/año, siendo los factores más influyentes en esta condición la longitud y grado de la pendiente, así como la cobertura del suelo. Por otro lado, fue evidente el aumento en la producción de sedimentos registrados a la altura de la cuenca medio sucedidos durante la época lluviosa, los cuales estiman un promedio de aporte al embalse de 659 Ton/día de sólidos suspendidos y 21 Ton/año de sedimentos de fondo, durante la época lluviosa, estos últimos, son los que quedarán directamente depositados en el vaso del embalse. Todos estos resultados condujeron a la caracterización de la problemática de erosión en la cuenca y con ellos se procedió a la elaboración de una propuesta de manejo de suelo a través de la reforestación con especies nativas de árboles para mitigar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Tamulasco y reducir así la cantidad de sedimentos que posteriormente llegaran a depositarse el Embalse Cerrón Grande.

Palabras Clave: *USLE, Erosión, Sedimentos, Cesio 137.*

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se estima que un 33% de los suelos sufren de erosión (FAO - GTIS, 2015), este fenómeno producto de la degradación antrópica de los suelos, representa pérdidas millonarias para la agricultura a nivel global, además de representar un grave peligro para el equilibrio ecológico en diversas regiones del mundo. El Salvador no es ajeno a esta problemática, ya que, según estimaciones del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), en 40 de los 262 municipios de la república se sufren graves problemas relacionados con la erosión, lo cual se debe principalmente al establecimiento de cultivos agrícolas sin ningún tipo de obras de conservación de suelos (MARN, 2002).

El río Tamulasco es uno de los afluentes más importantes del Embalse Cerrón Grande, un cuerpo de agua de origen artificial de 135 km² propiedad de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), una entidad autónoma del gobierno central que en 1999 realizó el primer y único estudio global de sedimentación de la cuenca del río Lempa, con el propósito de estimar la vida útil de los embalses propiedad de dicha entidad, ubicados dentro de la cuenca. En ese entonces, el río Tamulasco formó parte de dicho estudio, por lo que 16 años después la CEL, en el marco de su proyecto Vida, desea identificar cómo ha evolucionado la problemática de la pérdida de suelo en esta cuenca y ejecutar medidas de conservación que disminuyan el aporte de sedimentos que ésta pueda generar hacia el embalse.

Para la evaluación del estado actual de los procesos erosivos en la cuenca del río Tamulasco se realizó una investigación de tipo descriptiva de corte longitudinal, la cual estuvo dividida en 3 etapas; la caracterización morfométrica de la cuenca, la estimación de la pérdida de suelo, la cual se evaluó a través de 2 métodos cuantitativos indirectos, la ecuación universal de pérdida de suelo y la técnica nuclear del ¹³⁷Cs; finalmente se determinó la carga de sedimentos producidos por la cuenca durante el período lluvioso del año 2016.

De las diversas etapas de análisis se obtuvo que la respuesta de la cuenca a la concentración de lluvia es rápida (20.47 min), debido principalmente a su sistema de pendientes y no a su factor de forma, esto contribuye a la formación de crecidas, las cuales pueden representar problemas de inundación para las zonas de la cuenca baja. La erosión hídrica de la cuenca evaluada por el modelamiento USLE indica que en más del 47% del área la cuenca posee un grado severo de erosión (>200 Ton/ha/año), el cual coincide, en la mayoría de los casos con el uso de suelo destinado al cultivo de pasto y de granos básicos.

La técnica nuclear del ^{137}Cs indica valores de erosión entre las 18 y las 84.7 Ton/ha/año, los cuales se encuentran dentro del rango de valores obtenidos por el modelamiento USLE. Finalmente, la evaluación de la carga sedimentaria proporcionó como resultado un movimiento promedio de 2.41×10^5 Ton/año, en el punto “puente Tamulasco”. Todas estas estimaciones nos indican una pérdida significativa de suelo en la cuenca producto de la depredación desmedida del parque forestal de la cuenca alta del río Tamulasco asociada con malas prácticas agrícolas y un progresivo cambio en el uso de suelo.

2 *ÁREA DE ESTUDIO.*

2.1 *Ubicación y división político administrativa.*

La cuenca del río Tamulasco se encuentra ubicada al norte de San Salvador, en el departamento de Chalatenango (Figura 1) dentro de la Región Hidrográfica I (Lempa, UH-9574 según clasificación Pfafstetter – MARN, 2016), presenta una superficie aproximada de 106 km², tiene su origen en el macizo montañoso del municipio de Ojos de Agua y desemboca en el Embalse Cerrón Grande a la altura de municipio de Azacualpa.

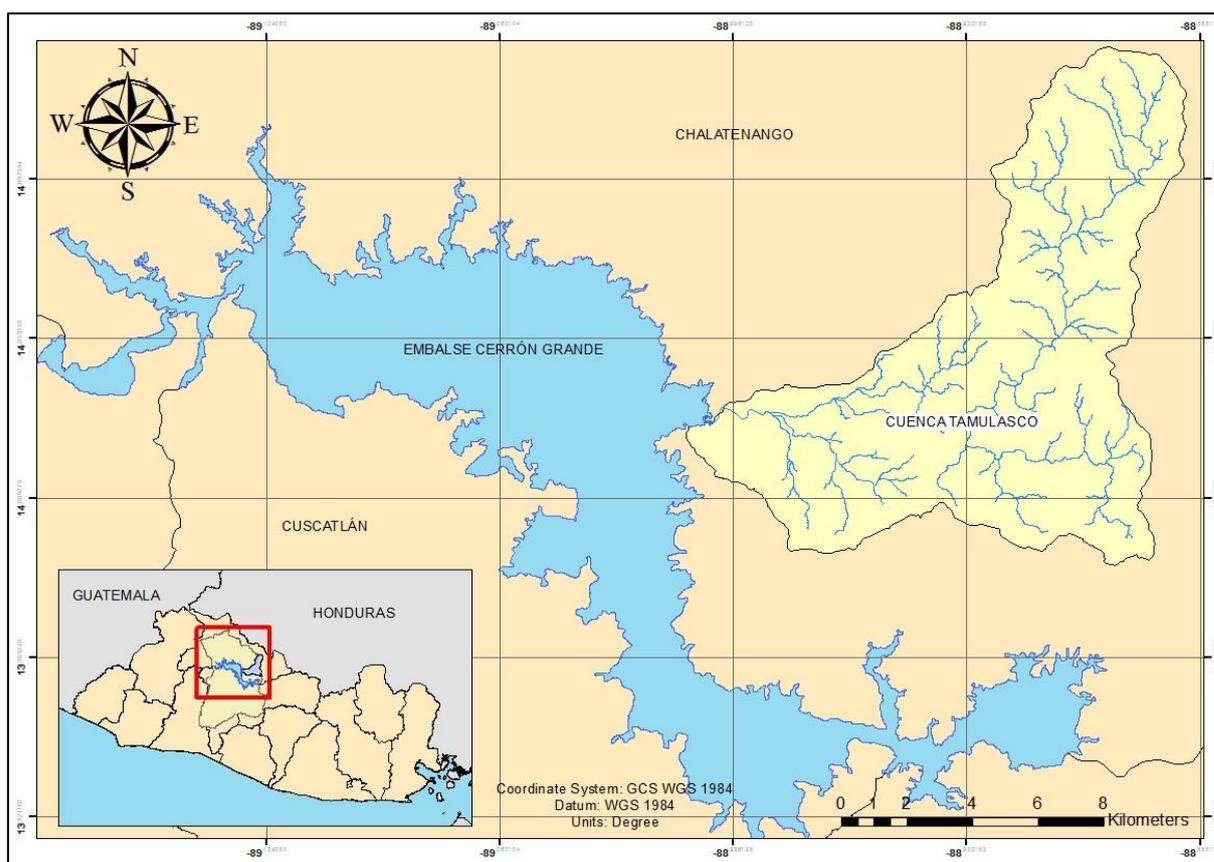


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA.

La superficie de la cuenca del río Tamulasco es compartida por 10 municipios del departamento de Chalatenango, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. División político administrativa del área de la cuenca

Cuenca	Municipio	Área (km ²) Municipio	Área dentro de la cuenca (km ²)
Tamulasco	Azacualpa	22.29	5.86
	Chalatenango	109.84	53.31

Cuenca	Municipio	Área (km²) Municipio	Área dentro de la cuenca (km²)
	Concepción Quezaltepeque	39.65	0.54
	La Laguna	40.69	10.81
	Las Vueltas	14.98	4.15
	Ojos de Agua	40.12	2.59
	Potonico	37.97	3.51
	San Antonio Los Ranchos	10.13	9.75
	San Isidro Labrador	36.48	1.65
	San Miguel de Mercedes	32	13.84

Fuente: Elaboración propia de datos proporcionados por CENTA.

2.2 *Clima.*

Según la clasificación climática de Holdrige la cuenca cuenta con un clima de bosque húmedo tropical transición subtropical; su régimen de lluvia promedio anual se encuentra entre los 1800 y 2500 mm, mientras que la temperatura varía entre los 16 ° C y 31° C al año (Romero, 2003; MARN, 2016).

2.3 *Geología.*

Según Mata & Puiguirguer (2000), El Salvador “se caracteriza geológicamente por la casi exclusiva presencia de materiales volcánicos resultantes de un vulcanismo relativamente intenso desde principios del terciario hasta la actualidad que ha dado lugar a la formación de numerosos edificios volcánicos, la mayoría de ellos con laderas inestables, formados por materiales volcánicos poco consolidados”.

En el departamento de Chalatenango, específicamente en la región de la cuenca del río Tamulasco, se han identificado tres formaciones pertenecientes al terciario que son Bálamo, Chalatenango y Morazán; más una cuyo origen se remonta al cuaternario que es la formación Cuscatlán, las cuales son de origen intrusivo con presencia de rocas de carácter granítico-diorítico

De acuerdo con Mata & Puiguirguer (2000), “las formaciones geológicas del terciario inferior que dan lugar a los relieves de la Cordillera Norte están sometidas a la continua acción erosiva de los agentes geológicos externos, especialmente precipitaciones muy intensas durante el período lluvioso, con precipitaciones superiores a los 2.500 mm anuales. En consecuencia, estas rocas, que presentan una intensa fracturación, son alteradas y afectadas de forma frecuente por procesos de inestabilidad gravitatoria”

2.4 Uso de suelo.

De acuerdo con los datos cartográficos proporcionados por el Centro de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Alvares Córdova”(CENTA), los suelos de la cuenca del río Tamulasco son de inminente vocación agrícola (Figura 2), predominando el cultivo de granos básicos como el maíz y el frijol; el rango altitudinal oscila entre los 250 y los 1500 msnm, con un sistema de pendientes que van desde el 0.5% hasta más del 86%; hacia las partes altas de la cuenca se encuentran relictos boscosos del Área Natural Protegida (ANP). La Montañona en los municipios de Ojos de Agua y La Laguna; en la zona media de está predominan las tierras agrícolas y los sistemas agroforestales mayormente acentuados a las riberas del río; en las planicies bajas del río Tamulasco, en los sectores de Chalatenango, San Miguel de Mercedes y Azacualpa (cuenca baja), predominan los cultivos de caña y los potreros, ya que en esta zona la actividad ganadera se intensifica más que en el resto del territorio de la cuenca.

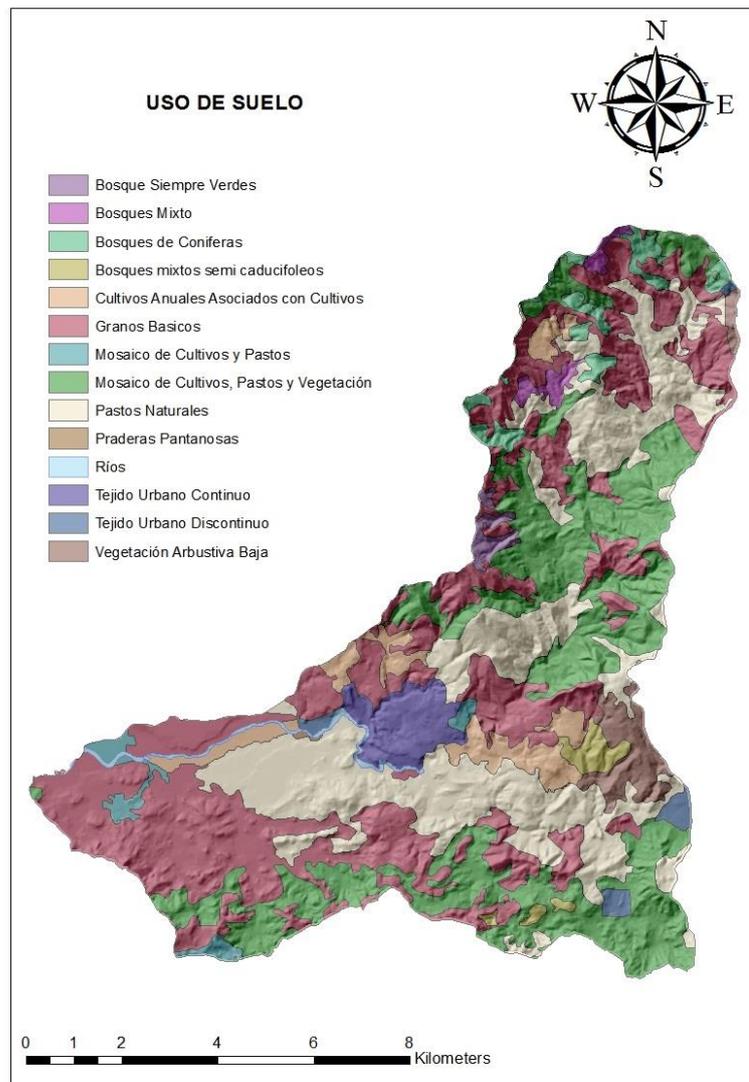


Figura 2. Mapa de Usos de Suelo, Cuenca del río Tamulasco. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El Salvador es el país más densamente poblado de la región centroamericana (245 hab/km², DIGESTYC, 2008), lo cual implica una alta demanda de recursos naturales, entre ellos el suelo, principalmente para la construcción de complejos habitacionales y la producción de alimentos, los cuales generalmente persisten en detrimento de la cobertura forestal del país, ya que según el Informe Número 262 del PNUD se estima que la proporción de área forestal con respecto al área total del país disminuyó del 9.3% en 1990 a un 5.8% en el 2000. A pesar que en el país existe una ley de ordenamiento territorial, promulgada en el año 2011, esta tiene una visión político-administrativa del territorio y no favorece el ordenamiento desde el enfoque de cuenca, que es congruente con la protección de los recursos suelo y agua.

El alto grado de burocratización en la administración política de las diferentes regiones del país conlleva, en el mejor de los casos, a la ejecución aislada de programas ambientales de muy bajo impacto; esta visión sectorizada de los recursos naturales provoca la fragmentación de los diversos ecosistemas, ya que de acuerdo a la visión de los gobernantes en turnos, así es el enfoque y la ejecución de los programas medioambientales destinados ya sea a la conservación, protección o recuperación de los mismos y no responden necesariamente a un programa estratégico central con visión a largo plazo.

Esta situación resulta verdaderamente problemática al momento de gestionar un recurso ambiental tan grande como por ejemplo el Embalse Cerrón Grande (135 km²), el cual es alimentado por 23 cuencas, dentro de las cuales se encuentra la del río Tamulasco, en la cual convergen 10 municipalidades del departamento de Chalatenango, tres de ellas, Ojos de Agua, Las Vueltas y La Laguna, son especialmente importantes debido a que se encuentran en parte alta de la cuenca y poseen bajos índices de desarrollo humano, lo cual implica que sus pobladores subsisten en gran medida del uso de los recursos de la cuenca (agua, suelo, leña, especies menores entre otros); solo en el municipio de Las Vueltas se estima que el 80.9 % de la población hace uso de combustibles sólidos para cocinar, especialmente leña (PNUD, 2005).

Además de la extracción de leña, en esta zona proliferan las parcelas de cultivos o huertos familiares, así como potreros y zonas de pastos cultivados, los cuales generalmente poseen un manejo inadecuado, aunque si bien estas son de corta extensión, su importancia radica en la abundancia de las mismas, por lo que deben de ser considerados como prioritarias al momento de evaluar el impacto ambiental de estas actividades en los procesos de erosión y sedimentación de la cuenca.

Todo este panorama pone en evidencia la agudización del problema de erosión en la cuenca, lo cual se traduce en una alta deposición de sedimentos en el embalse Cerrón Grande, los cuales al llegar a él, no solamente afectarán su capacidad de almacenamiento, sino que también intervendrán en la calidad ecológica de este cuerpo de agua, favoreciendo el proceso de eutrofización, problema que en la actualidad es de importante consideración debido a la sobrepoblación de jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y organismos fitoplanctónicos, especialmente de la división *Cyanophyta*, los cuales están ligados a problemas ambientales y de salud pública debido a su capacidad de generar proliferaciones masivas y su potencialidad tóxica.

4 OBJETIVOS.

4.1 *Objetivo general.*

- Evaluar la influencia que ejercen las características morfométricas de la cuenca en la erosión hídrica actual y el aporte de sedimentos de ésta al embalse Cerrón Grande.

4.2 *Objetivos específicos.*

- Identificar la influencia de los parámetros morfométricos en los procesos de erosión hídrica de la cuenca del río Tamulasco.
- Estimar la pérdida de suelo en la cuenca del río Tamulasco utilizando dos métodos de evaluación indirecta.
- Estimar la carga de sedimentos proveniente de la cuenca del río Tamulasco al Embalse Cerrón Grande.
- Proponer medidas de conservación de suelo en la cuenca del río Tamulasco para minimizar el aporte de sedimentos de esta al Embalse Cerrón Grande.

5 JUSTIFICACIÓN.

La erosión es uno de los principales problemas que afecta a la degradación del suelo (Belasri & Lakhouili, 2016), influyendo negativamente en la ecología, producción alimenticia, calidad y capacidad de almacenamiento de agua, propensión a inundaciones, etcétera, de una región (Park et al., 2011 citado por Morales, 2014). Los impactos económicos de la erosión son considerablemente altos, por ejemplo, dentro de la economía estadounidense el costo económico provocado por este fenómeno ronda entre los \$30 y \$44 mil millones de dólares al año.

El avance de la frontera agrícola, la aplicación de prácticas inadecuadas de cultivo, la deforestación y los fenómenos naturales agravan este problema. En El Salvador la erosión de suelos es especialmente preocupante, ya que según estimaciones de la FAO (2002), únicamente el 9.4% del territorio nacional cuenta con una cobertura boscosa, ya sea dentro de áreas naturales protegidas o no, plantaciones productivas u otros tipos de bosque, lo cual tiene severas repercusiones sobre el recurso suelo, ya que se estima que el 8% de los suelos del país se encuentran completamente degradados provocando que según las proyecciones del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) la producción de granos básicos del país para los próximos 10 años se reduzca en al menos un 30 % (Teorema, 2015).

La pérdida de suelo, no solamente afecta a los productores, los cuales pierden toneladas de fertilizantes y productos agroquímicos que emplean para mejorar la producción de sus parcelas de cultivos (FUSADES, 2007), sino que también afecta a los operadores de plantas potabilizadoras y centrales hidroeléctricas, ya que la incorporación del material edáfico por erosión laminar a los cuerpos de agua de los cuales estas instancias se abastecen, constituye una de las principales problemáticas a solventar (Morgan, 2005).

En El Salvador, destaca por su importancia logística, económica, turística y ecológica el Embalse Cerrón Grande, cuyo origen artificial se remonta a la década de 1970 para abastecer la central hidroeléctrica que lleva el mismo nombre. A este embalse, ubicado en el cauce del río Lempa, drenan 23 subcuencas, encontrándose entre ellas la del río Tamulasco. Debido a la importancia de este embalse, en 1999 la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), elaboró el “Estudio Global de la Sedimentación en la Cuenca del Río Lempa”, en el cual se estimó que el embalse Cerrón Grande había perdido el 5% de su volumen original para ese año (61 millones de m³) a causa de la acumulación de sedimentos.

Es por lo anterior que resulta de vital importancia controlar la pérdida de suelos en los afluentes del embalse Cerrón Grande, por ello, en el marco del Proyecto Vida impulsado por CEL, y en vista que desde 1999, no se ha realizado otro esfuerzo investigativo para determinar la evolución de esta problemática, se pretende estimar el estado actual de la erosión en la cuenca del río Tamulasco, he identificar aquellas zonas críticas de pérdida de suelo con el fin de orientar esfuerzos para la reducción de dicha problemática, disminuyendo así el aporte de sedimentos que llegan hasta el Embalse.

6 MARCO TEÓRICO.

6.1 *El suelo y su degradación.*

Según Eweis, Ergas, Chang, & Schroeder (1999), el término suelo se refiere al material suelto de la superficie de la tierra. Es uno de los elementos más importantes para la vida, ya que brinda una serie de servicios, además de ocurrir en él, una serie de procesos esenciales para el funcionamiento de distintos ecosistemas, brinda soporte físico, suministra agua y los elementos esenciales para la nutrición vegetal, iniciando así las redes tróficas y productivas de los ecosistemas y las actividades humanas (Eweis et al, 1999; Alcañiz, 2008; Gardi et al, 2014). Por ser el elemento natural ubicuo por excelencia, en la mayoría de los casos somos incapaces de percibir como nuestras acciones contribuyen a su degradación.

La degradación del suelo, definida como el descenso en la habilidad del suelo para cumplir sus funciones como medio para el crecimiento de las plantas, regulador del régimen hídrico, y como filtro ambiental, debido a causas naturales o antropogénicas, también puede considerarse desde la perspectiva económica y social a través de la producción agrícola, y entenderse como el declive temporal o permanente de la capacidad de producción de la tierra; dicho de otra manera, es la pérdida de la utilidad actual o potencial, de sus cualidades y funciones intrínsecas (UNESCO, 2011; Zavala Cruz, Palma López, Fernández C., López C., & Shirma T. , 2011).

Debido a que la degradación del suelo utiliza indicadores para establecer el grado de afectación de un área determinada, es necesario establecer que los parámetros susceptibles a medición sean representativos para comprender y atender el problema en áreas específicas. Básicamente los procesos de degradación del suelo pueden dividirse en dos grandes grupos, 1) los referidos al deterioro interno del suelo, que contempla la degradación química y física y 2) los referidos al desplazamiento (Zavala et al, 2011).

Dentro del primer grupo podemos mencionar el desequilibrio de nutrientes, el anegamiento, la acidificación, compactación contaminación, sellado y salinización del suelo, así como también la pérdida de la biodiversidad (FAO/GTIS, 2015); mientras que dentro del segundo grupo podemos mencionar la erosión y la sedimentación, siendo estos últimos el objeto de estudio de la esta investigación.

6.2 *La erosión del suelo.*

La erosión es un proceso que consta de tres fases, desprendimiento, arrastre y sedimentación del material edáfico por acción de la fuerza de un fluido en movimiento, la cual puede ser ocasionada por el viento o por el agua; siendo más severa en sitios con pendientes pronunciadas,

clima seco con fuertes vientos y lluvias intensas ocasionales (Suárez, 2001). A pesar que éste es un proceso de origen natural, puede ser acelerado por la intervención humana a través de la deforestación, el pastoreo y las malas prácticas de cultivos (Sibello & Febles, 2011). La erosión del suelo es una forma severa de degradación física; se estima que cerca del 80% de la tierra agrícola en el mundo sufre erosión de moderada a severa y el 10% erosión de ligera a moderada (Díaz, 2011).

En la superficie terrestre, los procesos geológicos (naturales) de meteorización y erosión han sido alterados por las actividades humanas. Estos cambios pueden aumentar o disminuir, según sean las circunstancias, los distintos tipos de consecuencias que la erosión produce. Los efectos de los procesos de erosión pueden adoptar formas muy diferentes, así como también su nivel de afectación a las actividades humanas (Dumas, 2012).

El origen de los procesos de erosión permite distinguir entre erosión eólica e hídrica; la erosión eólica depende de la intensidad del viento, que ejerce una fuerza sobre el suelo que afecta a las partículas de un tamaño específico, las cuales son fácilmente transportadas si no están unidas entre sí por materia orgánica, raíces, arcilla o agua, mientras que la erosión hídrica tiene como agente erosivo a la lluvia, la cual de acuerdo a su intensidad y duración influye de manera directa en la escorrentía superficial, la cual es uno de los principales agentes de transporte de sedimentos en la cuenca hidrográfica.

6.3 Erosión hídrica

Los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que toma el agua en su movimiento a través de la cubierta vegetal y sobre la superficie del suelo, tipificándose de diversas maneras, de acuerdo a los factores que intervienen en ella, básicamente puede clasificarse en erosión de ladera y erosión en canales o cursos de agua, o de acuerdo a los procesos que degradan uniformemente la superficie del suelo (erosión de impacto y erosión laminar) y los que concentran el desprendimiento de partículas de suelo en áreas específicas (erosión en riles, erosión en cárcavas, erosión en canales y costas) (Morgan, 2005; García-Chevesich, 2009).

ATA-INADE (2002), define la erosión hídrica como aquella que se genera al caer la lluvia sobre la tierra, levantando las partículas rocosas u orgánicas sueltas, llevándolos a los lugares más bajos, escarbando surcos en su recorrido y conduciéndolos hasta los cauces de los arroyos y ríos. Este efecto es más notorio en los terrenos agrícolas y los que carecen de cobertura vegetal, los principales tipos de erosión hídrica se describen en las secciones siguientes.

6.3.1 Erosión por salpicadura y erosión laminar

Según Farfán (2002), la erosión laminar consiste en la remoción de capas delgadas y más o menos uniformes de suelo sobre toda un área, ésta comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie del suelo con la energía suficiente para desplazar partículas de material sin consolidar, dando lugar al proceso denominado erosión por salpicadura. En este tipo de erosión la duración, frecuencia e intensidad de las precipitaciones son el factor principal de la generación de sedimentos, relegando a un segundo plano la topografía del terreno (UNESCO, 2010).

6.3.2 Erosión por surcos o en regueros

La erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, ocurre cuando por pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar canales, los cuales se orientan perpendicularmente a la pendiente del terreno (Farfán, 2002; Morales, 2014).

6.3.3 Erosión en barrancos o cárcavas

Según Morales (2014), la erosión en cárcava, consiste en el vaciado de las partículas del suelo o sustrato por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, y que generalmente llevan agua sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones. La formación de una cárcava por flujo superficial frecuentemente aparece ligada a un incremento en la escorrentía, dicho incremento, puede deberse a varias causas: cambios en el uso del suelo, modificaciones en el área de drenaje motivadas por el hombre, eventos de precipitación de características extremas, etc.

6.4 Factores que afectan la erosión

Ayres (1960) cit. por Suárez (2001), manifiesta que la erosión depende de cuatro variables principales, las cuales son la cantidad e intensidad de la lluvia, la pendiente y topografía del terreno, las propiedades físicas y químicas del suelo y la cobertura vegetal, UNESCO (2010), por su parte reconoce estos mismos factores y además menciona la velocidad del flujo y el uso de la tierra. En esta ocasión consideraremos los planteados por UNESCO (2010), los cuales mencionaremos a continuación.

6.4.1 Clima.

La variable climática más importante a considerar dentro de algunos procesos erosivos, específicamente en la erosión hídrica es la lluvia, ya que la cantidad, intensidad y duración de ésta, así como la forma en la que se relacione con otros factores como, la cobertura vegetal y el uso del suelo determinará el poder erosivo que pueda tener, por ello, el análisis de cada caso debe ser elaborado con sumo cuidado, puesto que cada factor se comportará de forma distinta bajo diversos escenarios (UNESCO, 2010).

Con el propósito de estimar la influencia de la lluvia como agente erosivo, se han desarrollado una serie de índices y correlaciones de factores de precipitación, basados en el cálculo de la energía cinética de un evento o tormenta, para lo cual es necesario contar con una base de datos de precipitación histórica completa, la cual debe de incluir información sobre la intensidad de lluvia; entre los índices más aplicados destacan el factor R propuesto por Wischmeier y Smith (1959), el índice de Fournier (IF) propuesto por Fournier (1960) y el índice modificado de Fournier (IMF) planteado por Arnoldus, y entre las correlaciones destacadas se tienen la de Renard y Freimund (1994), que sugieren el uso entre el IFM y el factor R para regiones con datos deficientes (Lince & Castro, 2015).

6.4.2 Cobertura vegetal.

La presencia o ausencia de una cobertura vegetal sana en el terreno interviene de manera significativa dentro de los procesos erosivos. La vegetación actúa como una barrera protectora contra la lluvia, ya que disminuye la energía cinética de las gotas de agua al caer al suelo y por lo tanto disminuye su poder erosivo; además las raíces de los árboles, contribuyen a la infiltración de la lluvia y brindan rugosidad al terreno, por lo que se reduce la cantidad de agua disponible para generar escorrentía superficial, así como la velocidad con la que esta viaja, disminuyendo considerablemente su poder erosivo (UNESCO, 2010).

A pesar de lo descrito anteriormente, Morgan (2005), manifiesta que los efectos de la vegetación, están lejos de ser directos y, bajo ciertas condiciones, una cubierta vegetal puede exacerbar la pérdida de suelo dependiendo de cómo interactúa con los procesos de erosión; como regla general, la efectividad de la vegetación para reducir la erosión de impacto depende directamente de la altura y continuidad de la copa de los árboles, así como la densidad de la cobertura superficial (pastos, hierbas y arbustos) (García-Chevesich, 2009).

Otro elemento considerado que disminuye el poder erosivo de las gotas de lluvia, es la hojarasca, la cual evidentemente se encuentra ligada a la cobertura vegetal y al igual que ésta

protege el suelo contra la erosión de impacto, impidiendo que la gota de lluvia golpee directamente la superficie del suelo, disminuye la velocidad del flujo superficial, debido al aumento en la rugosidad por la que éste viaja y contribuye a mejorar la estructura del suelo debido al aporte de materia orgánica que realiza (UNESCO, 2010).

6.4.3 Tipos de suelo

Las características de un suelo determinado están en función de su estructura, tamaño de partícula, permeabilidad y contenido de materia orgánica, estos elementos son los que en gran medida determinan su clasificación y la resistencia de los mismos, tanto al desprendimiento como al transporte, lo cual se conoce como erodabilidad (Morgan, 2005).

La textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad, pues no todas las clases texturales se erosionan con la misma facilidad, así por ejemplo las partículas de tamaño pequeño (arcillas), poseen una mayor superficie de contacto y por tanto poseen una mayor cohesividad, mientras que las partículas grandes (arenas), son más pesadas y por ende más resistentes a la erosión; sin embargo las partículas medianas (limos 0.1 a 1 mm), no poseen cohesividad ni tamaño relevante y por tanto son las de más fácilmente erosionables (García-Chevesich, 2009).

Richter y Negendank (1977) manifiestan que suelos con contenidos superiores al 40% de arcilla son altamente erosionables, así mismo Evans (1980) prefiere examinar la erodabilidad en términos del contenido de arcilla, indicando que los suelos con un contenido de arcilla entre 9 y 30 por ciento son los más susceptibles a la erosión. El uso del contenido de arcilla como un indicador de la pérdida de suelo es teóricamente más satisfactorio porque las partículas de arcilla se combinan con la materia orgánica para formar agregados o terrones del suelo y es la estabilidad de éstos la que determina la resistencia del suelo (Morgan, 2005).

García-Chevesich (2009) manifiestan que la materia orgánica puede mejorar casi todas las propiedades del suelo, pues la presencia de ésta aumenta la aireación e infiltración, así como la cohesividad interparticular. Además, la materia orgánica facilita el crecimiento vegetal mediante la adición de nutrientes en el suelo. Por estas razones, el contenido de materia orgánica de un suelo dado es una variable relevante en términos de su resistencia a la erosión.

Finalmente, la estructura y permeabilidad del suelo juegan un rol fundamental debido a su influencia en la cohesividad de las partículas y la infiltración del agua en dicho suelo, cabe mencionar que la capacidad de infiltración de un suelo está en directa relación con la generación de escurrimiento superficial, responsable de la erosión laminar y otros procesos de erosión

hídrica. Los suelos sin estructura definida, así como los suelos de estructura granular, por lo general poseen una alta capacidad de infiltración, es decir que son menos susceptibles a la erosión laminar. Por otro lado, los suelos de estructura masiva y plateada son más fáciles de erosionar, pues poseen tasas de infiltración menores (Morgan, 2005; García-Chevesich, 2009).

6.4.4 Uso de suelo

Según Gardi et al (2014), el uso de la tierra se define como la secuencia de operaciones que se llevan a cabo con el fin de obtener bienes y servicios del medio natural. Existen distintos usos en función de los bienes y servicios que se desean obtener del territorio a través de su gestión particular. El uso de la tierra se determina generalmente por factores socioeconómicos y por el potencial biofísico del medio en que se encuentran, así como por las limitaciones que éste impone.

El cambio del uso de la tierra es uno de los factores importantes que inciden en los procesos erosivos dándose, frecuentemente, a expensas de los ecosistemas naturales y, en menor medida, de zonas agrícolas, constituyendo una amenaza potencial para el recurso suelo. Los factores principales que determinan esta modificación medioambiental son el desarrollo agropecuario, las actividades forestales, el desarrollo urbano y turístico y las actividades extractivas.

La demanda de tierras para la agricultura, tanto de subsistencia como para la agroindustria, sigue en aumento, siendo éste uno de los principales factores asociados a la deforestación, esto conlleva a la pérdida de cobertura vegetal, la cual está asociada a estos cambios de uso de suelo afectando el intercambio de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera, lo que tiene efectos microclimáticos, conllevando posteriormente a la pérdida de biodiversidad, degradación del suelo, deterioro y pérdida de los servicios ambientales, entre otros (Gardi et al 2014).

6.4.5 Topografía

Morgan (2005), manifiesta que la resistencia de los suelos a la erosión es en parte dependiente de la posición topográfica, esto quiere decir que la posición, dirección y ángulo de inclinación de la pendiente son determinantes en las tasas de erosión de una región dada (Dumas, 2012).

6.5 Erosión en cuencas hidrográficas.

Brooks (1985) cit. por Umaña (2002), expresa que la Cuenca Hidrográfica se define como la unidad territorial natural que capta la precipitación, y es por donde transita el escurrimiento hasta un punto de salida en el cauce principal y se encuentra delimitada por una divisoria topográfica denominada parte-agua que drena a un cauce común, formando una red de cursos

de agua que concentran caudales hasta formar un río principal que lleva sus aguas a un lago o mar.

Según Gaspari et al (2012), el funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento, esta transformación depende de las condiciones climáticas y las características físicas de la cuenca. Desde el punto de vista de su funcionamiento, una cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo, por la cobertura vegetal y uso del suelo.

6.5.1 Morfometría y erosión

Los procesos erosivos ocurridos al interior de la cuenca están determinados por la dinámica ambiental de la zona, la cual a su vez es directamente influenciada por la forma del terreno, por lo que para comprender la influencia del relieve en los procesos erosivos de la cuenca es necesario emplear el análisis morfométrico, el cual se define como como la medición y evaluación matemática de la configuración de la superficie de la tierra y de la forma y dimensiones de sus accidentes geográficos (Farhan, Anbar, Enaba, & Al-Shaikh, 2015).

Debido a que no existen dos cuencas iguales, para comparar el comportamiento de una con otra es necesario analizarlas en términos matemáticos, lo cual según Schumm (1977 cit. por Docampo et al, 1990), sugiere que para establecer comparaciones geomorfológicas es necesario obtener expresiones numéricas de las características del relieve y desarrollar relaciones cuantitativas entre las variables geomorfológicas e hidrológicas, tales como la forma de la cuenca, densidad y orden del drenaje, la pendiente del terreno, entre otras que sirven como indicadores para medir la susceptibilidad a la degradación del medio ambiente y particularmente a los procesos erosivos (Cerignoni & Rodrigues, 2015).

Dado que la red de drenaje es la manifestación de la escorrentía superficial concentrada y jerarquizada en cauces dentro de la cuenca, la interpretación de las características geométricas (longitudinales, de superficie, etc.) de los elementos de las redes de drenaje, analizados desde la perspectiva morfométrica contribuirán a comprender los procesos de erosión fluvial ocurridos al interior de la misma (Senciales, 1998), facilitando la toma de decisiones para disminuir la problemática, específicamente en las medidas de conservación de suelo a implementar por parte de las entidades encargadas de la preservación de los recursos naturales.

6.5.2 Transporte de sedimentos en la cuenca.

En la sección 6.2, se ha indicado que la erosión es un proceso que consta de tres fases, desprendimiento, arrastre y sedimentación, referente a la fase de transporte, Iroumé & Uyttendaele (2009) manifiestan que los aportes de los sedimentos generados desde las laderas de las cuencas durante los períodos de tormentas son transportados por los cauces en forma de suspensión, mientras que los provenientes de las erosiones en la red de drenaje o desde las laderas adyacentes a la misma son movilizados principalmente como transporte de fondo.

En la producción de sedimentos intervienen diferentes factores, entre los que se encuentran los climáticos, topográficos, de cobertura de la tierra y de calidad de suelo (estructura y composición). La lluvia como factor climático favorece los procesos de erosión y sedimentación en dependencia de su intensidad y duración, mientras que la topografía se relaciona con la producción y transporte de sedimentos de acuerdo al grado de la pendiente, a mayor grado de la pendiente, más efectiva será la acción del agua en erosionar y transportar el sedimento pendiente abajo; al considerar la erosión hídrica, otro aspecto muy importante a considerar es la velocidad del flujo superficial, la cual se comportará con mayor o menor intensidad de acuerdo al grado de la pendiente; a partir de esto, podemos observar que el factor topográfico es preponderante al momento de estimar los fenómenos de erosión, transporte y sedimentación (Cuello, 2003).

6.6 Estimación de la erosión.

La determinación de la pérdida de suelo es un proceso complejo, más aún cuando ésta se realiza a nivel de cuenca. La erosión puede ser medida bajo distintas escalas y niveles de precisión. Si consideramos la pérdida de suelo por la acción exclusiva del agua, podemos estimar la erosión ocurrida a nivel de sedimentos, por ejemplo, la cantidad de sedimentos desprendidos y transportados por la erosión de impacto; también es posible realizar mediciones de la erosión a nivel de ladera (erosión laminar, en riles y cárcavas). Por otro lado, podemos estimar la erosión neta ocurrida a nivel de cuenca hidrográfica, midiendo variables como pérdida de suelo o acumulación de sedimentos (Gardi et al, 2014).

La estimación de la erosión puede realizarse a través de 3 metodologías, la modelación, las referidas a la escala de tiempo geológico y las referidas al estudio del fenómeno, sus factores y técnicas de control. Por su capacidad de aplicación a diferentes áreas, el uso de modelos es la metodología menos costosa para el estudio de la erosión, y puede ser de extrema utilidad para evaluar el impacto de las técnicas de conservación de suelo y agua (Farfán, 2002).

De acuerdo a Farfán (2002), la erosión puede medirse por métodos cualitativos y cuantitativos, los primeros brindan las formas y grados de ésta, mientras que los segundos, a su vez se dividen en directos e indirectos, siendo ejemplo de los directos las parcelas de clavos y las de escurrimiento, mientras que los segundos, se dividen a su vez en físicos, conceptuales y paramétricos.

6.6.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

La Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo es un modelo cuantitativo de medición indirecta y de tipo paramétrico utilizado para estimar el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea al año, t/ha/año), la cual debe ser validada y calibrada para condiciones locales (Farfán, 2002; Fortuño, 2014). Esta ecuación se desarrolló en Estados Unidos hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura (USDA), la cual posteriormente con los trabajos de Wischmeier y Smith se lleva a su publicación definitiva en el manual 534 de dicha dependencia (González, 1991; Fortuño, 2014).

La expresión de la USLE planteada por Wischmeier y Smith en 1978 (Barrios & Quiñones, 2000), responde a la siguiente expresión:

$$A = R * K * LS * C \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde:

- R = erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
- K = erodabilidad del suelo ($\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- LS = longitud y grado de la pendiente (adimensional)
- C = factor de uso de suelo (adimensional)

6.6.1.1 Erosividad de la lluvia.

También denominado Factor R, la erosividad de la lluvia es la medida de la fuerza erosiva de las precipitaciones, la cual se encuentra en dependencia de la energía cinética de éstas, por lo que es directamente proporcional a las características físicas de la lluvia, es decir, a mayor tamaño de gota, mayor masa de agua y por lo tanto mayor velocidad de caída. A mayor masa y mayor velocidad, mayor energía cinética y en consecuencia mayor desagregación del suelo (Farfán, 2002; Fortuño, 2014).

Para calcular la erosividad de la lluvia, el modelo USLE propone el uso del Índice de erosividad de la lluvia, el cual se define como la energía cinética del aguacero multiplicado por la Intensidad máxima de lluvia en 30 minutos. Este índice supone el uso de la Intensidad de la

lluvia, la cual es calculada a partir de datos pluviográficos, lo cual representa un problema para los países en vías de desarrollo, ya que el uso de estos instrumentos es poco extendido; debido a ello diferentes autores han desarrollado metodologías para calcular el índice de erosividad a partir de datos pluviométricos entre los que podemos mencionar las ecuaciones de tipo Fournier y las correlaciones de precipitación con valores de Intensidad de lluvia (González, 1991; UNESCO, 2009; Fortuño, 2014).

6.6.1.2 Erodabilidad del suelo.

Denominado Factor K, la erodabilidad o erosionabilidad del suelo, es la vulnerabilidad de éste a la erosión, en dependencia de las características físicas del suelo responsables de la formación y estabilidad de la estructura, y de la capacidad de almacenamiento y transmisión del agua a través de los poros (textura, estructura, permeabilidad, materia orgánica, estabilidad de los agregados, pedregosidad, etc.). Para un suelo particular, K se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad cuando es medido en una parcela estándar (22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme de 9%, de labranza continua y a lo largo de la pendiente) (González, 1991; Flores et al, 2003; UNESCO, 2009; Fortuño, 2014).

6.6.1.3 Longitud e inclinación de la pendiente.

Según Saldaña Díaz, Nemmaoui, Cantón Castilla, Aguilar Torres, & Aguilar Torres (2014), los efectos de la topografía en la determinación de la tasa de erosión vienen determinados en el modelo USLE por el factor combinado LS. Este factor tiene en cuenta el efecto de la longitud e inclinación de la ladera vertiente para la cuantificación de la erosión hídrica. Wischmeier y Smith (1978 cit. por González, 1991) definen la longitud de ladera (Factor L) como la longitud que recorre la gota de escorrentía desde que se forma, en la divisoria, hasta que encuentra un cauce o una zona de sedimentación, mientras que el Factor S indica el grado de inclinación de la pendiente. La pérdida de suelo se aumenta más rápidamente con la inclinación de la pendiente que con la longitud y aunque los efectos de estos factores se evalúan en campo por separado y son considerados en la USLE también en forma separada como L y S, es recomendable considerarlos como un solo factor LS (Flores López, Martínez Menes, Oropeza Mota, Mejía Saens, & Carrillo González, 2003).

6.6.1.4 Cobertura Vegetal.

La cobertura vegetal, denominada también como Factor C, se define como la tasa de erosión potencial del suelo desnudo bajo unas condiciones específicas y la tasa de erosión

correspondiente a una determinada cobertura vegetal y/o sistema de explotación. Debido a que la cobertura vegetal amortigua el impacto de las gotas de lluvia, influyendo tanto en la velocidad de la escorrentía superficial y en la de infiltración, los suelos con una buena cobertura vegetal serán menos erosionables que los suelos desnudos, oscilando sus valores entre 0 y 1, asignando valores de 1 a suelos completamente desnudos y 0 a suelos que no son susceptibles a ningún tipo de erosión (Saldaña et al, 2014).

6.6.2 Radionúclidos como trazadores ambientales.

Para implementar medidas de protección en áreas que presentan un alto riesgo de desertificación o mejorar los procesos agro productivos que se ven afectados negativamente como producto de la pérdida de suelo, es necesario establecer la magnitud del problema a través de su cuantificación. Las dificultades asociadas con las técnicas clásicas de medida de erosión, como son la utilización de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), fotografías aéreas, medidas en parcelas, entre otras han conducido a la investigación de nuevos métodos, entre los que se incluyen los de isótopos trazadores como el Cesio-137 (^{137}Cs) (Cuesta & Delgado, 1997; Navas et al, 2003; Caballero, 2016).

El ^{137}Cs es un radioisótopo antropogénico que fue inyectado a la atmósfera preferentemente a través de ensayos de armas nucleares entre 1950 y 1970 y comienza a detectarse en la superficie terrestre a partir de 1954 con picos en 1958 y 1963, tiene una vida media de 30.1 años, lo que garantiza una larga permanencia en los lugares donde se deposita; después que entra en la atmósfera, el ^{137}Cs es transportado en el aire y posteriormente se precipita sobre la superficie de la tierra en donde es fuertemente absorbido por intercambio iónico sobre las partículas de suelo, siendo especialmente rápido sobre materia orgánica y arcillas (Brígido, Mendoza, Montalván, & Rodríguez, 2006; Caballero, 2016).

Lo anterior indica que el movimiento del ^{137}Cs , estará directamente vinculado al movimiento del suelo, así por ejemplo en un suelo virgen, que no haya sido afectado ni por la erosión ni por el depósito, el inventario total de ^{137}Cs en ese sitio, deberá corresponder con el total de ^{137}Cs depositado. Estos sitios vírgenes son utilizados para establecer el inventario de referencia, el cual posteriormente será comparado con los inventarios del sitio de estudio para cuantificar la erosión (menor inventario que el de referencia) o sedimentación (mayor inventario) a través de modelos matemáticos (Brígido et al, s.f.; Sibello &Febles, 2011)

7 METODOLOGÍA

7.1 Generalidades

Para la estimación de la pérdida de suelo de la cuenca del río Tamulasco se desarrolló un estudio de tipo descriptivo, no experimental y de corte longitudinal, el cual se divide en 3 secciones; análisis morfométrico, estimación de la erosión y producción de sedimentos, las cuales se describe en los apartados siguientes.

7.2 Análisis morfométrico

La morfometría de la cuenca del río Tamulasco se describe con base en sus parámetros de forma, relieve y densidad de drenaje, a partir del análisis de la información cartográfica proporcionada por el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” (CENTA) la cual fue procesada con la ayuda del software ArcGIS 10.1.

7.2.1 Parámetros de forma

Los parámetros de forma más importantes considerados dentro de la presente investigación se describen a continuación:

7.2.1.1 Factor de forma.

Se define como factor de forma a la relación existente entre el ancho y el largo de la cuenca (*Ecu. 2*); los valores de este factor oscilan entre 0 y 1, siendo 0 el valor representativo para una cuenca de tipo alargada y 1 el de una cuenca con forma perfectamente redonda, esta relación en conjunto con la densidad del drenaje ayuda a inferir la velocidad de salida de la escorrentía en una cuenca en estudio (Horton, 1932; Gaspari et al, 2012)

$$Rf = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ecu. 2}$$

Donde:

Rf: Factor de forma

A: Área de la cuenca en km²

L: Longitud de la cuenca (Km).

7.2.2 Coeficiente de Gravelius (*Ic*):

El índice de compacidad o coeficiente de Gravelius compara la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la cuenca (*Ecu. 3*), cuanto más cercano

esté el índice a la unidad, se considera que la cuenca tiene una forma más circular y por tanto será mayor la tendencia de la cuenca a generar crecidas por la disminución de sus tiempos de concentración (González, 2004).

$$I_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde:

I_c : Coeficiente de Gravelius

P: Perímetro en Km

A: Área en Km²

7.2.2.1 Coeficiente de masividad

El coeficiente de masividad se calculó estableciendo la relación entre la elevación media de la cuenca con su superficie (Ecu. 4). Su resultado es alto para cuencas de cumbres altas y bajo en cuencas donde predominan terrenos planos que presentan áreas similares (Farfán , Urbina, Ferreira, & Brandan, 2010)

$$K_m = \frac{H}{A} \quad \text{Ecu. 4}$$

Donde:

K_m : Coeficiente de masividad

H: Altura media de la cuenca

A: Área total de la cuenca.

7.2.2.2 Coeficiente orográfico

Se calculó mediante el producto de la relación de la altura media de la cuenca y el coeficiente de masividad (Ecu. 5), tomando valores altos para cuencas pequeñas con grandes desniveles topográficos (muy montañosas) y valores bajos para cuencas con grandes áreas y topografía suave (Almorox Alonso, López Bermudez, & Rafaelli, 2010).

$$CO = H \cdot K_m \quad \text{Ecu. 5}$$

Donde:

CO = Coeficiente orográfico

H: Altura media de la cuenca

K_m : Coeficiente de masividad

7.2.3 *Parámetros del relieve.*

7.2.3.1 *Curva Hipsométrica*

Para el establecimiento de la curva hipsométrica se empleó el análisis de aspectos de la distribución de las masas del terreno por encima de la desembocadura de la cuenca y se estimó la tasa de concentración y descarga de las precipitaciones, o bien la distribución en la cuenca de las acumulaciones nivales, que fue la relación establecida por Strahler en 1952. Otros autores han utilizado el análisis hipsométrico para evaluar la evolución geomorfológica de la cuenca (Rabassa, 1979).

Para la construcción de la curva hipsométrica de la cuenca del río Tamulasco se utilizó el modelo de elevación digital proporcionado por CENTA, el cual fue reclasificado y se obtuvo el área entre curvas a cada 100 m, posteriormente las áreas entre curvas fueron procesadas y graficadas con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel.

7.2.3.2 *Índice de Posición Topográfica*

El TPI fue calculado utilizando la extensión diseñada por Jenness Enterprises para ESRI mediante el análisis circular para las celdas vecinas (figura 3). El TPI definido como la diferencia entre el valor de elevación de una celda y el promedio de las celdas circundantes a esa celda, puede tomar valores positivos o negativos, los valores positivos correspondan a regiones altas dentro del área circundante y puedan ser asociados a cerros y cordilleras, mientras que los valores negativos denotan características de regiones bajas dentro del área circundante y son asociadas a valles; cuando el TPI toma el valor de cero se asocia a regiones planas o bien con áreas de inclinación constante cercanas a cero (Fuentes & Vargas, 2011).

$$TPI_i = Z_0 - \frac{\sum_{1-n} Z_n}{n} \quad \text{Ecu. 6}$$

Donde:

Z_0 = elevación del punto del modelo en evaluación.

Z_n = elevación de la cuadrícula dentro de la ventana local.

n = número total de puntos circundantes empleados en la evaluación.

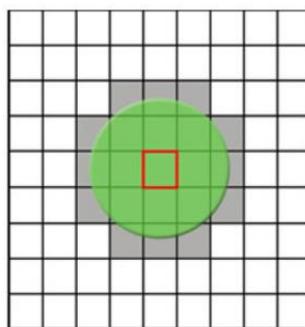


Figura 3. Esquema del Análisis de vecinos circular para el cálculo del TPI. Fuente: Jenness, 2006.

Para la evaluación del TPI se utilizaron dos escalas de medición para el análisis proximal o de celdas circundantes, las cuales fueron a 50 m y a 1200 m, ya que según Tagil & Jenness (2006), el tamaño y la forma de las celdas vecinas a considerar en el TPI es fundamental para el análisis topográfico que desea realizarse de la zona y este debe basarse en la dimensión de la característica fisiográfica del sitio de estudio.

7.2.3.3 Clasificación del relieve

Para la clasificación del relieve se empleó la metodología planteada por Jenness (2006), Tagil & Jenness (2008) y Fuentes & Vargas (2011), la cual toma como punto de partida el análisis de TPI a dos escalas y la pendiente del terreno, ya que esta combinación de valores permite la identificación de características más complejas del paisaje y su clasificación con base en la posición de la pendiente (Weiss, 2001; Iliá, 2013; Seif, 2014). El programa ArcGis 10.1 cuenta con la extensión Topography Tools, desarrollada por Jenness Enterprises, la cual genera de forma automatizada este análisis tomando como criterios de referencia los planteados en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de geoformas a partir del TPI

Nº	Descripción	TPI Grande		TPI Pequeño.		Pendiente	
		Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
1	Cañones	≤ -1		≤ -1			
2	Drenajes en pendiente, valles poco profundos	> -1	< 1	≤ -1			
3	Cabeceras, drenajes altos		≥ 1	≤ -1			
4	Valles en U	≤ -1		> -1	< 1		
5	Planicies o llanuras	> -1	< 1	> -1	< 1	≤ 5	
6	Pendientes medias abiertas	> -1	< 1	> -1	< 1		> 5
7	Pendientes muy abiertas, mesas		≥ 1	> -1	< 1		
8	Crestas locales	≤ -1		≥ 1			
9	Pequeños valles /Riscos	> -1	< 1		≥ 1		
10	Cimas de montaña		≥ 1		≥ 1		

Fuente: Elaboración propia a partir de Fuentes & Vargas (2011).

7.3 Selección y ubicación de los sitios de muestreo.

Utilizando el mapa de uso de suelo e imágenes de Google Earth, se procedió a la selección de los sitios idóneos para la toma de muestras de suelo. En la cuenca de estudio se identificaron 8 usos de suelo subdivididos en 14 categorías, para cada uno de ellos y tomando en cuenta el tipo de suelo, la pendiente y la accesibilidad, se procedió a la selección de 16 sitios de muestreo, ya que en dos usos de suelo se identificaron dos tipos de suelo diferentes (Figura 4); los cuales fueron utilizados para el análisis de erosión; posteriormente, se seleccionaron los sitios de colocación de las trampas de sedimento, las cuales fueron dispuestas en la parte alta y baja de la cuenca con el propósito de evaluar la producción de sedimentos a medida que desciende el cauce principal hacia el punto de salida de la cuenca.

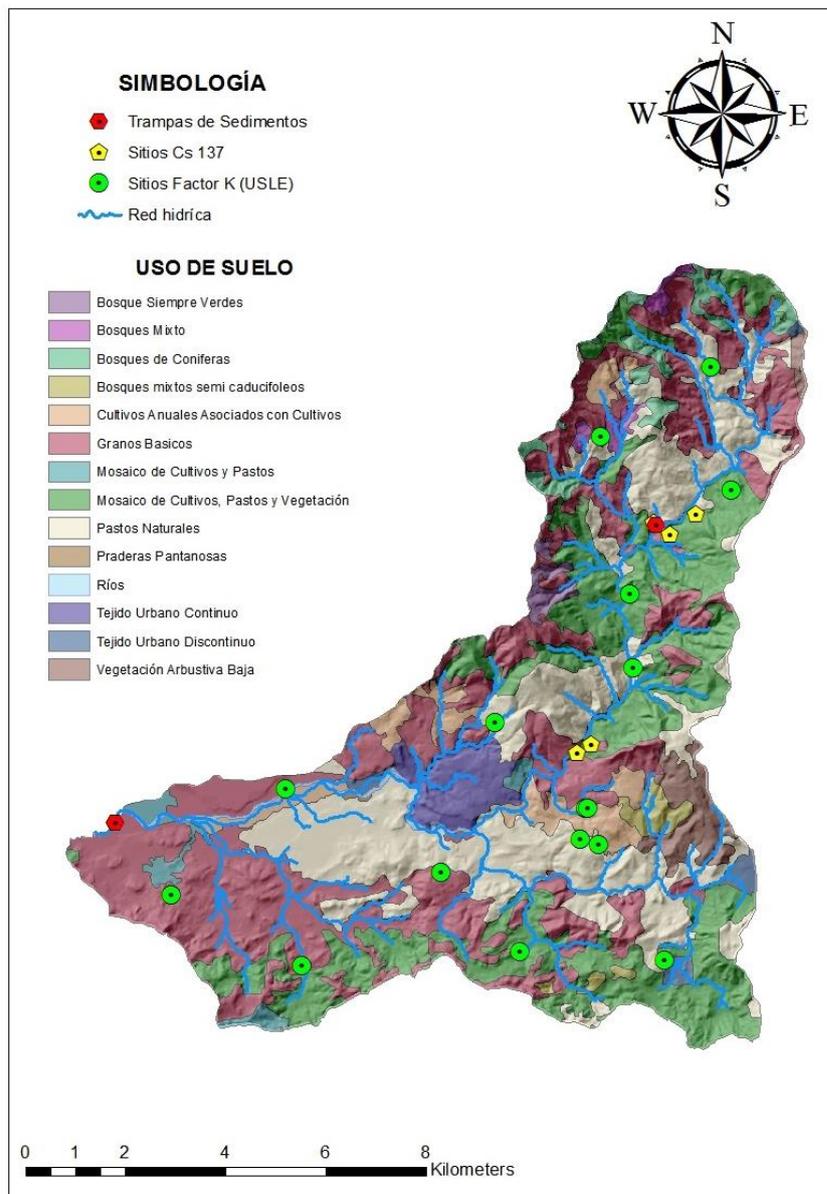


Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de CENTA

7.4 Estimación de la pérdida de suelo.

7.4.1 Metodología USLE.

Para determinar la pérdida de suelo, se empleó la metodología USLE planteada por Wischmeier y Smith en 1978 (Barrios & Quiñones, 2000), la cual corresponde a la ecuación 1 descrita en la sección 6.6.1. El cálculo de cada uno de los factores de la USLE se describe a continuación.

7.4.1.1 Factor R

El factor R o erosividad de la lluvia, debido a la falta de registros pluviográficos de la zona, se obtuvo a partir de los registros de lluvia promedio mensual del período comprendido entre los años 2010 al 2016 de 5 estaciones pluviométricas, empleando la ecuación 7 planteada por Rodríguez, Florentino, Gallardo, & García (2004), la cual utiliza como base el Índice Modificado de Fournier (ecuación 8). Posteriormente con los datos obtenidos se realizó una interpolación empleando el método IDW de las herramientas de análisis espacial del ArcGis 10.1 para generar un ráster de erosividad de lluvia.

$$R = 2.56 \times IMF^{1.065} \quad \text{Ecu. 7}$$

Donde

R : Erosividad de la lluvia
IMF= Índice modificado de Fournier

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad \text{Ecu.8}$$

Donde:

IMF= Índice modificado de Fournier
 p_i = Precipitación promedio mensual del mes i en mm
P= Precipitación promedio anual en mm

7.4.1.2 Factor K

Para la determinación del Factor K, se utilizaron los 16 sitios de muestreo descritos en la sección 7.3, de los cuales se determinó su granulometría y porcentaje de materia orgánica, pruebas que fueron realizadas en el Laboratorio de Suelos de CENTA, mientras que en campo se determinó la permeabilidad del suelo por el método de Porchet y la estructura de suelo empleando una guía de campo de la Universidad de Valencia. Con los datos obtenidos se procedió a emplear

la ecuación 9 presentada por UNESCO (2010). Posterior a ello, los resultados obtenidos fueron interpolados por el método IDW de las herramientas de análisis espacial del ArcGis 10.1 para generar un ráster de erodabilidad.

$$K = \frac{2.1 * 10^{-4} (12 - \%MO)M^{1.14} + 3.25(S_1 - 2) + 2.5(P_1 - 3)}{100} \quad \text{Ecu. 9}$$

Donde:

K = Erodabilidad del suelo expresada en Mg/ha por ha-hr/MJ-mm

MO = Porcentaje de Materia Orgánica.

S₁ = Índice de estructura.

M = Es el producto de la relación entre el tamaño de partículas

P₁ = Índice de permeabilidad.

7.4.1.3 Factor L y S

El cálculo combinado de estos factores se obtuvo del modelo de elevación digital de la cuenca utilizando el programa ArcGis 10.1. De este modelo se obtuvieron la inclinación de la pendiente y la acumulación del flujo (condicionada a 150 m), los cuales son parámetros utilizados en la ecuación 10, presentada por Belasri & Lakhoulli (2016) para la obtención del ráster del factor LS.

$$LS = \frac{(Flowacc \times cell\ size)^{0.4}}{22.13} \times \frac{(sinSlope)^{1.3}}{0.0896} \quad \text{Ecu. 10}$$

Donde:

Flowacc = número de celdas que contribuyen al flujo en una celda dada

Cell size = longitud del tamaño de un lado de las celdas

Sinslope = grado de la pendiente en radianes.

7.4.1.4 Factor C

La cobertura y el manejo del suelo (Factor C), no pueden ser evaluados independientemente, puesto que su efecto combinado, es resultado de muchas interrelaciones significativas. El valor de este factor es una función de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos, prácticas de manejo y del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal al momento en que actúa el agente erosivo. La metodología propuesta por Wischmeier y Smith, permite determinar los valores del factor C para las rotaciones de los cultivos y las prácticas de manejo que se encuentran en los Estados Unidos, para otros países, la información detallada para

calcular el factor C de esta manera no siempre existe y puede ser más apropiado usar valores anuales promedio (Wischmeier y Smith, 1978).

Debido a que en El Salvador no se cuenta con la información requerida para el cálculo del factor C se procedió, a partir del mapa de uso de suelos proporcionado por el CENTA, a la identificación de los diferentes usos de suelo en la cuenca del río Tamulasco, asignándoles el valor del Factor C correspondiente, a partir de los datos de referencia propuestos por Dumas (2012), Melchor & Chagoya (2016), y Morgan (2005) los cuales corresponden a investigaciones realizadas en latitudes tropicales con sistemas de cultivos similares a la zona de estudio; así como también a datos promedio anuales de Factor C, respectivamente, siguiendo la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978).

7.4.2 Método del Cesio 137 (^{137}Cs)

Para obtener el inventario de ^{137}Cs se establecieron 6 parcelas de investigación más 2 de referencia, cada una con una superficie de 100 m^2 y tomando en consideración el uso de suelo, generalmente agrícola (Figura 4). En cada una de estas parcelas se obtuvieron cinco núcleos de suelo, por medio de un muestreador tipo T de 40 cm de longitud y 10 cm de diámetro, el cual era clavado mediante el golpeteo manual con almágana y posteriormente extraído del suelo utilizando un sistema manual de palanca; una vez obtenido el núcleo, éste era dividido en dos secciones, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm de profundidad.

Posterior a su colecta, las muestras fueron trasladadas al CENTA, en donde fueron secadas durante 24 h a 60°C y homogeneizadas con un tamiz de 1 mm de luz de malla, posterior a ello, fueron trasladadas al LABTOX-UES, en donde se midió la actividad del radionúcleo por medio de espectrometría gamma, utilizando el equipo ORTEC HPGe Gem50P4-83 con un detector de 86 mm de Germanio ultra puro, previamente calibrado durante periodos de 48 h. Con los valores de actividad obtenidos se procedió al cálculo del inventario mediante la siguiente ecuación:

$$IM = \frac{(AESM * CPF)}{ASH} \quad \text{Ecu.11}$$

Donde:

IM = Inventario de ^{137}Cs de la muestra (Bq/m^2)
AESM = Actividad específica de la muestra (Bq/kg).
CPF = Peso corregido de la muestra analizada (kg)
ASH = Área superficial horizontal de la muestra

Posterior a la obtención del inventario total de ^{137}Cs se procedió al cálculo del porcentaje de redistribución de Cesio, el cual se determinó a través de la expresión:

$$X(\%) = \left(\frac{I - I_{ref}}{I_{ref}} \right) \times 100 \quad \text{Ecu.12}$$

Donde:

I = Inventario total de ^{137}Cs del sitio de estudio.

I_{ref} = Inventario total de ^{137}Cs del sitio de referencia

La determinación de la pérdida de suelo fue realizada por el modelo proporcional propuesto por Walling et al (2002), citado por Sibello & Febles (2011) (Ecu.8).

$$Y = 10 \left(\frac{BdX}{100T} \right) \quad \text{Ecu.13}$$

Donde:

Y = Pérdida anual de suelo (ton/ha/año)

B = Densidad del suelo (Kg/m^3)

d = Profundidad del arado (m)

X = Porcentaje de reducción del inventario total de ^{137}Cs

T = Tiempo transcurrido desde el inicio de la acumulación del ^{137}Cs (años).

7.4.3 Carga de Sedimentos

La estimación del transporte de sedimento se realizó en dos puntos de la cuenca (Figura 4 Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo.). En cada uno de ellos se colocaron trampas fabricadas con tubos de PVC de 1 metro de longitud y 4 pulgadas de ancho (Figura 5), los cuales se encontraban tapados en ambos extremos y contaban con un tubo de entrada y salida de 1 pulgada de diámetro, los cuales se colocaban en paralelo en la sección media del río, anclados en durmientes fabricados con varilla corrugada de una pulgada de diámetro y 1.5 metros de longitud sobre el lecho del río en lapsos de 7 días durante el período lluvioso de junio a octubre del 2016. Los datos del caudal del río fueron tomados de los valores reportados por la estación “La Sierpe” del MARN

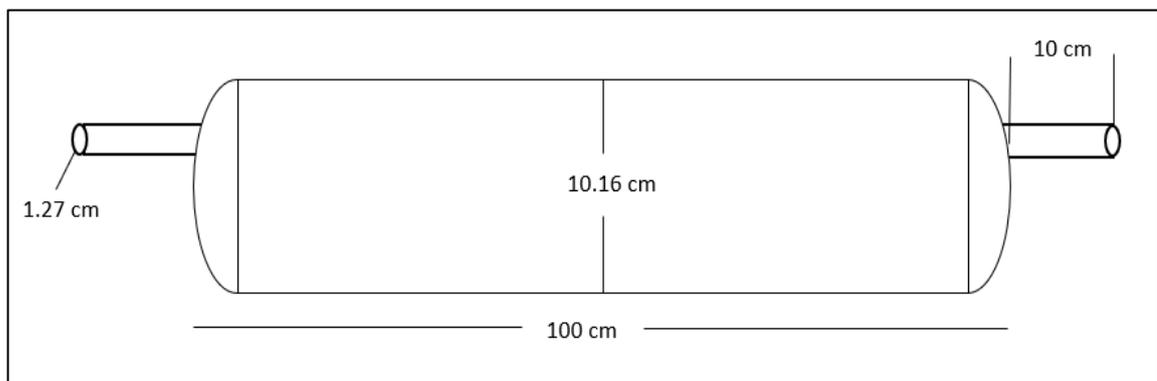


Figura 5. Diseño y dimensión de las trampas de sedimento.

El cálculo del transporte de sedimentos suspendidos se realizó mediante la metodología propuesta por Roldan (2008), presentada en la ecuación 14, mientras que para los sedimentos de fondo se empleó una variante de la metodología empleada por Helley & Smith 1971, empleada por CVC (2007) para sedimentos de fondo, la cual está dada por la ecuación 15.

$$Q = D \times c \times f \quad \text{Ecu.14}$$

Donde:

Q = Carga de solidos suspendidos

D = Caudal

c = Concentración del material suspendido

f = Factor de conversión a Ton/día.

$$CS = \left(\frac{(p_s \times F_1)}{(AT \times T)} \right) \times A \times F_2 \quad \text{Ecu.15}$$

Donde:

CS = Carga de sedimentos

p_s = Peso seco de la muestra

F₁ = Factor de corrección por tamaño de la partícula (1.5 limo).

AT = Diámetro de la boquilla de entrada en m

A = Longitud del ancho del cauce

T = Tiempo de muestreo

F₂ = Factor de corrección del tiempo.

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

8.1 Análisis morfométrico.

8.1.1 Generalidades.

La cuenca del río Tamulasco posee un área de 106.07 km² en la cual habitan alrededor de 53 mil personas distribuidos en 10 municipios, siendo el municipio de Chalatenango el más densamente poblado (VI censo poblacional del 2007). Posee un rango altitudinal entre los 245 y los 1551 msnm, dividido en 3 secciones (Figura 6), el régimen de lluvias ronda los 2200 mm al año y de acuerdo a la clasificación de vida de Holdrige se cataloga como clima de bosque húmedo tropical transición sub tropical.

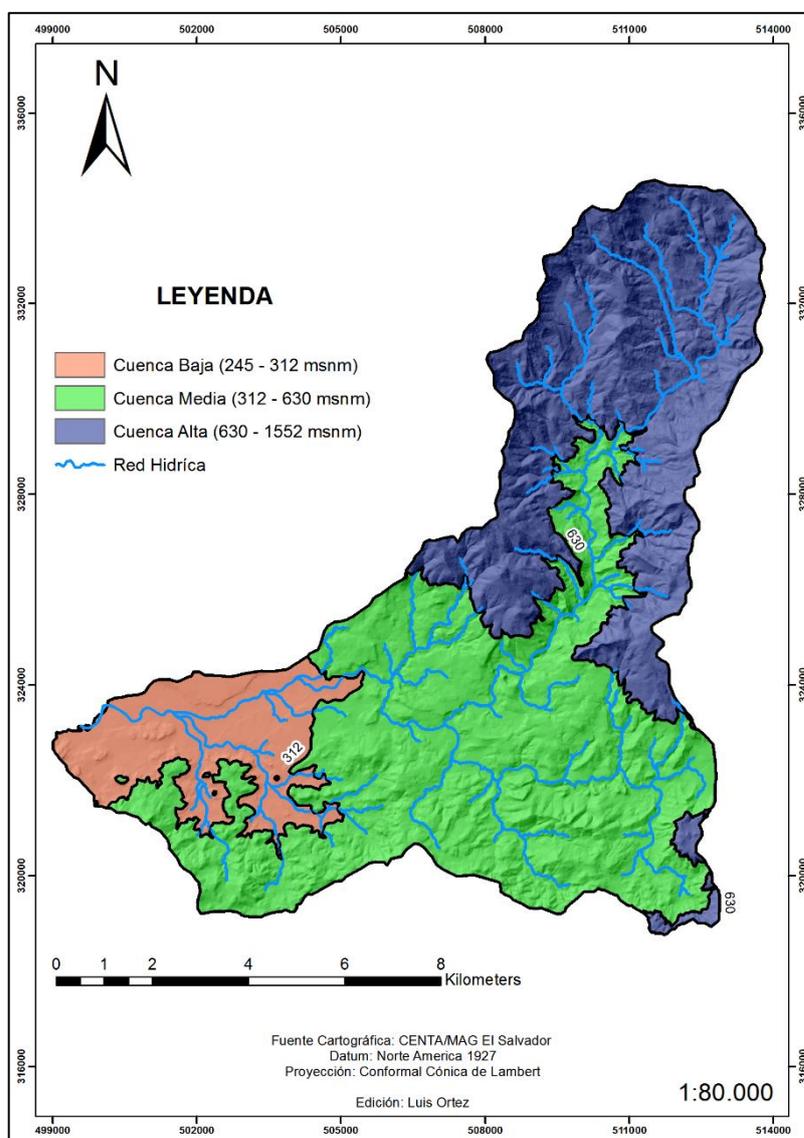


Figura 6. División de la cuenca del río Tamulasco.

Posee un sistema de pendientes generalmente escarpadas (entre el 10 y el 86%); en la parte alta (630 - 1550 msnm), compuesta por los municipios de Ojos de Agua, La Laguna y las Vueltas, posee vegetación natural de asociaciones de pino roble; su cuenca media (315 – 630 msnm), ocupada casi en su totalidad por el municipio de Chalatenango, funciona como un embudo que concentra sus aguas a la altura de la cabecera departamental, ensanchándose a medida que se acerca hacia el Embalse Cerrón grande donde desemboca a la altura del municipio de Azacualpa.

8.1.2 Suelos.

De acuerdo a la clasificación USDA, la cuenca del río Tamulasco posee 3 tipos de suelo (Tabla 3), entre los cuales predominan los latosoles arcillo rojizos del orden Alfisoles, de textura franco arcillo arenosa, con un contenido promedio de materia orgánica del 4 %. La capacidad de uso de éstos los ubica como tierras aptas para forestería y producción a largo plazo, a pesar de ello, en la actualidad los usos que posee son muy diversos, desde bosques naturales de coníferas y cultivos de subsistencia en la parte alta, hasta zonas de inundación, cultivo de caña, arrozales y potreros en la cuenca baja.

Cabe mencionar que a pesar de que los cultivos de subsistencia son a pequeña escala, debido a su proximidad al Área Natural Protegida “La Montañona”, se deben de vigilar para controlar el avance de la frontera agrícola y la extracción de leña.

Tabla 3. Tipos, capacidades y uso de suelo de la cuenca del río Tamulasco.

Grupo USDA	Orden	Área	Área por clases					
			I – III ¹		VII ²		Urbano	
			Km2	%	Km2	%	Km2	%
Grumosoles, litosoles y latosoles arcillo rojizos	Vertisoles y Alfisoles	5,82	5,5	5,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Latosoles arcillo rojizos y litosoles	Alfisoles	99,59	3,0	2,8	96,3	90,8	0,3	0,3
Regosoles y aluviales	Entisoles	0,66	0,3	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0
Área total		106,1	8,2		91,2		0,5	

Fuente: Mapa de Capacidad de Uso de Suelos de El Salvador, escala 1:1000000.

1. Clase I-III: Tierras aptas para forestales de producción, forestería social y ambiental, producción a largo plazo

2. Clase VII: Tierras aptas para agricultura intensiva, mecanizarle, cultivos anuales, ganadería intensiva y forestales de producción

8.1.3 Morfometría

De acuerdo a sus características morfométricas (Tabla 4) la cuenca del río Tamulasco se clasifica como una cuenca de orden 5, de forma alargada ($I_c = 1.64$), con una moderada densidad

de drenaje, un tiempo de concentración rápido (20.47 min) y un relieve muy montañoso ($K_m = 7.96$) influenciado por un sistema de pendientes escapadas (30 - 60 %).

Tabla 4. Parámetros morfométricos generales de la cuenca del río Tamulasco.

DESCRIPCIÓN	Unidades	Valor
Superficie		
Área	Km ²	106,01
Perímetro de la cuenca	Km	59,68
Longitud axial	Km	15,80
Cotas		
Cota máxima	msnm	1551
Cota mínima	msnm	245
Centroide		
X centroide	m	508220,63
Y centroide	m	325165,47
Z centroide	msnm	844,05
Altitud		
Altitud media	msnm	844,05
Altitud más frecuente	msnm	450,00
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	595,00
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	45,89
Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	25,43
Orden de la Red Hídrica	UND	5,00
Longitud de la red hídrica	km	141,36
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	%	20,35
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	Kirpich (h)	0,34
	Kirpich (min)	20,47
Pendiente del cauce principal	m/km	9,07
Factor de Forma (Horton)		0,42
Coefficiente de Gravielus (I_c)		1,64
Coefficiente de Masividad (K_m)	m/km ²	7,96
Densidad de drenaje		1,33

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de pendientes en conjunto con una moderada densidad de drenaje (Fuentes, 2004; Gaspari et al, 2012) y un régimen pluvial alto (2100 mm/año), genera procesos de erosión laminar que favorecen el transporte de sedimentos de la cuenca hacia el embalse; su forma alargada y la longitud del cauce principal (25,43 km) aumentan el tiempo de concentración, provocando que la respuesta de la cuenca a la concentración de lluvias torrenciales sea menos efectiva, lo cual propicia la generación de caudales pico que representan un peligro de inundación para los terrenos, generalmente planos, de la cuenca baja, especialmente en los cantones San José (Chalatenango), El Matazano, El Salitre (San Miguel de Mercedes), Cuesta de Marina (Azacualpa) y San Bartolo, aunque este último de manera indirecta por encontrarse cercano a la desembocadura del Tamulasco en el Embalse Cerrón Grande.

8.1.4 *Relieve.*

La cuenca del río Tamulasco presenta una altitud máxima de 1551 y una mínima de 245 msnm, con una frecuencia altitudinal media de 578 msnm, su curva hipsométrica (Figura 7) posee una forma típica de cuencas maduras en equilibrio (CATIE, 2011), las cuales según Strahler, (1952), poseen un poder erosivo atenuado en comparación a las cuencas de reciente data, debido a que se consideran como cuencas sedimentarias, en las que el desgaste de las zonas altas ha originado zonas de depósito y valles al interior de la misma.

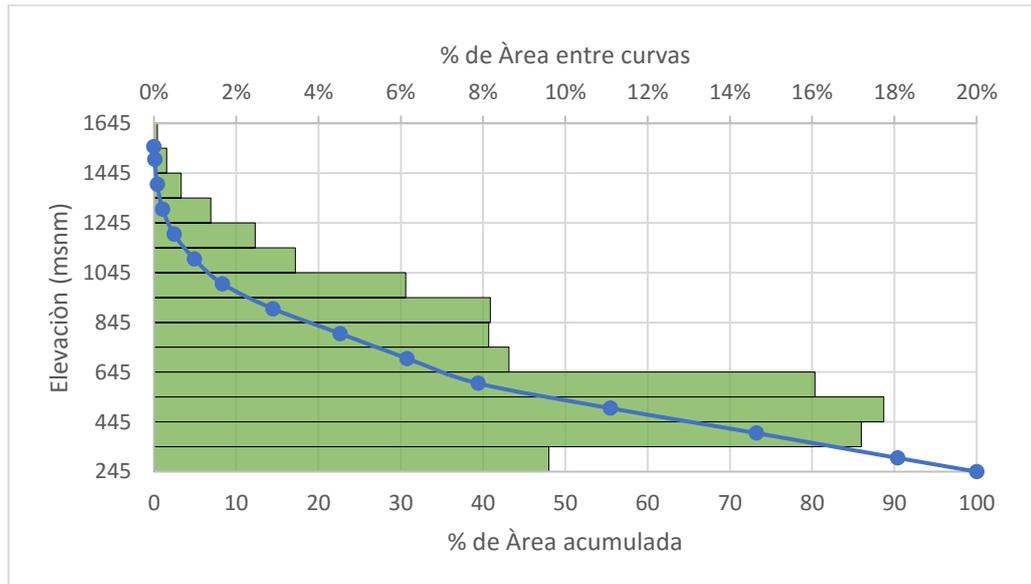


Figura 7. Curva hipsométrica y gráfica de frecuencias altitudinales de la cuenca del río Tamulasco

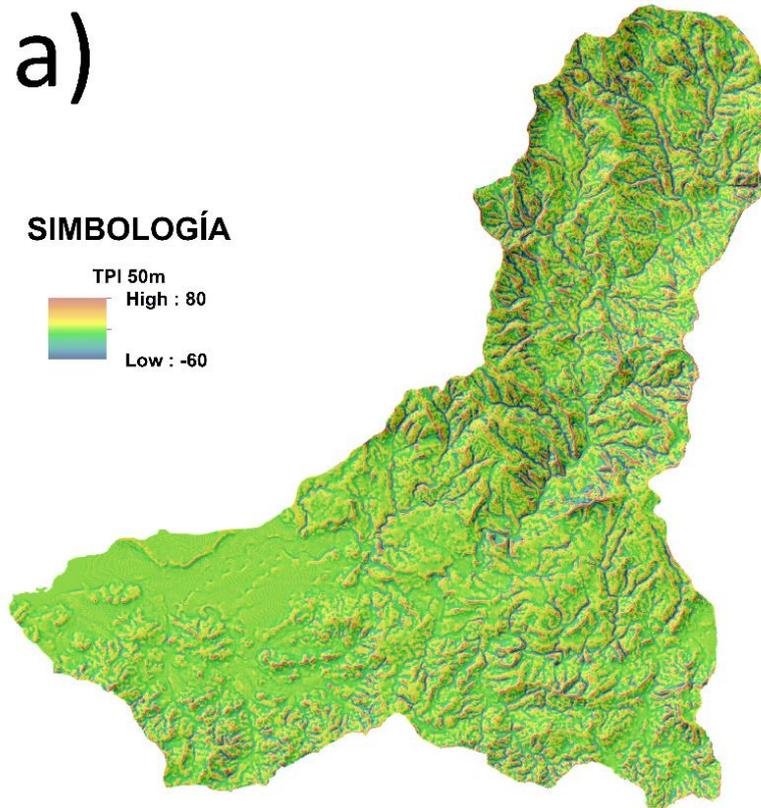
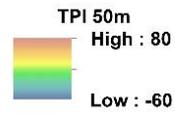
8.1.5 *Índice de Posición Topográfica.*

Para el análisis del TPI en la cuenca del río Tamulasco, se realizó la evaluación de celdas proximales a 50 y 1200 metros de longitud, debido a que este índice es altamente dependiente de la escala espacial y de la complejidad topográfica (Weiss, 2001). Los resultados de esta evaluación muestran que en la Figura 8a, existen muchas líneas que corresponden a zonas de crestas y hondonadas, observándose un mayor detalle en los laterales de las montañas, las cuales se dibujan de mejor forma dada la proximidad de las celdas que participan en el análisis.

Mientras tanto, en la Figura 8b, las crestas de montañas y hondonadas se dibujan de forma más amplia y se pierde el detalle de la ladera, lo cual contrasta con las observaciones realizadas por Weiss, 2001; Iliá, Roza y Koumantakis, 2013 y Seif, 2014, quienes indican que, a mayor distancia en el análisis proximal, se presentan una visualización más clara de la topografía en áreas de mayor extensión territorial como es el caso de las cuencas.

a)

SIMBOLOGÍA



b)

SIMBOLOGÍA

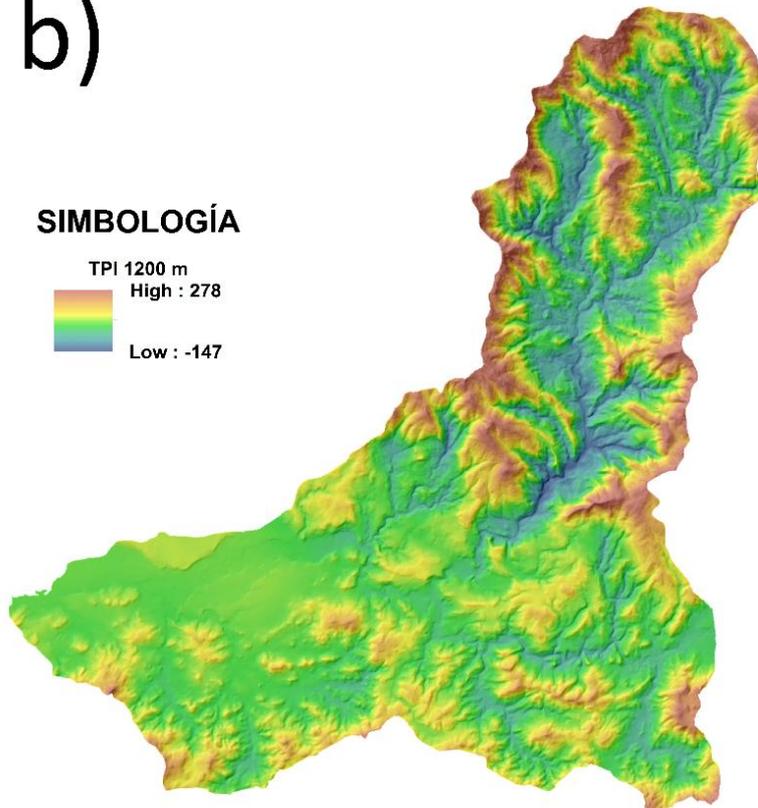
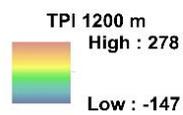


Figura 8. Comparativa de dos escalas de TPI para la cuenca del río Tamulasco.

Los ráster obtenidos de TPI a 50m y 1200m fueron combinados utilizando la extensión de creada por Jenness, para obtener el mapa de clasificación del relieve de la cuenca del Tamulasco

(Figura 9), en el cual se observa la predominancia de cimas montañosas y cañones en la parte alta de la cuenca; mientras que en la parte baja predominan los valles en forma de U, características que nos brindan una primera aproximación al potencial erosivo de la cuenca debido a su relieve accidentado y coincide con la categorización obtenida de acuerdo a su valor de masividad.

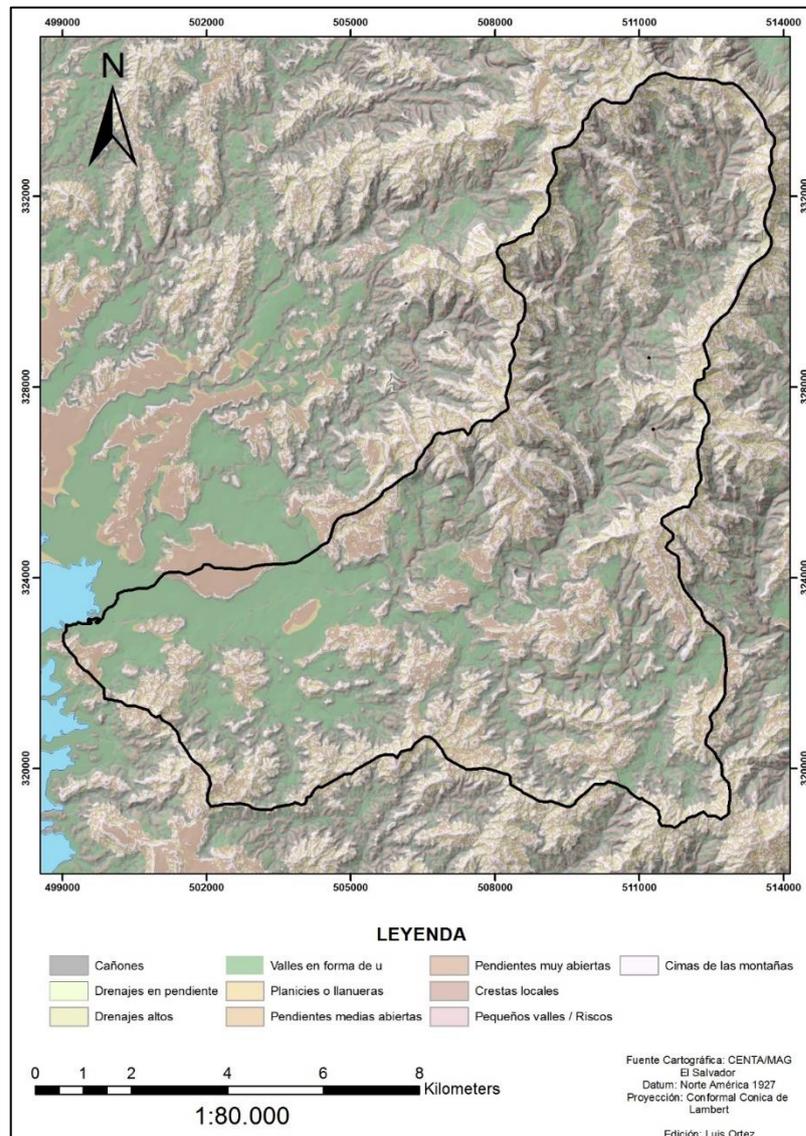


Figura 9. Clasificación de las formas del relieve de la cuenca del río Tamulasco

8.1.5.1 Perfil longitudinal del cauce principal

El cauce principal del río Tamulasco se origina a los 1550 msnm aproximadamente, en el macizo montañoso de los municipios de Ojos de Agua y La Laguna, recorre una distancia de 25,43 km hasta desembocar en el Embalse Cerrón Grande (Figura 10). Este descenso de superior a los 1000 m desde la cabecera hasta el embalse, permite que existan en la cuenca diversas zonas de vida, favoreciendo la diversidad ecológica.

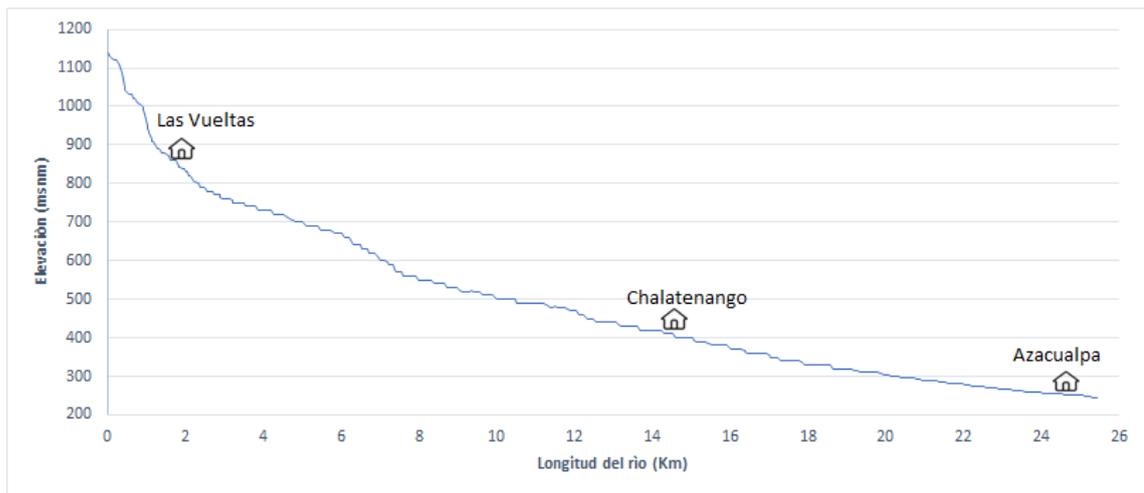


Figura 10. Perfil longitudinal del río Tamulasco y poblados importantes.

En la parte alta el cauce principal de la cuenca del río Tamulasco presenta un lecho rocoso encañonado, con peñascos y rocas de gran tamaño, y una pendiente aproximada del 14%, lo que hace que la ocurrencia de inundaciones en esta zona sea casi nula. La influencia de las lluvias orográficas permite una mayor remoción de suelo provocando procesos de erosión, transportando material de tamaño diverso y aunque no existen zonas de depósito, en las pozas y meandros es común encontrar un lecho arcilloso y con alto contenido de materia orgánica. (Figura 11).



Figura 11. Cauce del río Tamulasco, parte alta.

En la zona media de la cuenca (Figura 12), la altura de las márgenes disminuye y hay un ensanchamiento de su sección transversal y aunque su lecho se conserva aún rocoso, el tamaño de los cantos rodados se reduce considerablemente, así como también su pendiente (8%); el

uso del suelo por la agricultura, ya sea intensiva o de subsistencia, influye de manera significativa en la remoción del mismo (sección 8.1.2), lo cual, en presencia de una densidad de drenaje mucho mayor en comparación a la de la parte alta, conduce considerables cantidades de sedimento al cauce principal, propiciando la formación de bancos de arena y la acumulación de materia orgánica en el lecho.

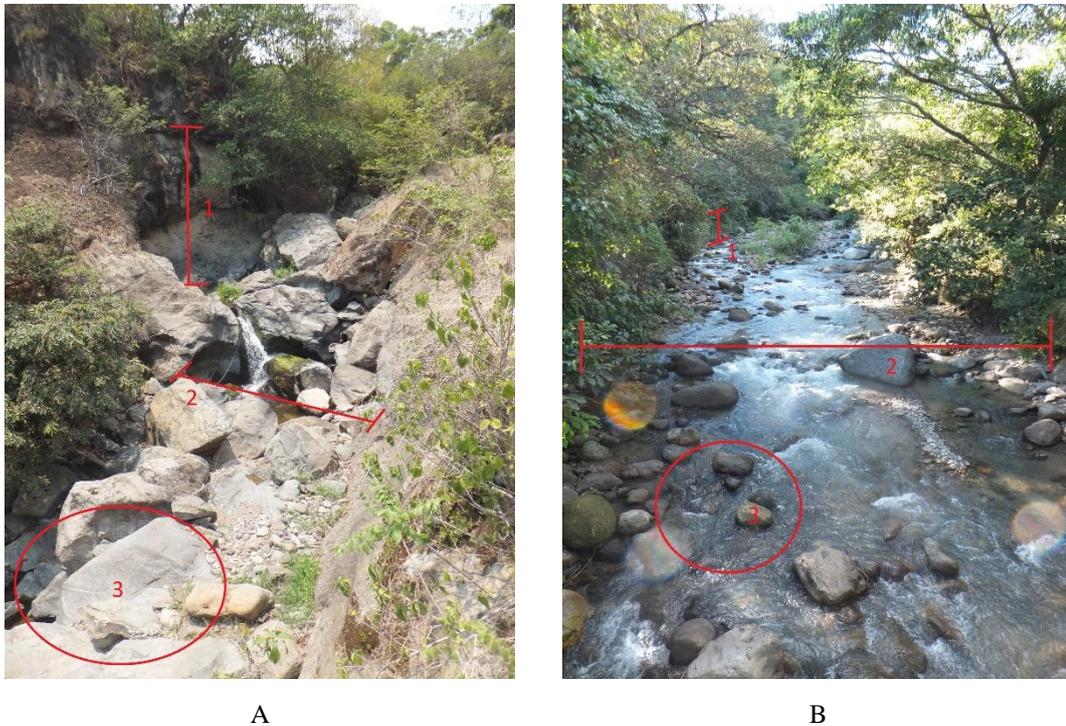


Figura 12. Comparativa entre el ancho del cauce. A) Cauce del río Tamulasco, parte alta; 1- cauce encañonado, 2- anchura reducida, 3- lecho con rocas de gran tamaño B) Cauce del río Tamulasco, parte media. 1- disminución en la altura del margen, 2- aumenta el ancho del río, 3- el tamaño de las rocas del lecho disminuye.

En la cuenca baja, el ensanchamiento del cauce principal es menor, por ejemplo, a la altura de la carretera Longitudinal del Norte, el cauce posee cerca de 100 metros de ancho. Este ensanchamiento y la disminución de la pendiente (2 %), provoca una reducción en la velocidad del caudal, promoviendo la formación de grandes bancos de arena, especialmente en la intersección del río con el embalse Cerrón Grande.

En esta zona es importante considerar la fluctuación de las aguas del embalse, ya que durante el periodo lluvioso, estas aumentan, y con la llegada de fuertes crecidas (sección 8.1.3), la dinámica de la zona se ve afectada, principalmente en la resuspensión de material edáfico, el cual llega hasta el embalse y puede contribuir a incrementar las tasas de sedimentación del mismo.

8.2 Estimación de la pérdida de suelo.

8.2.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

El régimen pluviométrico observado en la cuenca del río Tamulasco se caracteriza por presentar dos épocas fuertemente marcadas; una seca entre los meses de diciembre a marzo y otra lluviosa entre los meses de abril a noviembre, esta última presenta sus valores máximos de precipitación entre los meses de septiembre y noviembre para el período analizado. Los valores de erodabilidad de la lluvia (Factor R ver anexo 3) en la cuenca disminuyen de oeste a este y se encuentran entre los 1188.57 a los 1308.17 MJ.mm.Ha⁻¹.h⁻¹ (Figura 13), lo cual según Almoza, Ruiz & Alonso (2007), se tipifican como de Baja erodabilidad.

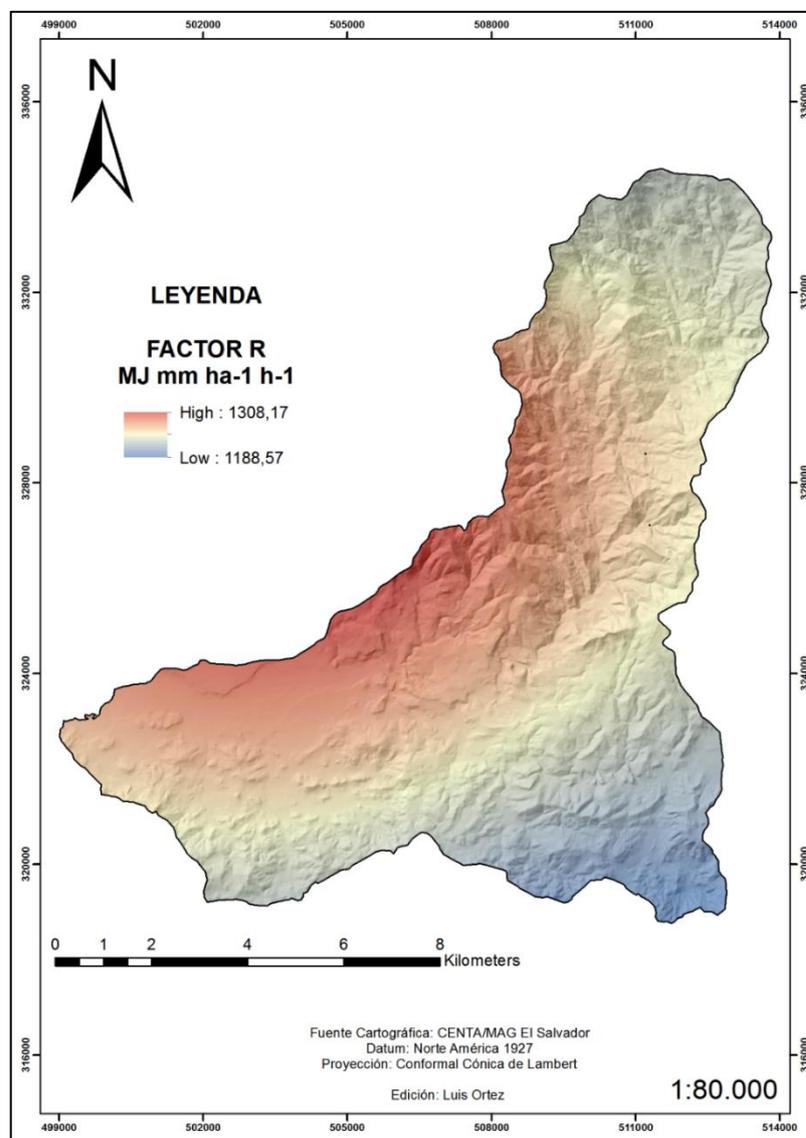


Figura 13. Factor R, erodabilidad de la lluvia.

Por otro lado, el análisis de suelos de la cuenca demuestra que estos poseen mayoritariamente un alto contenido de materia orgánica, una estructura de bloque laminar masiva y una permeabilidad lenta, probablemente debido a su alto contenido de arcillas (Anexo 4). Dadas las características anteriores, al observar la figura 14, podemos observar que en la parte baja de la cuenca los suelos son mayormente tendientes a erosionarse que en la parte alta.

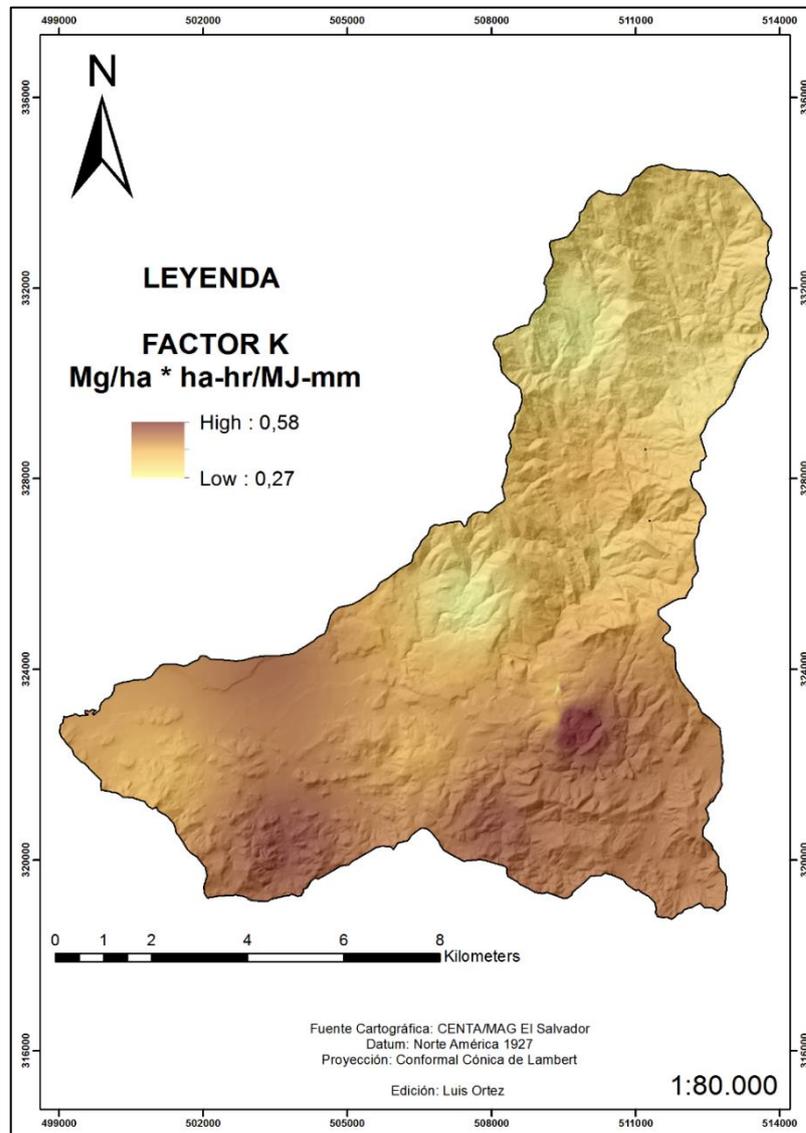


Figura 14. Factor K, erodibilidad del suelo.

Los valores obtenidos en el análisis del factor LS (longitud y grado de la pendiente, figura 15), contrastan con los resultados obtenidos del Factor K, es decir, de acuerdo a su estructura, los suelos son mayormente tendientes a erosionarse en la cuenca baja del Tamulasco, pero por su sistema de pendientes la tendencia a erosionarse radica en la cuenca alta del río, lo cual

concuenda con la literatura citas y con la forma de la curva hipsométrica obtenida para esta cuenca.

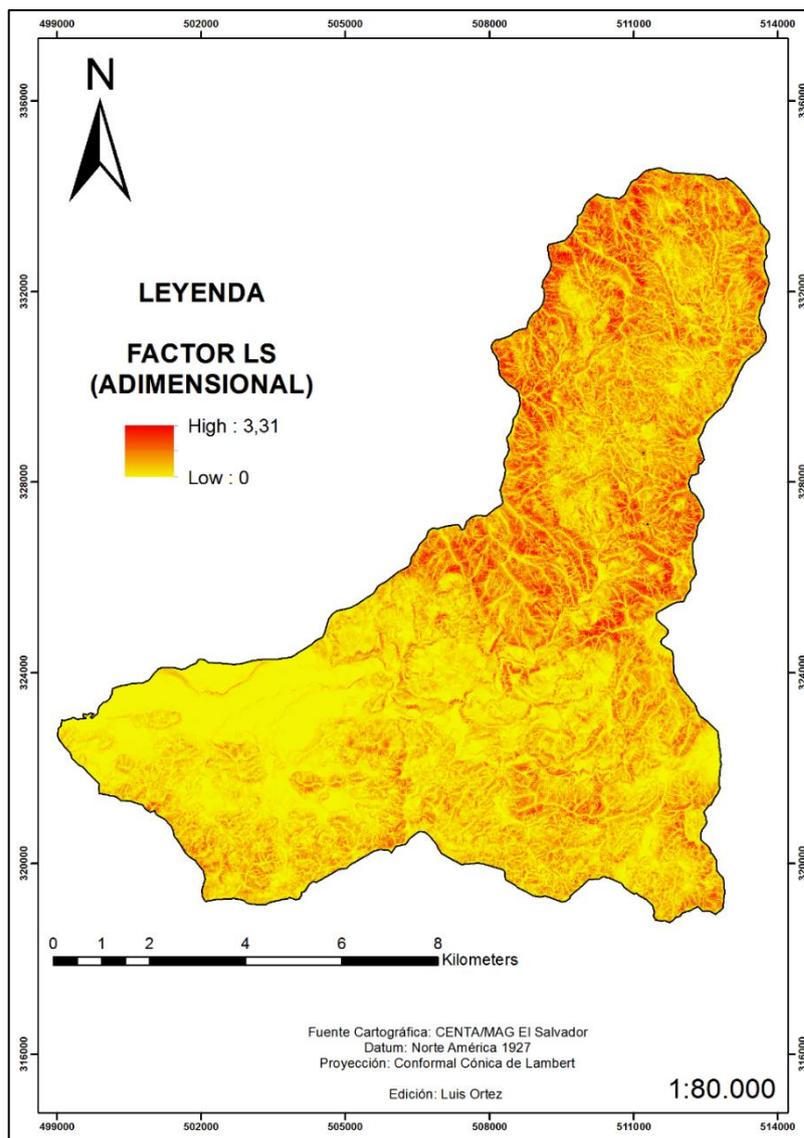


Figura 15. FactorLS, longitud y grado de la pendiente.

Finalmente, en la superficie de la cuenca, de acuerdo al mapa oficial se identificaron 14 usos de suelo, entre los cuales destacan los cultivos anuales y de granos básicos, así como aquellos destinados a la producción de pastos, los cuales predominan hacia el sur de la cuenca, en donde la actividad ganadera es más intensiva; al norte de la cuenca se encuentran principalmente relictos de bosque primario, asociados probablemente a la fragmentación ecológica del Área Natural Protegida La Montañona (figura 16).

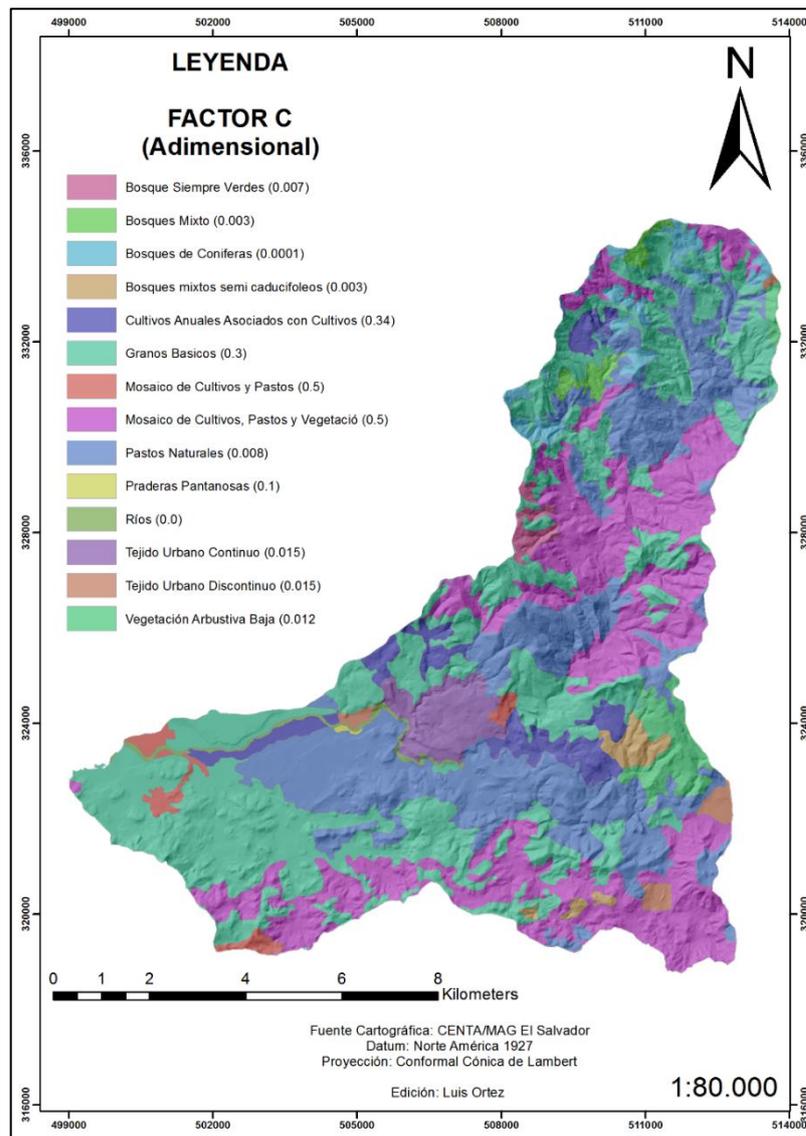


Figura 16. Factor LS (Longitud y grado de la pendiente).

Una vez obtenidos los factores R, K, LS y C, se procedió a obtener el mapa de pérdida de suelos de la cuenca del río Tamulasco en Ton/ha/año (Figura 17) el cual fue clasificado según los criterios planteados por la FAO/UNESCO/PNUMA, observándose que la erosión considerada de moderada a severa ocupa el 45.8% de la superficie de la cuenca (Tabla 5)

Tabla 5. Clasificación del grado de erosión según la clasificación de la FAO.

Erosión		Área de la cuenca (km ²)
Rango	Tipo	
<10	Ligera	57.42
10 – 50	Moderada	12.18
50 – 200	Alta	28.36
>200	Severa	8.04

Elaboración propia con base a FAO/UNESCO/PNUMA.

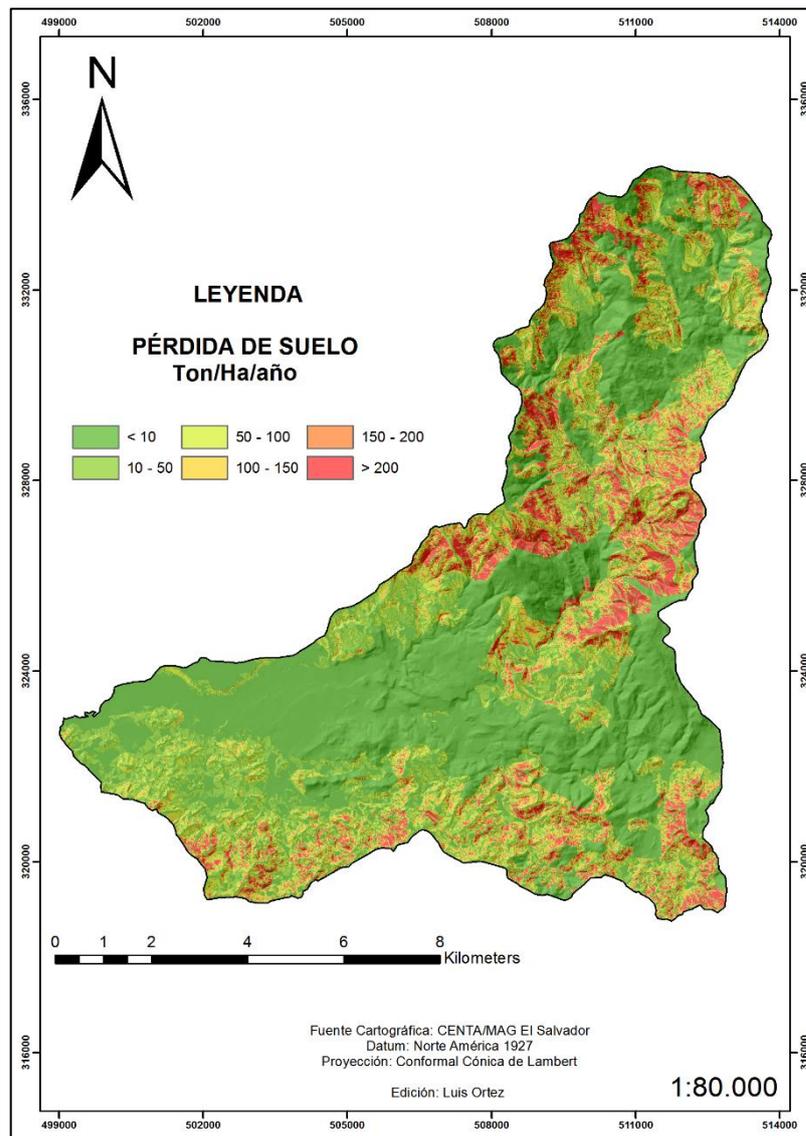


Figura 17. Factor A, Pérdida de suelo en Ton/ha/año según el modelo USLE.

Posteriormente se realizó un análisis estadístico (Tabla 6), en el cual se evaluó la correlación de cada uno de los factores R, K, LS y C con el factor A, determinándose que el factor LS es el más influyente sobre la pérdida de suelo en la cuenca del río Tamulasco, seguido por la cobertura del suelo. Esto puede visualizarse al comparar la figura 17 con los mapas de las Figura 2 y Figura 9, en los cuales se observa que las formas de relieve catalogadas desde pendientes medias abiertas hasta cimas de montaña y con zonas de uso de suelo destinado al cultivo de pastos con cultivos y granos básicos, son las que poseen un mayor grado de pérdida de suelo.

Esto pone de manifiesto que un suelo por sus características naturales puede ser tendiente a erosionarse, pero que, con la intervención humana, este fenómeno puede verse acentuado debido a las malas prácticas de labranza y la falta de medidas de retención de suelo coincidiendo con lo planteado por Sinha & Joshi (2012).

Tabla 6. Correlación entre los diferentes factores de la USLE

Correlación de Sperman.					
		Factor R	Factor K	Factor LS	Factor C
Pérdida de suelo	Coefficiente de Correlación	-0,370	-0,104	0,760	0,480
	Valor P (bilateral)	0,447	0,032	0,000	0,000

Elaboración propia. Correlaciones significativas en el nivel de 0.05

8.2.2 Metodología del Radionúclido ^{137}Cs .

Como análisis complementario a la estimación de la pérdida del suelo por el método USLE, se realizó el análisis del radionúclido ^{137}Cs , para el cual se realizó la extracción de 24 núcleos de suelo, 3 por cada parcela de trabajo y 3 de cada sitio de referencia, de estos, se procesaron 15, 4 parcelas y un sitio de referencia, los restantes fueron descartados pues al momento del procesamiento se observó que la capa de suelo era muy pequeña (10 a 15 cm) seguida de un material endurecido conocido comúnmente como “talpetate”, el cual no es capaz de retener el ^{137}Cs ; la distribución y relieve de los sitios de estudio se muestran en la Figura 1818.

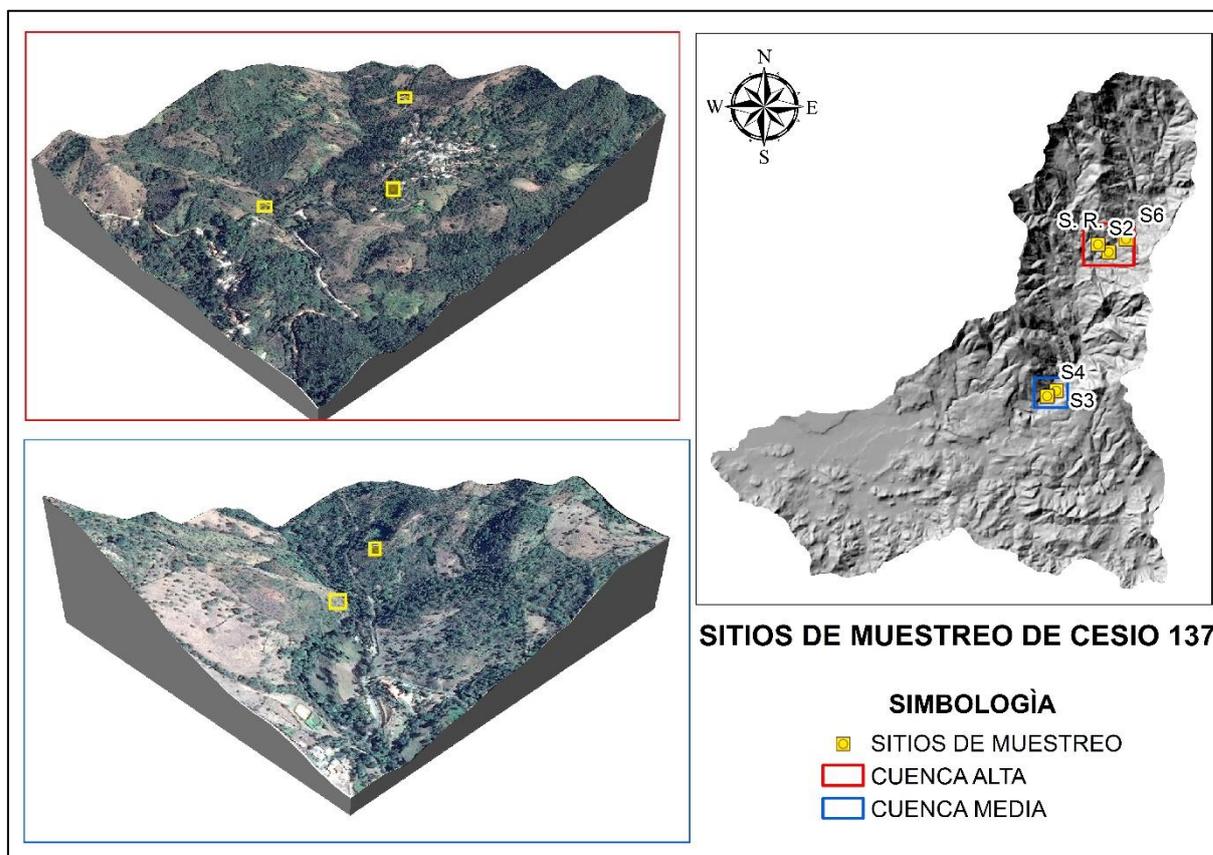


Figura 1818. Detalle de los sitios de muestreo del ^{137}Cs .

A continuación, en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se detallan los valores de actividad específica para cada sitio de muestreo, así como el valor de la erosión en cada una de las parcelas de estudio.

Tabla 7. Estimación de la pérdida de suelo por el método del ^{137}Cs .

ID	USO DEL SUELO	PROFUNDIDAD (cm)	INVENTARIO DE ^{137}Cs (Bq/m ²)		% DE DISTRIBUCIÓN	DESCRIPCIÓN	EROSIÓN (Ton/Ha/año)
			Sección	Total			
Sitio de Referencia	Patio de cementerio	0 -20	0,64	1,22	Ref.	Ref.	Ref.
		21- 40	0,58				
SITIOS DE ESTUDIO							
Sitio 1	Cultivos anuales	0 -20	0,58	1,12	-7,95	Erosión	18,40
		21- 40	0,54				
Sitio 2	Pastos	0 -20	0,44	1,16	-5,02	Erosión	11,61
		21- 40	0,72				
Sitio 3	Cultivo de maíz	0 -20	0,45	0,77	-36,64	Erosión	84,76
		21- 40	0,33				
Sitio 4	Cultivos anuales	0 -20	0,43	1,11	-9,39	Erosión	21,72
		21- 40	0,67				

- Los cultivos anuales, tales como el maíz, frijoles y el arroz, se realizan en rotativo, es decir que durante el mismo año hidrológico el campesino puede producir los tres tipos de cultivo o dos de ellos, generalmente no se deja descansar la tierra y en este caso, todos son catalogados como cultivos de ladera.

Los inventarios en países cercanos como Nicaragua y Cuba reportan valores promedio de distribución vertical de cesio de 224.81 Bq/m² (Caballero, 2016) y 116.12 Bq/m² (Sibello & Febles, 2011) respectivamente; la cuenca del río Tamulasco posee inventarios muy inferiores en comparación a otros sitios de la región, lo cual probablemente se deba al sistema de pendientes de la zona, que como señala Soto et al (2000), las zonas de escarpe poseen siempre pequeñas concentraciones de ¹³⁷Cs, además es posible señalar que la composición y estructura del suelo también incide en estos inventarios, debido a que las zonas en donde se tomaron las muestras para cesio, poseen valores altos de erodabilidad (Figura 15).

8.3 Carga de sedimentos

La carga de sedimentos únicamente se pudo medir de forma continua en el punto A (Puente las vueltas) debido a que las trampas colocadas en el punto B (Calle a reubicación – ver Figura 4), en 3 de los 5 meses de muestreo, no pudieron ser recuperadas debido a que fueron arrastradas por la corriente del río, a pesar de ello, en los meses de junio y julio se observa un aumento en los valores de la carga sedimentaria en el punto B respecto al punto A (Tabla 8).

Tabla 8. Carga de sedimentos del río Tamulasco.

MES	CAUDAL m ³ /seg	A		B	
		Carga de Sedimentos		Carga de Sedimentos	
		Suspendidos (Ton/día)	Fondo (Ton/año)	Suspendidos (Ton/día)	Fondo (Ton/año)
Junio	1,39	16,80	1,36	48,14	8,53
Julio	2,30	1472,15	9,00	1630,77	165,95
Agosto	2,66	1351,19	67,79	--	--
Septiembre	1,90	451,65	28,31	--	--
Octubre	1,14	2,91	0,18	--	--

Durante el mes de julio, el cual presentó los valores más altos de carga de sedimento para el período de muestreo, pudo observarse un incremento cercano al 95% en los sedimentos de fondo del punto B respecto al punto A, si bien es cierto, los sedimentos suspendidos poseen un mayor orden de magnitud que los de fondo, estos por su naturaleza, al ingresar al embalse Cerrón Grande muy probablemente sean llevados aguas abajo y no pasen a formar parte de los sedimentos del embalse, mientras que los sedimentos de fondo se depositarán más fácilmente en la desembocadura del Tamulasco, ocasionando una disminución del volumen útil del embalse en esta zona. Desgraciadamente, esta relación no pudo ser comprobada durante esta investigación debido a la falta de datos de los meses posteriores.

9 CONCLUSIONES

El sistema de pendientes y la densidad de drenaje de la cuenca del río Tamulasco permiten que ésta tenga un tiempo de concentración corto. De acuerdo a los valores del factor de forma y coeficiente de compacidad de la cuenca, se esperaría que el tiempo de concentración fuese largo, debido a que habría irregularidad en las distancias que la lluvia debería de recorrer desde cualquier punto de la cuenca hacia el punto de salida, esta situación, sin embargo, se ve superada debido al tipo de pendientes imperantes en la cuenca alta y media de la misma, las cuales van desde escarpadas (10 – 60 %) hasta muy escarpadas (> 60%) lo cual se ve reflejado en el coeficiente de masividad y las formas del terreno (desde pendientes medias hasta cimas de montaña) obtenidas a partir del TPI , favoreciendo el escurrimiento y por ende la concentración del agua, que a su vez contribuirá al movimiento de suelo en la cuenca.

El análisis de la erosión por medio de la aplicación del modelo USLE y la técnica nuclear de ^{137}Cs responden a escalas de medición de pérdida de suelo diferentes, mientras que la USLE realiza una valoración del área a nivel regional, local o puntual, la metodología del ^{137}Cs lo hace únicamente a nivel puntual, por tanto, la implementación de cada una de ellas dependerá del objetivo que se persiga, siendo la metodología USLE la más flexible para trabajar a nivel de cuenca, ya que resulta de gran utilidad en la identificación de zonas prioritarias para realizar acciones u obras de conservación de suelo, especialmente en cuencas montañosas como la del Tamulasco.

La aplicación del modelo USLE en la cuenca del río Tamulasco indica que la escarpada inclinación de las pendientes y la longitud de las mismas, más la compactación del suelo debido a las inadecuadas prácticas de cultivo y el sobrepastoreo de algunas zonas de la cuenca media, limitan la capacidad de infiltración de los suelos, favoreciendo el escurrimiento y transporte de sedimentos; en contraste la técnica nuclear de ^{137}Cs , determinó que las parcelas de estudio en el 100% de los casos poseen procesos de pérdida de suelo, catalogándose de moderadas a altas (de 11.61 a 84.76 Ton/ha/año) de acuerdo a los valores propuestos por la FAO, los cuales aplican igualmente para el modelo USLE.

La carga promedio de sedimentos estimada a la altura del municipio de Las Vueltas (cuenca alta) durante el período de estudio fue de 2.41×10^5 Ton/año, lo que representa una pérdida anual del 0.0071% del volumen útil del embalse ($1297 \times 10^6 \text{ m}^3$ para 1999); si bien es cierto estos valores parecen muy bajos hay que considerar que son datos parciales y que responden únicamente a la cuenca del Tamulasco, por lo que, a pesar de los problemas técnicos ocurridos para obtener esta estimación, replicar esta metodología resultaría de gran utilidad para

establecer un valor de seguridad y utilizarlo como criterio de protección de suelo en las cuencas tributarias del Embalse Cerrón Grande, prolongando la vida útil del embalse.

Dadas las características morfométricas y socioeconómicas de la cuenca del río Tamulasco se propone como medida de conservación de suelos, la reforestación de la cuenca alta con especies arbóreas autóctonas tales como *Swietenia mahagoni*, *Samanea saman*, *Caiba pentandra*, *Cedrela odorata*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Albizia caribaea*, *Liquidambar styraciflua*, *Juglans regia* y *Schinopsis balansae*, las cuales permitirán minimizar el grado de deforestación de la zona, revertir el avance de la frontera agrícola y aumentar los servicios ecosistémicos del bosque en cuanto a la infiltración de agua y reducción de la erosión se refiere, en el anexo 3 se describe con mayor detalle el tipo de especie y la forma de utilizarlas.

10 RECOMENDACIONES

A CEL

- Utilizar el mapa de pérdida de suelo para categorizar la prioridad de las zonas a intervenir con las acciones del proyecto vida y la propuesta de reforestación planteada en el anexo 3 de este documento.
- Aplicar el modelo USLE en las cuencas que drenan al Embalse Cerrón Grande para estimar la producción actual de sedimentos y caracterizar los procesos erosivos de dichas cuencas en aras de intervenirlas dentro del proyecto vida.
- Establecer un programa de monitoreo permanente de los parámetros contemplados en este estudio para mantener una base de datos fiable para la implementación de modelos predictivos.
- Establecer alianzas estratégicas con el LABTOX-UES para la implementación de nuevas tecnologías tanto en el análisis de radionúclidos, así como también en otras con las que cuenta dicho instituto de investigación.

A CENTA.

- Establecer un programa de extensionismo que capacite a los productores de las regiones de la cuenca alta del Tamulasco para que puedan ejercer un uso sustentable de los recursos de la zona (Aplica de igual forma a CEL).
- Establecer alianzas estratégicas con el LABTOX-UES para la implementación de intercambio de nuevas tecnologías, tanto en el análisis de radionúclidos, así como también en otras con las que cuentan ambos centros de investigación.
- Desarrollar programas de investigación orientados al recurso suelo en la zona norte del departamento de Chalatenango con el propósito de crear una amplia base de datos sobre este recurso.

Al MARN.

- Acompañar de manera más intensa el trabajo de las Unidades Ambientales de los municipios de la cuenca del río Tamulasco con el fin de preservar los recursos naturales de la zona.
- Desbloquear la información ambiental necesaria para la realización de proyectos de investigación y otros de tipo comunal que requieran la información resguardada por el ministerio.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alcañiz, J. (2008). Capítulo 4. Erosión: Evaluación del riesgo erosivo y prácticas de conservación de suelo. En P. Andrés, & R. Rodríguez, *Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica* (págs. 125 - 146). Girona (España).
- Almorox Alonso, J., López Bermudez, F., & Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Almoza, Y., Ruiz, M., & Alonso, G. (2007). Determinación de la Erosividad de las precipitaciones en el oeste de Cuba. *Zonas Áridas 11(1)*, 139 - 149.
- ATA / INADE. (2002). *Plan de gestión de la oferta de agua en la cuenca ámbito del proyecto Puyango - Tumbes*. Asesores Técnicos Asociados S. A., Instituto Nacional de Desarrollo. Lima, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Barrios, A., & Quiñonez, E. (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo (R)USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de Los Andes Venezolanos. *Revista Forestal de Venezuela. 44 (1)*, 65 - 71.
- Belasri, A., & Lakhouili, A. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 98-107.
- Brígido Flores, O., Montalván Estrada, A., Gandarilla Benítez, J., Barreras Caballero, A., Sanz Ramos, Z., & Caparrós Cubeña, Y. (s.f.). Estimación del inventario de Cs - 137, producto de las precipitaciones atmosféricas. (F. I. Nucleares, Ed.) Cuba. Recuperado el marzo de 2017, de <http://www.foroiberam.org/web/guest/fondo-documental?documentoId=224793>
- Brígido, O., Mendoza, L., Montalván, A., & Rodríguez, D. (2006). Cuantificación de procesos erosivos en suelos agrícolas empleando las precipitaciones radiactivas globales del Cesio 137. *VI Congreso Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. Memoria*.
- Caballero, Y. (2016). Estimación de la erosión y sedimentación en la subcuenca del Embalse Apanás - Asturias usando radioisótopos (¹³⁷Cs y ²¹⁰Pb). *Revista Agua y Conocimiento, Año 2016. Vol.2, No.1.*, 34 - 48.

- CATIE. (2011). *Caracterización, diagnóstico, línea base y zonificación territorial de la cuenca del río Jesús María. Tomo I*. Turrialba, Costa Rica. : Centro Agronómico Tropical de Enseñanza y Aprendizaje.
- Cerignoni, F., & Rodrigues, V. (2015). Análisis morfométrico de la microcuenca “C” núcleo Cunha, São Paulo, Brasil. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 41, 355 - 366. Obtenido de <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/index>
- Corporación Autónoma Renional del Valle del Cauca (CVC). Dirección Técnica Ambiental. Universidad del Valle. (2007). *El río Cauca en su valle alto: Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia*. Santiago de Cali.
- Cuello Espinoza, M. (2003). *Estimacion de la produccion y trasnporte de sedimentos en la cuenca alta del río Yaque del Norte y del río Guanajuma, República Dominicana*. Turrialba, Costa Rica.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Cuesta Aguilar, M., & Delgado Cuenca , A. (1997). Técnicas isotópicas para la cuantificación de la erosión. *Agricultura: Revista Agropecuaria N° 776*, 230 - 234.
- Díaz Mendoza, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 31 No. 3*, 80 - 90.
- DIGESTYC. (2008). *VI Censo de población y V de vivienda 2007*. San Salvador, El Salvador: Ministerio de Economía.
- Docampo, L., Rico, E., Sevillano, M., de Bikuña, B., & Rallo , A. (1990). Análisis morfométrico de las redes fluviales del País Vasco. *Kobie N° XIX*, 6 - 43.
- Dumas Salazar, Á. (2012). *Riesgo de erosión hidrca en la cuenca hidrográfica del río Mundo. Tesis de Máster en Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid, España. : Universidad Complutense de Madrid.
- Eweis, J., Ergas, S., Chang, D., & Schroeder, E. (1999). *Principios de Biorecuperación (Bioremediation)*. (I. Tejero Monzón, & J. Amieva Del Val, Trads.) Aravaca, Madrid, España: McGraw - Hill / Interamericana de España.
- FAO. (2002). *Estado de la Información Forestal en El Salvador*. . Santiago, Chile: Monografías de paises, Volumen 8.

- FAO/GTIS. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico*. Roma, Italia.: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos, Roma, Italia.
- Farfán , F., Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. *Ciencia, Vol. 5, N° 16.*, 7 - 21.
- Farfán Zúñiga, J. (2002). *Determinación del índice de erosión pluvial (R) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII región del Maule*. Talca, Chile.: Universidad de Talca.
- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., & Al-Shaikh, N. (2015). Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, using Remote Sensing and GIS. *Scientific Research Publishing. Journal of Water Resource and Protection*, 456 - 475. doi:<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.76037>
- Flores López, H., Martínez Menes, M., Oropeza Mota, J., Mejía Saens, E., & Carrillo González, R. (2003). Intwgración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hdrográfica de Tepetitlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2, abril-junio*, 233-244.
- Fortuño Ibáñez, J. (2014). *Estudio de la Erosion en Cuencas Naturales mediante KINEROS 2. Tesina de espacialidas*. España.: Universitat Politècnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.
- Fuentes Junco, J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del parque nacional Picode Tancítaro*. México.: Insituto Nacional de Ecología .
- Fuentes, J., & Vargas Rojas, R. (2011). Aplicación de la Geomorfometría en la cartografía de Unidades Fisiográficas. *Revista Bolivariana de las Ciencias del Suelo. Vol. 1. N° 1.*, 49 - 61.
- FUSADES. (2007). *Estado Situacional del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: FUSADES-CEDES.
- Garcia-Chevesich, P. (2009). *Erosion Processes and Control*. Arizona, Estados Unidos.: The University of Arizona. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10150/195844>

- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., . . . Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.*
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). 7 Congreso de Medio Ambiente AUGM. *Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina.* . La Plata, Argentina.
- Genchi, S., Carbone, M., Piccolo, M., & Perillo, G. (2011). Clasificación geomorfológica automatizada en terrazas del noreste macizo norpatagónico, Argentina. *GeoFocus (Artículos), n° 11*, 182-206.
- González de Matuco, A. (2004). *Ánalysis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zandorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la A.G.E. N.º 38*, 311 - 329.
- González del Tánago, M. (1991). LA ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), Ecología N° 5*, 13 - 50.
- Horton, R. (1932). Drainage Basin Characteristics. *Transactions, American Geophysical Union. Reports and Papers, Hydrology*, 350 - 361.
- Ilia, I., Roza, D., & Koumantakis, I. (2013). Landform classification using GIS techniques. The case of Kimi municipality are, Euboea Island, Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII*, 264 - 274.
- Iroumé, A., & Uyttendaele, P. (2009). Cuantificación del transporte de sedimentos mediante mediciones directas y el uso de modelos empíricos en una cuenca experimental de la Cordillera de Los Andes, Sur de Chile. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia V. 32 N° 2*, 143 - 151.
- Jenness, J. (2006). *Jenness Enterprises*. Recuperado el 16 de diciembre de 2017, de <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
- Lince Salazar, L., & Castro Quintero, A. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Cenicafé 66 (1)*, 25 - 31.
- MARN. (2002). *Segundo Informe Nacional de implementación de la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación y sequía en El Salvador*. San Salvador, EL Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- MARN. (2016). *Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias*. San Salvador, El Salvador.: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Mata, R., & Puiguriguer, M. (2000). El Salvador, el “País de las hamacas”. Los riesgos geológicos: El ejemplo de los grandes deslizamientos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.*, 261 - 269.
- Melchor Marroquín, J., & Chagoya Fuentes, J. (Vol. 8 - N° 2 - Set. 2016). Diagnóstico de la erosión hídrica en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz, México. . *Aqua - LAC*, pp. 25 - 35.
- Montes León, M., Uribe Alcántara, E., & García Celis, E. (2011). Mapa de erosión potencial . *ecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. II, núm. 1, enero-marzo* , 5 - 17.
- Morales Ascarrunz, M. (2014). Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití. Turrialba, Costa Rica.: CATIE.
- Morgan, R. P. (2005). *Soil erosion and conservation* (Vol. Third edition). Malden, MA, USA: Blackwell Publishing .
- Navas, A., Soto, J., & Machín, J. (2003). Cuantificación de la erosión y sedimentación en suelos mediterráneos mediante la calibración de medidas de Cesio 137. *EDAFOLOGÍA, Vol. 10 (3)*, 79 - 83.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2005). *Informe 262: indicadores municipales sobre desarrollo humano y objetivos de desarrollo del milenio*. San Salvador, El Salvador: PNUD coordinador Carlos Acevedo.
- Rabassa, J. (1979). Geomorfología cuantitativa de la cuenca del río Manso Superior, Río Negro, Argentina. Parte II: Análisis Hipsométrico. *Asociacion Geologica Argentina XXXIV (2)*, 141 - 150.
- Rodríguez, M., Florentino, A., Gallardo, J., & García , R. (2004). Sistemas de Inmación geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en badajoz-españa aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*, 54(4), 391-410. Recuperado el 20 de Nov de

2017, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000400003&lng=es&tlng=es.

Roldán Pérez, G. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 2º ed. Gabriel Roldán Pérez, Jonh Jairo Ramirez Restrepo. Medellín: Universidad de Antioquia.

Romero, B. (2003). *Zonas de Vida de la República de El Salvador*. Soyapango, San Salvador, El Salvador. : (MAG), Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Saldaña Díaz, M., Nemmaoui, A., Cantón Castilla, M., Aguilar Torres, M., & Aguilar Torres, F. (2014). Estimación de la Erosion potencial en la cuenca del río Moulouya aguas arriba de la presa Mohamed V. *MAPPING* . Vol. 23, 168, 4 - 16.

Seif, A. (2014). Using Topography Position Index for Landform Classification (Case study: Grain Mountain). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3(11).

Senciales González, J. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. *NORBA. Revista de Geografía*. Nº 10, 155 - 184.

Sibello Hernández, R., & Febles González, J. (2011). Erosión en la cuenca del río Yaguanabo usando Cesio-137 como radiotrazador. *Centro Agrícola*, 38(1), 57 - 62.

Sinha, D., & Joshi, V. (2012). Application of Universal Soil Loss Equation (USLE) to Recently Reclaimed Badlands along the Adula and Mahalungi Rivers, Pravara Basin, Maharashtra. *JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA*. Vol. 80, 341 - 350.

Soto Torres, J., Gómez Arozamena, J., Cendrero Uceda, A., Díaz de Terán, J., González Díez, A., Remondo Tejerina, J., & Alcaide Orpi, J. (2000). Estudio de algunas características de los deslizamientos de ladera mediante cesio 137. *Nucleus*. Nº 29, 6 - 11.

Suárez Días, J. (2001). *Control de la erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia.: División Editorial y de Publicaciones, Universidad Industrial de Santander.

Tagil, S., & Jenness, J. (2008). GIS - Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landformns Around the Yazoren Polje, Turkey . *Journal of Applied Sciences* 8 (6), 910 - 921.

Teorema. (4 de marzo de 2015). *Teorema Ambiental Revista Técnico Ambiental*. (M. d. Méndoza, Editor) Recuperado el 20 de 10 de 2016, de <http://www.teorema.com.mx/biodiversidad/ecosistemas/elsalvadorenfrenta-degradaciondesuelo/>

- Umaña Gómez, E. (2002). *Manejo de Cuencas hidrográficas y protección de fuentes de agua. Taller de Capacitación*. Estelí, Nicaragua. : Universidad Nacional Agraria .
- UNESCO. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*. Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega Claudio Olivares, Rodrigo Valdés, Francisco Balocchi. Montevideo, Uruguay: Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 18.
- UNESCO. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 1). (J. Brea, & F. Balocchi, Edits.) Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC).
- UNESCO. (2011). *Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo*. Montevideo, Uruguay.: Documentos Técnicos en Hidrología del PHI, número de serie 71.
- Weiss, A. (2001). *Topographic Position and Landforms Analysis*. Seattle WA: The Nature Conservancy, Northwest Division.
- Zavala Cruz, J., Palma López, D., Fernández C., C., López C., A., & Shirma T. , E. (2011). *Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco*. Villahermosa, Tabasco, México: Colegio de Postgraduados, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX.

12 ANEXOS.

Anexo 1: Fotografías



Anexo 1. 1. Prueba de infiltración por el método de Porchet



Anexo 1. 2. Recolección de Muestras de suelo.



Anexo 1. 3. Preparación de muestras de suelo para prueba de Bouyoucos.



Anexo 1. 4. Procesamiento de muestras para prueba de Bouyoucos.



Anexo 1. 5. Coloración de suelos, prueba de Bouyoucos



Anexo 1. 6. Medición con Hidrómetro, prueba de Bouyoucos



Anexo 1. 7. Acidificación de muestras para determinación de materia orgánica por titulación.



Anexo 1. 8. Instalación de durmientes para trampas de Sedimentos.



Anexo 1. 9. Trampas de sedimento instaladas.



Anexo 1. 10. Instalación de trampas de sedimento con durmientes tipo T



Anexo 1. 11. Recuperación y vaciado de trampas de sedimento.



Anexo 1. 12. Extracción de muestras para análisis de cesio 137. 1) Introducción del muestreador. 2) Extracción del muestreador. 3) separación y codificación de las muestras. 4) Instrumentos.



Anexo 1. 13. Evidencia de erosión en riles, cueca alta del río Tamulasco.



Anexo 1. 14. Evidencia de deforestación. Parcela de cultivo de granos básicos.

Anexo 2. Ejemplo de formato utilizado para pruebas de infiltración.

CUENCA DEL RIO TAMULASCO PRUEBA DE INFILTRACION METODO DE PORCHET				COD. TAMU-01
---	--	--	--	--------------

LOCALIZACION				OBSERVACIONES.	
ELEVACION	ESTE	NORTE	FECHA	LUGAR	Sitio de pasto natural, próximo a calle vecinal, al costado opuesto de la calle leve pendiente, dedicado a potrero según lugareños.
448 msnm	292070	1549634	24 noviembre 2015	San Miguel de Mercedes.	

Intervalo (min)	T. acu. (min)	Lect. (cm)	Dif. Lect. (cm)	R/2(t2-t1)	(2h1+R)/(2h2+R)	ln	Velocidad de infiltración.			
							cm/min	cm/hr	mm/hr	m/día
0	0	10	0.2	2.5	1.014	0.0134	0.0340	2.0407	20.41	0.49
1	1	9.8	0.2	1.25	1.014	0.0136	0.0172	1.0344	10.34	0.25
2	3	9.6	0.1	1.25	1.007	0.0069	0.0087	0.5190	5.19	0.12
3	5	9.5	0.1	1.25	1.007	0.0069	0.0087	0.5226	5.23	0.13
4	7	9.4	0.1	1.25	1.007	0.0070	0.0088	0.5263	5.26	0.13
5	9	9.3	0.5	0.42	1.036	0.0356	0.0154	0.9220	9.22	0.22
10	15	8.8	0.4	0.25	1.030	0.0294	0.0076	0.4544	4.54	0.11
15	25	8.4	0.4	0.25	1.031	0.0303	0.0078	0.4686	4.69	0.11
20	35	8	0.4	0.25	1.032	0.0313	0.0081	0.4837	4.84	0.12
25	45	7.6	0.4	0.25	1.033	0.0323	0.0083	0.4998	5.00	0.12
30	55	7.2	0.2	0.25	1.017	0.0165	0.0042	0.2521	2.52	0.06
35	65	7	0	0.25	1.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00
40	75	7				Promedio	0.0079	0.4766	4.7660	0.1144

Datos Gráfico	
T acu (MIN)	(cm/hr)
0	2.04
1	1.03
3	0.52
5	0.52
7	0.53
9	0.92
15	0.45
25	0.47
35	0.48
45	0.50
55	0.25

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \ln \frac{(2h_1 + R)}{(2h_2 + R)}$$

f = Infiltración
 R = radio
 h_1 = Altura inicial del agua
 h_2 = Altura final del agua
 t_1 = Tiempo inicial
 t_2 = Tiempo final
 \ln = Logaritmo natural

Radio	Constante del método
5 cm	2

Profundidad	Hora de inicio.
10 cm	3:30 pm

Anexo 3. Análisis de lluvia.

Tabla 5. Lluvia promedio anual (mm)

Estación	LLUVIA PROMEDIO ANUAL (mm)											Promedio multianual
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Chorrera del Guayabo	2319,50	1934,30	2204,80	2120,60	2359,30	2102,20	2265,40	2176,00	1987,40	1842,10	1964,60	2116,02
Cerrón Grande	2135,10	1766,00	2138,60	2096,00	2286,90	2032,30	1998,60	1938,50	1880,80	1775,30	1549,24	1963,39
Concepción Quezaltepeque	2419,00	1886,00	2511,00	2084,00	2472,00	3022,00	1991,65	2339,60	1716,50	1667,92	1844,65	2177,67
La Laguna	2349,90	1856,79	1093,28	2223,47	2355,70	2733,00	1781,78	2403,90	1682,21	1762,40	1978,10	2020,05
Suchitoto	2218,26	1767,00	2057,10	2103,80	2125,00	2579,00	1776,00	1961,86	1383,67	1572,51	1893,80	1948,91

Tabla 6. Valores IMF

Estación	IMF											IMF multianual
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Chorrera del Guayabo	330,02	316,65	366,31	332,95	387,05	356,29	341,55	334,70	331,91	253,46	305,09	332,36
Cerrón Grande	334,22	263,20	370,51	314,60	396,95	341,01	296,12	311,88	280,08	230,33	244,15	307,55
Concepción Quezaltepeque	349,71	302,66	397,55	342,77	436,83	505,24	337,30	350,10	345,71	276,43	280,06	356,76
La Laguna	335,10	288,35	194,02	375,42	402,16	425,37	283,79	381,52	272,52	259,81	314,86	321,17
Suchitoto	346,21	276,52	331,98	358,01	354,42	452,05	261,25	336,27	254,85	270,94	306,21	322,61

Tabla 7. Valores de erosividad de lluvia (Factor R - USLE)

Estación	FACTOR "R" ESTIMADO											FACTOR R multianual
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Chorrera del Guayabo	1231,65	1178,59	1376,37	1243,28	1459,52	1336,33	1277,54	1250,27	1239,16	929,84	1132,79	1241,40
Cerrón Grande	1248,33	967,91	1393,20	1170,46	1499,30	1275,37	1097,35	1159,66	1034,19	839,75	893,48	1143,55
Concepción Quezaltepeque	1310,06	1123,22	1501,74	1282,40	1660,25	1938,49	1260,61	1311,63	1294,12	1019,81	1034,12	1339,68
La Laguna	1251,85	1066,72	699,52	1412,88	1520,28	1613,90	1048,78	1437,32	1004,48	954,66	1171,47	1198,35
Suchitoto	1296,11	1020,18	1239,43	1343,21	1328,86	1721,92	960,31	1256,51	935,28	998,29	1137,22	1203,39

Anexo 4. Cálculos utilizados en la elaboración del ráster del factor K

Tabla 8. Parámetros de campo utilizados para el cálculo del Factor K

Sitio de Muestreo	Materia Orgánica		Estructura		Permeabilidad		Granulometría		
	% de M.O	Clasificación FAO	Descripción	Valor índice	(cm/h)	Clasificación FAO			
							% Limo	% Arcilla	% Arena
SITIO 1	3.31	<i>Medio</i>	<i>Granular fina</i>	2	0.48	<i>Lenta</i>	18	62.72	19.28
SITIO 2	1.1	<i>Bajo</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	0.35	<i>Lenta</i>	20.72	56.72	22.56
SITIO 3	4.83	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	0.41	<i>Lenta</i>	18.36	52.72	28.92
SITIO 4	3.59	<i>Medio</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	0.3	<i>Lenta</i>	24.72	52.72	22.56
SITIO 5	5.24	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	5.08	<i>Moderada</i>	18.72	54.72	26.56
SITIO 6	4.28	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	0.51	<i>Moderadamente lenta</i>	22.72	58.72	18.56
SITIO 7	4.14	<i>Alto</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	2.86	<i>Moderada</i>	16.72	64.72	18.56
SITIO 8	6.35	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	0.72	<i>Moderadamente lenta</i>	18.72	55.28	26
SITIO 9	2.9	<i>Medio</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	1.97	<i>Moderadamente lenta</i>	17.08	58.6	24.32
SITIO 10	5.11	<i>Alto</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	1.36	<i>Moderadamente lenta</i>	18.72	56.96	24.32
SITIO 11	4.55	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	63.52	<i>Muy rápida</i>	18	53.68	28.32
SITIO 12	1.79	<i>Bajo</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	0.35	<i>Lenta</i>	6.36	67.68	25.96
SITIO 13	3.86	<i>Medio</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	0.61	<i>Moderadamente lenta</i>	16.72	56.96	26.32
SITIO 14	3.59	<i>Medio</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	2.67	<i>Moderada</i>	14.72	60.96	24.32
SITIO 15	5.24	<i>Alto</i>	<i>Bloque laminar masiva</i>	4	1.9	<i>Moderadamente lenta</i>	19.36	52.68	27.96
SITIO 16	5.52	<i>Alto</i>	<i>Granular gruesa</i>	3	7.2	<i>Moderadamente rápida</i>	18.72	59.68	21.6

* A partir de estos valores y utilizando la ecuación 3 se generó la tabla 11, la cual contiene los valores de K utilizado para la elaboración del ráster.

Tabla 9. Parámetros y valores K obtenidos a partir de la tabla 10

SITIO	(12-%OM)	(%MS+%VFS) ¹	(100-%CL) ²	M ³	Índice de estructura*	Índice de Permeabilidad*	K
Sitio 1	8.69	80.72	80.72	6515.72	2	5	0.46
sitio 2	10.90	77.44	77.44	5996.95	4	5	0.58
Sitio 3	7.17	71.08	71.08	5052.37	4	5	0.37
Sitio 4	8.41	77.44	77.44	5996.95	3	5	0.44
Sitio 5	6.76	73.44	73.44	5393.43	4	2	0.29
Sitio 6	7.72	81.44	81.44	6632.47	4	4	0.46
Sitio 7	7.86	81.44	81.44	6632.47	3	2	0.38
Sitio 8	5.65	74.00	74.00	5476.00	4	4	0.31
Sitio 9	9.10	75.68	75.68	5727.46	3	4	0.43
Sitio 10	6.89	75.68	75.68	5727.46	3	4	0.34
Sitio 11	7.45	71.68	71.68	5138.02	4	1	0.28
Sitio 12	10.21	74.04	74.04	5481.92	3	5	0.47
Sitio 13	8.14	73.68	73.68	5428.74	3	4	0.37
Sitio 14	8.41	75.68	75.68	5727.46	4	2	0.38
Sitio 15	6.76	72.04	72.04	5189.76	4	4	0.33
Sitio 16	6.48	78.40	78.40	6146.56	3	1	0.27

¹ %MS representa el porcentaje de partículas de limo y %VFS las de arena.

² %CL se refiere a las partículas de arcilla.

³ $M=(\%MS + \%VFS)*(100 - \%CL)$

* Son valores que corresponden al rango de valores calculados de estructura y permeabilidad.

Anexo 5 “Propuesta de especies forestales para la reforestación de la cuenca alta del río Tamulasco, Chalatenango”.