



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos, (ERIS)

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA SU GESTIÓN
EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PIXCAYÁ**

Ing. Manuel Fernando Luna Lemus

Asesorado por el MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, mayo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA SU GESTIÓN
EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PIXCAYÁ**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. MANUEL FERNANDO LUNA LEMUS

ASESORADO POR EL MSc. ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*)

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS DE RECURSOS
HIDRÁULICOS OPCIÓN GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS**

GUATEMALA, MAYO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Elfego Orozco Fuentes
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Matías Gil
EXAMINADOR	MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentamos a su consideración nuestro trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA SU GESTIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PIXCAYÁ

Tema que nos fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS, en septiembre de 2014.



Ing. Manuel Fernando Luna Lemus
mfluna12@gmail.com
201390192



Guatemala, 23 de febrero de 2015

Ing. M.Sc. Elfego Odvin Orozco Fuentes
Maestría en Ciencias en Recursos Hidráulicos
Escuela Regional de Ingeniería y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

Ing. Orozco:

Habiendo revisado el documento titulado: "ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA SU GESTIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PIXCAYÁ", elaborado por el Ingeniero Manuel Fernando Luna Lemus, como parte de su Estudio Especial y como requisito para optar al Grado Académico de Maestro en Ciencias en Recursos Hidráulicos, Opción Gestión Integrada de Recursos Hídricos, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me suscribo de usted,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador Control Académico, ERIS



Guatemala, 25 de febrero de 2015

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, el trabajo de Estudio Especial titulado:

Estimación de la erosión hídrica para su gestión en la parte alta de la cuenca del río Pixcayá

presentado por el estudiante,

Ingeniero Agrónomo Manuel Fernando Luna Lemus

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Telfax (502) 2418 9124

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfego Orozco
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, 07 de Marzo de 2016

Ingeniero Pedro Saravia
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravia:

Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en Ciencias de Recursos Hidráulicos, Opción Gestión Integrada de Recursos Hídricos, con el título: **Estimación de la erosión hídrica para su gestión en la parte al de la cuenca del río Pixcayá** del estudiante ingeniero **Manuel Fernando Luna Lemus (carné: 100021066)** .

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,



(f) y sello

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Rosa Amelia González Domínguez".

Licda. Rosa Amelia González Domínguez
Unidad de Lingüística
Facultad de Ingeniería



El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los siguientes profesionales: MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes, MSc. Ing. Joram Gil, MSc. Ing. Elfego Orozco; así como el visto bueno del coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos MSc. Ing. Elfego Orozco, y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Rosa Amelia González Domínguez colegiada No.5284 al trabajo del estudiante Ingeniero Manuel Fernando Luna Lemus, titulado:

Estimación de la erosión hídrica para su gestión en la parte alta de la cuenca del río Pixcayá

En representación de la comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 28 de mayo de 2015

IMPRÍMASE

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Msc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

Director

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

ACTO QUE DEDICO A:

Mi amada esposa e hijos

Guille y a mis dos tesoros, Fernanda María y José Gerardo, por el tiempo que me dieron con amor y paciencia para culminar esta iniciativa.

Manuel Fernando Luna Lemus

AGRADECIMIENTOS A:

ERIS

Por todo el apoyo de los catedráticos de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

EMPAGUA

Personal de EMPAGUA, tanto de los operadores de la presa El Tesoro, Planta Lo de Coy y Laboratorio Unificado de Agua Dra. Alva Tabarini.

Asesores

Los revisores del presente trabajo, por las observaciones y sugerencias realizadas durante el proceso, lo cual ha permitido culminar la investigación, con una creciente mayor al enfoque original y esperando aportar información útil para los tomadores de decisión. Especialmente quiero agradecer por tan buenas sugerencias de sumar al alcance original, el análisis de la producción de sedimentos a nivel de cuenca haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IXI
OBJETIVOS	XI
HIPÓTESIS	XII
INTRODUCCIÓN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
HIPÓTESIS	XVI
ANTECEDENTES.....	XVIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Límite permisible de erosión	2
1.2. Modelos para estimar la erosión hídrica	4
1.3. USLE	6
1.4. Factor de erosividad de las lluvias R	7
1.5. Factor de erodabilidad del suelo K.....	9
1.6. Factor de longitud de la pendiente L y gradiente de la pendiente factor S.....	10
1.7. Factor de cobertura por manejo de los cultivos C	11
1.8. Factor de prácticas de conservación P	12
1.9. Ecuación universal modificada para la estimación de erosión (sedimentos)	12
1.10. Clasificación de la erosión	13
2. METODOLOGÍA	15
2.1. Experiencias de uso de SIG para modelar la erosión hídrica... 15	

2.2.	Revisión de estudios de erosión hídrica realizados en Guatemala	16
2.3.	Recopilación y análisis de información para modelar erosión hídrica.....	16
2.4.	Reconocimiento de campo	18
2.5.	Modelar la erosión utilizando la ecuación universal de la pérdida de suelo y comparación con el límite permisible de pérdida de suelo.....	18
2.6.	Redacción del informe final	19
2.7.	Análisis estadístico.....	19
3.	ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA	21
3.1.1.	Factor R	22
3.1.2.	Factor K.....	22
3.1.3.	Factor LS.....	23
3.1.4.	Factor C	24
3.2.	Estimación de factores hidrológicos para la estimación de caudales (Q ,qp).....	27
3.3.	Descripción biofísica y socioeconómica de la microcuenca del río Pixcayá.....	27
3.3.1.	Ubicación y delimitación del área de estudio	27
3.4.	Clima.....	31
3.5.	Precipitación pluvial.....	34
3.6.	Temperatura.....	35
3.7.	Evapotranspiración potencia	36
3.8.	Geología	38
3.9.	Geomorfología	38
3.10.	Suelos.....	42
3.11.	Capacidad de uso de la tierra.....	44

3.12.	Taxonomía de suelos	47
3.13.	Hidrografía.....	49
3.14.	Uso y cobertura de la tierra.....	50
3.15.	Vegetación y características bióticas	53
3.16.	Aspectos Socioeconómicos relevantes de la cuenca del río Pixcayá.....	57
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
4.1.	Factor K erorabilidad del suelo	64
4.2.	Factor LS longitud y gradiente de la pendiente (adimensional)	66
4.3.	Factor C del cultivo	68
4.4.	Erosión potencial en la cuenca del río Pixcayá, método USLE	70
4.5.	Límite permisible de erosión	76
4.6.	Producción de sedimentos en la cuenca del río Pixcayá. MUSLE	78
4.7.	Escenarios de manejo de la cuenca	82
4.8.	Consideraciones de la producción de sedimentos y la calidad del agua	87
4.9.	Lineamientos de manejo de la cuenca con fines de reducción de la erosión y la producción de sedimentos	89
4.10.	Descripción de los planes de manejo de la cuenca del río Pixcayá.....	90
4.10.1.	Objetivo.....	90
4.10.2.	Conservación de suelos.....	91
4.11.	Acciones y procesos para la elaboración de un plan de manejo integrado de la cuenca	94
4.11.1.	Liderazgo	94

4.11.2.	Enfoque de hacer acciones a nivel de las parcelas más que la generación de documentos	95
4.11.3.	Organización para la gestión y la implementación ..	95
4.11.4.	Análisis del territorio y definición del plan de manejo	96
4.11.5.	Estrategia de implementación.....	96
4.11.6.	Costos del plan y posibles mecanismos de financiamiento	97
4.11.7.	Institucionalidad, sostenibilidad del plan de gestión y generación de capacidades.....	97
CONCLUSIONES		99
RECOMENDACIONES		101
BIBLIOGRAFÍA		103
APÉNDICE.....		113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Localización de la microcuenca del río Pixcayá	29
2.	Distribución espacial por municipio. Microcuenca del río Pixcayá.	30
3.	Clasificación climática de Thornthwaite, cuenca del río Pixcayá	33
4.	Precipitación interanual (mm), estación meteorológica Balanyá (1990-2013)	34
5.	Análisis mensual de la precipitación (mm), valores medios (mediana, cuartil 1 y cuartil 3), y valores extremos y mínimos máxiestación meteorológica Balanyá (1990-2013)	35
6.	Temperatura media mensual, máxima y mínima. Estación meteorológica Balanyá (1990-2013).....	36
7.	Evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves. Estación meteorológica Balanyá (1990-2013)	37
8.	Mapa de geomorfología de la cuenca del río Pixcayá	41
9.	Mapa hipsométrico de la cuenca del río Pixcayá.....	43
10.	Mapa de profundidad, pendiente y capacidad de uso de la tierra	46
11.	Clasificación de suelos de la cuenca del río Pixcayá a nivel de orden.....	48
12.	Mapa de uso de la tierra en la microcuenca del río Pixcayá.....	52
13.	Zonas de vida presentes en la cuenca del río Pixcayá	55
14.	Dinámica de la cobertura forestal años 2006-2010. Microcuenca del río Pixcayá	56
15.	Distribución de la población etárea	58
16.	Proyecciones de población. Cuenca del río Pixcayá	58

17.	Erosividad de la lluvia Factor R. Cuenca del río Pixcayá	63
18.	Distribución espacial de la erorabilidad, factor K. Cuenca del río Pixcayá.....	65
19.	Distribución espacial del factor LS. Cuenca del río Pixcayá	67
20.	Distribución del factor C. Cuenca del río Pixcayá	69
21.	Distribución porcentual de la erosión de acuerdo a la clase de erosión.....	70
22.	Distribución de la erosión potencial en la cuenca del río Pixcayá.	72
23.	Distribución porcentual de los tipos de erosión por usos de la tierra	74
24.	Erosión potencial y límite permisible de erosión	76
25.	Distribución espacial del LPE. Cuenca del río Pixcayá	77
26.	Comportamiento mensual de la precipitación y la generación de caudal.....	80
27.	Comportamiento mensual de la precipitación y la generación de sedimentos	81
28.	Comportamiento mensual de los caudales y la generación de sedimentos	81
29.	Comparación de la erosión y producción de sedimentos anual, situación actual escenario 1 y escenario 2 (miles de toneladas por año)	85
30.	Producción mensual de sedimentos, situación actual y escenario 1 y escenario 2	85
31.	Distribución de la erosión potencial de acuerdo a los escenarios de manejo.....	86
32.	Producción diaria de sedimentos estimados en la presa El Tesoro, en miles	87
33.	Valores de nutrientes en sedimentos. (Planta de tratamiento Lo de Coy).....	88

34.	Priorización de microcuencas para reducción de sedimentación en la cuenca del río Pixcayá	93
-----	---	----

TABLAS

I.	LPE en T*ha-1* año-1, basados en profundidad de suelo y material parental.....	3
II.	Modelos para estimar erosión hídrica.....	5
III.	Clasificación de los niveles de erosión	13
IV.	Grado de erosión en función de la pérdida anual de suelo.....	14
V.	Valores para el factor P.....	24
VI.	Factor de vegetación (factor C)	25
VII.	Municipios que comporten la microcuenca del río Pixcayá.....	28
VIII.	Promedio de variables climáticas de la estación Balanyá, 1990 a 2013	32
IX.	Geomorfología de la cuenca del río Pixcayá	39
X.	Distribución de la profundidad de los suelos en la cuenca del río Pixcayá	42
XI.	Distribución de las categorías de pendiente de suelos de acuerdo a INAB	44
XII.	Clasificación de tierras por capacidad de uso. Metodología INAB.....	45
XIII.	Suelos presentes en la cuenca del río Pixcayá a nivel de subgrupo	47
XIV.	Características morfométricas de la cuenca del río Pixcayá.....	49
XV.	Distribución del uso del tierra por microcuenca (hectáreas)	51
XVI.	Dinámica de la cobertura forestal 2006-2010 (hectáreas)	54
XVII.	Distribución de la población por municipio. Cuenca del río Pixcayá	57
XVIII.	Características de la población por microcuenca	59
XIX.	Principales actividades de la PEA, por ramas de la actividad.....	60

XX.	Valores de erosividad de la lluvia por microcuenca. Cuenca del río Pixcayá.....	61
XXI.	Valor ponderado de la erorabilidad por microcuenca. $[(\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}) * (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})]$	64
XXII.	Valor ponderado del factor LS por microcuenca	66
XXIII.	Valor ponderado del factor C por microcuenca (adimensional).....	68
XXIV.	Distribución de la erosión por microcuenca, media, desviación estándar y volumen de suelo erosionado en $\text{T} \cdot \text{Ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$	71
XXV.	Erosión potencial por uso de la tierra.....	74
XXVI.	Valores ponderados generados para cada microcuenca	78
XXVII.	Producción de sedimentos por microcuenca	79
XXVIII.	Factores que se consideraron en los escenarios	84
XXIX.	Calidad de agua en la presa El Tesoro	89

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Q	Caudal
°C	Grados Celsius
g	Gramo
Ha	Hectárea
hr	Horas
kg	Kilogramo
mm	Milímetro
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
%	Porcentaje
T	Tonelada
V	Volumen

OBJETIVOS

General

Determinar la erosión hídrica anual en la cuenca del río Pixcayá utilizando la ecuación universal de la pérdida de suelo y aplicando herramientas SIG.

Específicos

1. Caracterizar las principales variables físicas, biológicas y socioeconómicas de la cuenca.
2. Determinar las principales variables morfométricas e hidrológicas de la cuenca.
3. Modelar la erosión hídrica potencial utilizando un Sistema de Información Geográfico bajo el escenario actual y con prácticas de conservación en zonas críticas.
4. Proponer un plan de manejo de la cuenca con fines de reducir la erosión hídrica.

HIPÓTESIS

La erosión hídrica media anual en la cuenca del río Pixcayá en el departamento de Chimaltenango, es superior que el límite permisible de erosión –LPE- ($11.2 \text{ T/Ha} \cdot \text{año}^{-1}$).

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural que guarda una estrecha relación con el desarrollo de la humanidad desde tiempos inmemorables. A nivel mundial el recurso suelo está amenazado por procesos de degradación originado por causas biofísicas y prácticas de manejo insostenibles (Nkonya, Gerber, von Braun, & De Pinto, 2011), entre las causas biofísicas se encuentra la topografía que determina el riesgo a la erosión, las condiciones climáticas como la intensidad de la lluvia, el viento y la temperatura. Las prácticas de manejo insostenibles son: la deforestación, degradación de los bosques, minado de nutrientes y desarrollo de cultivos en laderas.

Estudios realizados en Guatemala confirman que los suelos del país, especialmente los ubicados en zonas de ladera, se encuentran en un proceso de franca degradación. IARNA-URL (2009), determinó que solamente en las áreas clasificadas con categoría de sobreutilización, de acuerdo a la capacidad de uso de la tierra, se pierden anualmente 149.5 millones de toneladas de suelo por año.

En la presente investigación se determinó la erosión hídrica en la cuenca del río Pixcayá, la cual forma parte del proyecto Xayá-Pixcayá que abastece de agua potable a los habitantes de la ciudad de Guatemala. Ambas cuencas aportan en promedio 140 mil metros cúbicos diarios para abastecer la ciudad de Guatemala y representa un 39 % del agua que suministra EMPAGUA (Municipalidad de Guatemala, 2014). La cuenca del río Pixcayá tiene un área de 156.059 km² y un perímetro de 64.366 kilómetros, la longitud del cauce principal es de 21.093 kilómetros. Está conformado por dos regiones

fisiográficas: altiplano hidrovulcánico y montaña volcanoerosional. Se encuentran 5 órdenes de suelos, la profundidad media de las 71 unidades de suelos es de 121.2 cm (MAGA, 2010), es decir, clasificados como suelos profundos. El río Pixcayá, además pertenece a la cuenca del río Motagua que drena al mar Caribe.

La determinación de la erosión hídrica se realizó empleando la ecuación universal de la pérdida de suelo, aplicando herramientas SIG que permitan modelar el comportamiento de la erosión a nivel de unidades espaciales mínimas (celda de 90*90 metros) en diferentes años y bajo diferentes escenarios de prácticas de uso y conservación de suelos.

Se estimó la erosión potencial de la cuenca bajo las condiciones actuales y considerando posibles escenarios de manejo (prácticas de conservación de suelos, principalmente), para determinar el comportamiento de la erosión ante posibles mejoras en el manejo de las tierras en la cuenca. Bajo los escenarios de manejo se puede terminar que, las prácticas de conservación de suelos tienen el mayor efecto en la reducción de la erosión y, especialmente, en la producción de sedimentos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la planta de tratamiento de agua potable Lo de Coy, actualmente se enfrenta el problema de la alta carga de sedimentos que tiene el agua, especialmente, después de un período de lluvias intensas, lo cual dificulta y encarece el tratamiento del agua para el abastecimiento de la ciudad de Guatemala. El problema de los sedimentos se encuentra directamente relacionado con la erosión de la cuenca. En la presa El Tesoro se estima que la producción de sedimentos pudiera estar en el orden de 50 a 100 mg/L cuando se tienen eventos de lluvia. Por lo tanto, con la presente investigación se pretende identificar las áreas en las que se produce la mayor erosión para poder plantear medidas para reducirla, y a la vez se minimice la carga de sedimentos que llegan a la planta de potabilización de agua Lo de Coy, propiedad de EMPAGUA.

La carga de sedimentos presentes en el agua tienen implicaciones en el detrimento de la calidad del agua, no solamente por los aspectos físicos propiamente (en cuanto al incremento de la masa sólida), sino que, principalmente debido al incremento de sustancias químicas asociadas a las partículas coloidales. De acuerdo con Ongley, 1997, la contaminación provocada por sedimentos tiene dos dimensiones, una física que implica la pérdida de suelo arable y las repercusiones ecológicas en las aguas receptoras al verse reducidos varios procesos naturales, como la fotosíntesis al disminuir la luz; y por otro lado, la dimensión química la cual es provocada, principalmente, por las partículas de limo y arcilla que son transmisoras primarias de productos químicos adsorbidos, especialmente fósforo, plaguicidas y la mayor parte de los metales pesados.

HIPÓTESIS

La erosión hídrica media anual en la cuenca del río Pixcayá en el departamento de Chimaltenango, es superior que el límite permisible de erosión –LPE- ($11.2 \text{ T/Ha} \cdot \text{año}^{-1}$).

ANTECEDENTES

El suelo es un recurso natural importante para la vida del hombre, existiendo una estrecha relación de dependencia entre ambos. Sirve de soporte para un número importante de actividades productivas en diferentes sectores como: la producción de alimentos, emplazamientos industriales y el desarrollo habitacional. También tiene funciones productivas directas en actividades primarias como la agricultura, ganadería y silvicultura.

El uso del recurso, sin considerar su sostenibilidad, conlleva a la degradación por diferentes causas, generalmente la principal forma de degradación del suelo es la erosión. De acuerdo con Suárez, 1980, la erosión es un proceso de arrastre del suelo por acción del agua o del viento; o como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de partículas de suelo causados por el agua y el viento.

En general, se reconocen dos tipos de erosión: la geológica o natural, la cual se produce sin la intervención de la acción del hombre (fuera de control) y la antrópica o acelerada, en la cual, el hombre ha intervenido al eliminar la vegetación natural protectora e introducir usos del suelo en donde se rompe el equilibrio natural; favoreciendo la acción erosiva del agua y el viento, especialmente en zonas de ladera y sitios con alta pendiente en donde se ha eliminado la vegetación natural (León, 2001).

De acuerdo con el agente causal, la erosión puede ser dividida en glacial, hídrica y por el viento. A continuación se describen los factores que controlan y regulan la erosión hídrica.

La lluvia o precipitación es considerada la principal fuente de agua sobre el terreno, su comportamiento se determina por características como: cantidad, intensidad y frecuencia; estas dos últimas características son las que tienen una mayor incidencia en la pérdida de suelo (León, 2001).

En un ejercicio realizado para determinar la erosión hídrica potencial en las tierras, que de acuerdo al mapa de intensidad de uso de la tierra se encuentran en la categoría de sobreutilizadas, obtuvieron los resultados siguientes: la erosión media fue de 91 toneladas por hectárea por año; cubriendo una superficie de 16,424 kilómetros cuadrados (equivalente al 15 % de territorio nacional), el volumen total del suelo perdido, equivale a 149.5 millones de toneladas anuales (IARNA-URL, 2009). Aplicando el valor de 2.75 quetzales por tonelada de suelo perdido, que es el valor económico que se asumió para la pérdida por tonelada de suelo durante la tormenta tropical Stan. la CEPAL, Comisión Económica para América Latina y SEGEPLAN (2005); se tiene una pérdida económica anual de 411 millones de quetzales anuales. Aunque los valores empleados para este análisis son conservadores, se puede inferir que la pérdida económica por la erosión hídrica de suelos en Guatemala, necesariamente hace reflexionar sobre las implicaciones que tendrá esto a largo plazo para la economía nacional y a la sociedad guatemalteca en su conjunto.

En Guatemala se han hecho estudios para determinar la erosión, principalmente mediante metodologías de terreno. Los estudios realizados, utilizando metodologías en donde se haya aplicado herramientas de Sistemas de Información Geográfica a nivel de cuenca, son más limitados, posiblemente debido a la falta de información básica que permita realizar las modelaciones. Uno de los primeros estudios realizados, utilizando el programa IDRISI y ERDAS, fue Arana (1992), quien en su tesis de maestría realizada en la cuenca

del río Pensativo (localizada en el departamento de Sacatepéquez), determinó que los valores de erosión media de la cuenca son de $39.87 \text{ T*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$, en este ejercicio se aplicó la ecuación universal de la pérdida de suelo.

En la cuenca del río Chixoy, Tobías (2013), cita el trabajo realizado por (González, 1994), quién aplicando Sistemas de Información Geográfico, estimó la erosión hídrica en dos subcuencas prioritarias del río Chixoy (Pacaranat y Serchil), con valores de erosión potencial de 4.6 a $136.9 \text{ T*ha}^{-1}\text{* año}^{-1}$, en este estudio se aplicaron herramientas de IDRISI.

En la cuenca del río Itzapa, en el municipio del mismo nombre del departamento de Chimaltenango, Motta (1999), realizó una investigación para determinar la erosión hídrica, los resultados indican que en áreas con pendientes entre 25 y 40 % con cultivo de hortalizas (coliflor), la erosión hídrica presentó valores de 31.63 a $66.04 \text{ T*ha}^{-1}\text{* año}^{-1}$.

Argueta (2010) realizó un estudio en la cuenca del río Negro localizada entre los municipios de San Andrés Itzapa y Parramos, del departamento de Chimaltenango, se compararon tres métodos indirectos para estimar la erosión; (i) metodología propuesta por Almorox (ii) metodología de evaluación de la erosión del suelo –LEAM- y (iii) Ecuación Universal de Pérdida de Suelo -USLE-, los resultados obtenidos, aunque similares muestran una coincidencia solo del 9 % de los valores para los mismos sitios, se determinó que la principal fuente de variación es la cobertura vegetal.

Aplicando dos metodologías directas para determinación los diferentes tipos de erosión por medio de observación de campo (Quiñónez, 2012), en la cuenca del río Torja en el municipio de Camotán del departamento de Chiquimula, determinó que en parcelas con cultivo de maíz se tuvo una pérdida

de suelo de 21,8 toneladas por hectárea en un período de 28 días, también encontró que el factor de mayor efecto estadístico en la disminución de la erosión es la presencia de mulch en el suelo.

1. MARCO TEÓRICO

La erosión es el conjunto de procesos en la superficie de la corteza terrestre que producen pérdida física del subsuelo cultivable en grado variable. Ocurre naturalmente por la fuerza de la gravedad en zonas de montaña o cuando el suelo es expuesto a la acción del viento o del agua. Sin embargo, el principal agente causal de la erosión de los suelos es el hombre, al dejar los suelos expuestos para el desarrollo de actividades agrícolas (León, 2001).

Según Morgan (2009), la erosión del suelo tiene dos fases consistente en la separación de las partículas individuales de la masa de suelo y su transporte por la acción de los agentes erosivos como el viento y la lluvia. Cuando la energía no es suficiente para transportar las partículas, ocurre la tercera fase deposición.

La erosión hídrica, de acuerdo con Cisneros et al., 2012, es el proceso por medio del cual se produce el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes:

- La energía cinética de la gota de lluvia: se disipa en el suelo produciendo la ruptura de los agregados y generando una salpicadura (erosión por salpicadura), con partículas de suelo que, posteriormente son arrastradas pendiente abajo.
- La escorrentía en movimiento: este agente erosivo produce el desprendimiento de nuevo suelo y transporta el suelo removido, la magnitud es proporcional a la velocidad del flujo sobre la superficie. Se

distinguen dos tipos de flujos: laminar (erosión laminar) que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos).

- La gravedad: la sola acción de la gravedad con suelos saturados puede provocar el desprendimiento de suelo. La fuerza de la gravedad provoca que las partículas de suelo y la escorrentía puedan desplazarse a una mayor velocidad, desprendiendo y transportando una mayor cantidad de suelo.

1.1. Límite permisible de erosión

La tasa permisible o tolerable de erosión –LPE- resulta compleja de medir y en el tiempo su definición ha sido variable, pasando por diferentes enfoques soportados por la fertilidad de los suelos, en su profundidad; o en consideraciones económicas (León, SF). Wischmeier and Smith (1978), Definen el concepto de la tolerancia de pérdida de suelo como: Máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económica e indefinidamente.

Diferentes estudios han encontrado diferentes valores de pérdida permisible de suelo, la cual se encuentra aproximadamente en $11 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Johnson, 1987), dicho valor presenta una proximidad a la formación del horizonte bajo condiciones óptimas. Esta cifra de acuerdo con (Morgan, 2009), podría ser muy pequeña para las zonas en las cuales se tienen valores naturalmente altos de pérdida de suelo, especialmente en las regiones montañosas con alta precipitación, correspondiente a las condiciones generales de América Tropical (León, SF).

El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos de America propuso unos LPE, el cual se basa en la profundidad del suelo y el origen del material parental; estos límites deben considerarse con reserva, ya que no han sido validadas otras regiones (Loredo-Osti, Beltran, Moreno, & Casiano, 2009). Dicha información puede servir de base para compararse con la erosión actual y determinar las acciones que son necesarias tomar para lograr la sostenibilidad del recurso.

Tabla I. **LPE en T*ha-1* año-1, basados en profundidad de suelo y material parental**

Profundidad del suelo (cm)	Material parental	LPE (T*ha⁻¹* año⁻¹)
> 100	Rocoso	11,2
>100	Arena o grava	11,2
50-100	Rocoso	9,0
50-100	Arena o grava	9,0
25-50	Rocoso	4,5
25-50	Arena o grava	6,7
10-50	Lecho arcilloso	6,7
< 25	Lecho rocoso	2,2
< 25	Arena o grava	4,5
< 10	Lecho arcilloso	4,5

Fuente: LOREDO-OSTI. *Riesgo a la erosión y proyección de acciones del suelo*. 2009. p. 32.

En el marco del manejo y gestión de cuencas hidrográficas, la consideración de los recursos suelo y agua para su conservación y manejo, requiere de conocimiento de las relaciones entre los factores que causan la pérdida de suelo y las alternativas o medidas de acción necesarias para reducir dicha pérdida. Según León, (2001), la pérdida de suelo se ve agravada por la acción del hombre a través de las explotaciones forestales desordenadas, obras civiles sin consideraciones ambientales, minería descontrolada y de las actividades agrícolas sin considerar los criterios de conservación de suelos y aguas.

1.2. Modelos para estimar la erosión hídrica

Existe una amplia gama de modelos para la estimación de la erosión hídrica desarrollados en un siglo de investigación del tema, los cuales varían en términos de la información requerida los procesos que realizan para generar una estimación. En términos generales, los modelos se pueden clasificar en tres grupos: conceptuales, empíricos y de base física.

- Los modelos empíricos corresponden al análisis de la observación y la caracterización de las respuestas de los datos tomados. Estos requieren comúnmente menor cantidad de datos. La mayoría de modelos se basan en análisis estocásticos de los datos recolectados en las cuencas hidrográficas (Merritt, Letcher, & Jakeman, 2003), citado por Villa, 2012. Son usados para hacer análisis preliminares, sin embargo, son un poco cuestionados por utilizar información poco realista.
- Los modelos conceptuales se basan, normalmente en la representación de una cuenca y los procesos que ocurren a lo interno de esta. Estos, generalmente, aunque incluyen los procesos en la cuenca, no consideran las interacciones de estos procesos entre sí.
- Los modelos físicos se basan en la solución de las ecuaciones fundamentales que describen el proceso físico de los caudales y los sedimentos, así como la generación de los nutrientes en una cuenca determinada. Estos usan, normalmente, las ecuaciones de conservación de la masa y momentun para el flujo, así como las ecuaciones de conservación de la masa de sedimento (Bennett, 1974), citado por Villa, 2012.

- Los modelos de base física son derivados de condiciones puntuales, generalmente a escala de parcela, se basan en recopilación de datos espaciales y temporales, sin embargo, es muy común que en la práctica se usen datos de fuentes puntuales (Merritt et al., 2003), citado por Villa, 2012.
- En la tabla II se presentan algunos de los principales modelos empleados para la estimación de la erosión. Algunos de estos ahora tienen la ventaja de poderse integrar a Sistemas de Información Geográfica, lo que permite su aplicación espacial a un nivel de detalle y posteriormente la integración de la información para su evaluación a nivel de cuenca. Entre los modelos de base física se encuentra la ecuación universal de la pérdida de suelo, utilizado en el desarrollo de la presente investigación.

Tabla II. **Modelos para estimar erosión hídrica**

Tabla 3-1: Modelos para estimar la erosión hídrica, Ref: Merritt et al., 2003

Nombre	Tipo	Escala	Entradas / Salidas	Referencia
GUEST	Físico	Parcela	Input: Alto Output: Escorrentía, concentración	Yu et al. (1997) Rose et al. (1997)
LISEM	Físico	Cuenca Pequeña	Input: Alto Output: Escorrentía, Tasa Sedimentos	Takken et al. (1999) De Roo and Jetten (1999)
PERFECT	Físico	Campo	Input: Alto Output: Escorrentía, erosión, tasa cultivo	Littleboy et al. (1992b)
SEDNET	Empírico/ Conceptual	Cuenca	Input: Moderado Output: sedimentos suspendidos, contribución relativa del flujo sobre superficie y procesos erosivos en bancas y barrancos	Prosser et al. (2001c)
TOPOG	Físico	Ladera	Input: Alto Output: Acumulación de agua, riesgo de erosión, transporte de solutos	CSIRO Land and Water, TOPOG and Davey (1991)
USLE	Empírico	Ladera	Input: Alta Output: Erosión	Wischmeier and Smith (1978)
WEPP	Físico	Ladera / Cuenca	Input: Alta Output: Escorrentía, características de la pérdida de sedimento	Laffan et al. (1991)
INTEGRAL	Empírico	Cuenca	Input: Alta Output: Erosión Relativa	Integral S.A. (1988)

Fuente: Merritt et al. *Estudio de la erosión hídrica del suelo* 2003. p.110.

1.3. USLE

La ecuación universal de pérdida de suelos (–EUPS–), también conocida como USLE, por sus siglas en inglés, fue desarrollada por el Servicio de conservación de suelos (SCS) de Estados Unidos en la década de 1950. La USLE se desarrolló a partir de datos experimentales de más de 8 000 parcelas distribuidas en el territorio de Estados Unidos, combina diferentes condiciones climáticas, de suelo, pendiente y sistemas de uso del suelo y manejo (Wischmeier & Smith, 1978).

La ecuación básica del modelo USLE es la siguiente:

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

Donde:

- A = pérdida de suelo por unidad de superficie y tiempo, expresado en ($T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
- R = factor de erosividad de la lluvia ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$)
- K = factor de erorabilidad del suelo [$(Mg \cdot ha^{-1}) \cdot (MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1})$]
- LS = factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional)
- C = factor de cobertura (adimensional)
- P = prácticas de conservación del suelo (adimensional)

La ecuación USLE, de acuerdo con kirby y Morgan, (1984), citado por Cisneros et al., (2012) puede ser utilizada en las siguientes situaciones:

- Estimar la pérdida anual promedio de suelo de una pendiente, o un campo con condiciones específicas de uso y manejo de la tierra.

- Apoyar la toma de decisiones en la selección de sistema de uso y manejo, y de prácticas de conservación para condiciones específicas de suelos y pendientes.
- Estimar el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en el uso o de las técnicas de conservación sobre una situación dada.
- Determinar cómo puede aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un uso más intensivo de las tierras, manteniendo una pérdida de suelo tolerable.
- Estimar las pérdidas de suelo en áreas con usos distintos al agrícola.

La USLE, de acuerdo a Rojas, SF, León, (2001) presenta limitaciones para su aplicación en países de América Latina, principalmente debido a la falta de información. El factor de erosividad de la lluvia es el que presenta las mayores dificultades para su estimación.

A continuación se analizan cada uno de los factores que conforman la USLE, indicando métodos para su estimación y la forma en la que fueron adaptados para la investigación.

1.4. Factor de erosividad de las lluvias R

El factor R representa la erosividad de la precipitación pluvial, que se define como la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión. Es una función de dos características de las lluvias intensas: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos.

Debido a la dificultad de contar con suficiente información de la intensidad de las lluvias, diversos autores han propuesto formas alternativas para estimar de R; uno de los primeros fue Fournier, (1960); de la cual se derivan varias metodologías, una de ellas es la propuesta por Arnoldus, Boodt, & Gabriels, (1980), quienes plantean la correlación del índice de Fournier (IF), en que se consideran no solo la precipitación mensual del mes con la mayor precipitación, sino también, la del resto de los meses. Este índice modificado de Fournier (IFM) caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula con la ecuación que se presenta a continuación.

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde:

- IFM: índice de Fournier modificado en mm
- P_i : precipitación del mes i en mm
- P : precipitación acumulada anual en mm

Una de las modificaciones propuestas al índice de Fournier lo constituye la propuesta de Morais (1991), el cual se basa en la erosión de la lluvia a escala mensual. Lombardi Neto & Moldenhauer, (1992), proponen valores generales a los coeficientes de la ecuación de Morais, la cual se expresa de la manera siguiente:

$$R_m = \Psi IF^\theta$$

Donde:

- R_m = erosividad mensual

- $\Psi = 68,73$
- $\emptyset = 0,814$

La aplicación de los coeficientes propuestos por Lombardi Neto & Moldenhauer, (1992) han sido realizados en zonas tropicales de varias regiones del mundo logrando buenos resultados (Medina, 2009).

1.5. Factor de erodabilidad del suelo K

La erodabilidad del suelo es su vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión expresada en unidades de pérdida de suelo (t/ha) por cada punto de R ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). El principio es cada tipo de suelo se erosiona de manera diferente, manteniendo constantes los demás factores. Los suelos con alto contenido de arcilla tienen bajos valores K, cerca de 0,05 a 0,15, por su resistencia al desprendimiento de las partículas de suelo. Los suelos con texturas gruesas, como los arenosos, tienen bajos valores desde 0,05 hasta 0,2; suelos con texturas media como los francos, tienen un valor moderado de k, cerca de 0,25 a 0,4, ya que son susceptibles a la erosión.

Existen diferentes métodos para calcular el factor K, el primero es el propuesto por Wischmeier & Smith (1978), el cual se calcula en función de 4 variables: porcentaje de limo más arena fina, porcentaje de arena, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad. Otra metodología para estimar el factor K es la propuesta por Williams (1990), citada por Flores, Martínez, Operaza, Saens & González (2003), a continuación se presenta la ecuación:

$$K = \left[0.2 + 0.3 \cdot e^{-0.0256 \cdot SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right)} \right] \cdot \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \cdot \left(1 - \frac{0.25 \cdot C}{C + e^{(3.72 - 2.95 \cdot C)}} \right) \cdot \left(1 - \frac{0.7 \cdot SN1}{SN1 + e^{(-5.51 + 22.9 \cdot SN1)}} \right)$$

Donde:

- SAN = porcentaje de área
- SIL = porcentaje de arcilla
- C = porcentaje de carbono orgánico
- SN1 = 1 –(SAN/100)

También existen métodos simplificados basados en la textura del suelo y la proporción de materia orgánica.

1.6. Factor de longitud de la pendiente L y gradiente de la pendiente Factor S

La longitud de la pendiente representa la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie de suelo, hasta el punto en donde disminuye la pendiente, o hasta el punto en el que el escurrimiento entra en un canal definido.

El gradiente de la pendiente se expresa como el porcentaje de la pendiente. La USLE integra los valores de la longitud y el gradiente de la pendiente como uno solo LS.

L es el factor de longitud de la pendiente que representa el efecto que esta variable tiene en la erosión y es adimensional. Es la razón entre la pérdida de suelo de la longitud real y la longitud de una parcela de 22,1 metros en el mismo suelo y gradiente. En términos generales, la erosión no es muy sensitiva a la longitud de la pendiente, especialmente en terrenos con paisajes planos.

S es el grado de inclinación de la pendiente. Está comprobado que la pérdida de suelo se incrementa con pendientes muy escarpadas. Los valores L y S se presentan juntos y cuando tienen una longitud de 22,1 y una inclinación del 9 % el valor es 1. Este es uno de los factores muy complejos de calcular a nivel de cuenca, si se realiza por medio de comprobaciones de campo, sin embargo, aplicando SIG, este se puede estimar con buen nivel de detalle.

1.7. Factor de cobertura por manejo de los cultivos C

El factor de manejo de cultivos C representa la relación de la pérdida de suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura, con la pérdida de suelo a partir de un estado de barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial. Cuando se combinan condiciones de suelos desnudos y cultivos a favor de la pendiente se tiene el valor máximo de C, que es igual a 1. Este factor, también considera el efecto de las copas y rastrojos, la secuencia del tipo de cultivos, entre otros.

En la revisión de la ecuación universal de la pérdida de suelo (Renard, Foster, Weesies, McCool & Yoder, 1997), incluyen cuatro subfactores para la estimación del factor C, siendo estos: uso previo del suelo, cobertura aérea, cobertura del suelo, rugosidad de la superficie, humedad del suelo; todos tienen valores entre 0 y 1, indicando que no hay pérdida de suelo hasta una alta

pérdida de suelo. Así, por ejemplo, cuando se tiene un suelo cubierto con concreto hidráulico, el valor de C es 0.

Se han desarrollado diferentes estudios en varios países para incorporar valores de cultivos y condiciones específicas de cada región. Recientemente en la cuenca del río Birrís, en Costa Rica, Lianes, Marchamalo, and Soriano (2009), realizó un estudio para determinar este factor de la USLE. Esta cuenca presenta condiciones similares a las que se tienen en la cuenca del río Pixcayá, en cuanto a clima y ocupación del territorio.

1.8. Factor de prácticas de conservación P

El factor de prácticas de conservación de suelos y control de la erosión indica la proporción de suelo perdido aún después de contar con una determinada práctica, por lo tanto, las prácticas de conservación de suelo tienen un nivel de efectividad limitado, de acuerdo a la efectividad de la medida que se implemente.

1.9. Ecuación universal modificada para la estimación de erosión (sedimentos)

El modelo de predicción de sedimentos basado en la ecuación universal de pérdida de suelo cambia el factor R por los factores de (Q X qp). Esta ecuación puede ser utilizada para estimar la producción de sedimentos diaria, mensual y anual; Williams and Berndt, (1976), citado por Williams, (1977). La ecuación es expresada como:

$$Y = 11,8(Q * q_p)^{0.56} K L S C P$$

Donde:

- Y = sedimentos aportados a una sección del cauce para una tormenta determinada sobre la cuenca.
- Q = escurrimiento medio
- q_w = escurrimiento máximo
- K = erosividad del suelo
- L = longitud de la pendiente
- S = grado de la pendiente
- C = cobertura vegetal
- P = práctica mecánica de control de la erosión

1.10. Clasificación de la erosión

Para tener una calificación del grado de erosión al que está expuesto un territorio se han empleado diferentes criterios de clasificación, entre los que se pueden mencionar: la clasificación efectuada por CENICAFE (1975). Sin embargo, una de las más utilizadas por diferentes autores es la establecida por: FAO, PNUMA, & UNESCO (1980). En la tabla III se presentan los valores empleados bajo este criterio.

Tabla III. Clasificación de los niveles de erosión

Niveles de erosión	Valor en $T*Ha^{-1}año^{-1}$
Leve	0-10
Moderada	11 - 50
Fuerte	51-200
Muy fuerte	Mayor a 200

Fuente: FAO. *metodología provisional para evaluación de degradación de suelos* (1980). 85 p.

Tabla IV. **Grado de erosión en función de la pérdida anual de suelo**

Grado de erosión	T *ha⁻¹	Espesor en mm (suponiendo una densidad de 1 gr*cm⁻³)
Natural	<1,0	< 1
Baja	1,0 -3,0	0,1 - 0,3
Media	3,0 - 5,0	0,3 - 0,5
Alta	5,0 -10,0	0,5 - 1,0
Muy alta	10,0 -20,0	1,0 - 2,0
Severa	20,0 30,0	2,0 - 3,0
Muy severa	>30	>30

Fuente: CENICAFE, 1975.

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en etapas sucesivas, en las cuales se profundizó en el conocimiento y la comprensión del fenómeno de la erosión hídrica y de las diferentes técnicas para analizarlo, utilizando un Sistema de Información Geográfico. A continuación se describen las etapas que comprendieron la investigación.

2.1. Experiencias de uso de SIG para modelar la erosión hídrica

Los sistemas de información geográfica constituyen un conjunto de herramientas que permiten realizar análisis espacial de diferentes fenómenos que ocurren dentro de un espacio geográfico determinado. Sin la ayuda de estas herramientas es complejo realizar estimaciones a un nivel de territorio más amplio, como por ejemplo, a nivel de una cuenca hidrográfica. Se identificaron estudios realizados en diferentes partes del mundo en donde se aplicó la herramienta SIG para la estimación de la erosión, en este sentido se priorizaron estudios recientes realizados en la región de latinoamericana. Se analizaron las técnicas, los métodos y, sobre todo, las fuentes de información empleadas, ya que especialistas en la materia manifiestan que en países como Guatemala se tiene limitantes de información para realizar análisis como la aplicación de la USLE.

La información analizada y considerada útil se sistematizó en el software especializado en el manejo de información bibliográfica EndNote 6.0.

2.2. Revisión de estudios de erosión hídrica realizados en Guatemala

Se procedió a identificar los estudios de erosión hídrica realizados en el país, priorizando a los que tuvieran relación directa con los objetivos de la presente investigación, en cuanto a zona de estudio, metodología utilizada, coberturas del suelo consideradas, entre otros. Además, se realizó una investigación bibliográfica de reportes nacionales en donde se considera el problema de la erosión hídrica, para ello se buscó información en centros de investigación, universidades, instituciones del Estado relacionadas con el tema, entre los que se encuentran el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) y el Instituto Nacional de Bosques (INAB), Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La revisión y análisis de la información se realizó en marzo y abril del 2014, considerando que la mayoría de información recientemente se encuentra digitalizada y disponible con bases de datos en línea. La información fue organizada y sistematizada.

2.3. Recopilación y análisis de información para modelar erosión hídrica

En la presente investigación se planteó la utilización de la ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE), (Wischmeier & Smith, 1978). La USLE considera los siguientes factores: erosividad de la lluvia factor (L), erodabilidad del suelo factor (K), factor de longitud y gradiente de la pendiente (LS), cobertura del suelo factor (C) y prácticas de conservación de suelos factor (P).

El factor de erosividad de la lluvia se estimó por medio de la ecuación propuesta por Lombardi Neto and Moldenhauer (1992), la cual toma la

información del índice modificado de Fournier Arnoldus, et al. (1980). Para la estimación de dicho índice se usó los mapas raster de lluvia mensual y anual de la República de Guatemala facilitados por el Instituto de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología, (Insivumeh) 2014.

El factor K se calculó por medio de la metodología propuesta por el Programa de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), & UNEP (1980), ya que para el departamento de Chimaltenango se cuenta con el estudio semidetallado de los suelos que publicó el MAGA y en el cual se tuvo el apoyo del Instituto Agustín Codazzi de Colombia (MAGA, 2010), en el cual se estimaron una serie de variables relacionadas con el recurso suelo a nivel de unidades de suelo que facilitaron dicho análisis.

El factor LR se estimó utilizando el modelo de elevación digital (DEM), generado por el MAGA para la República de Guatemala, se aplicó la metodología propuesta por Desmet & Govers, (1996), citado por Velásquez (2008).

La cobertura del terreno: factor (C) se realizó con base en el mapa de cobertura y uso de la tierra del MAGA (2006), en el cual se tiene la cobertura actualizada al 2003. Los factores a emplear son los propuestos por Lianes et al. (2009), en un estudio realizado en la cuenca del río Birrís en Costa Rica. Las condiciones de la cuenca del río Birrís, en cuanto al origen de los suelos y cultivos que se llevan a cabo coinciden con las condiciones que se tienen en la cuenca del río Pixcayá.

2.4. Reconocimiento de campo

Se hizo un reconocimiento de campo, especialmente en los sitios en donde se tenía duda de los usos de la tierra y de acuerdo con los usos de la tierra, se podrían tener los valores más altos de erosión. Los recorridos se realizaron en vehículos, en sitios específicos apoyados con un GPS para la ubicación exacta.

2.5. Modelar la erosión utilizando la ecuación universal de la pérdida de suelo y comparación con el límite permisible de pérdida de suelo

Se modeló la erosión hídrica usando SIG, aplicando la herramienta de álgebra de mapas del Software Arcgis (ESRI, 2012) y también se realizará la misma estimación usando el software Idrisi Selva (Eastman, 2012). La modelación consistió, en primera instancia, en generar en formato raster cada uno de los factores que emplea la USLE. Posteriormente, utilizando la misma herramienta, se procedió a aplicar la ecuación (USLE), finalmente se obtuvo un mapa en formato raster con los valores de erosión a nivel de celdas. El mapa resultante se clasificó para una mejor interpretación de los resultados de acuerdo a los criterios convencionales de clasificación de los tipos de erosión.

En esta etapa, también se identificaron los sitios en los cuales se tiene los valores de erosión más alto y se determinará el conjunto de factores físicos que determinan dichas consecuencias.

2.6. Redacción del informe final

Se realizó de manera gradual en la medida que se obtenían los resultados y se fue modificando la redacción hasta llegar a la versión del documento final.

Al tener un borrador completo, aprobado por el asesor, y previo a su presentación a la Escuela, fue sometido a una revisión gramatical por parte de un tercero, para reducir la probabilidad de tener errores gramaticales o de uso del idioma español.

2.7. Análisis estadístico

Este consistió en comparar los resultados de erosión potencial estimados con los valores del mapa del límite de erosión permisible, utilizando como unidad de análisis cada una de las unidades de suelo mapeadas y dentro de estas la comparación será a nivel de cada una de las celdas del archivo raster. Se usó el estadístico “t”, para la comparación de media poblacional con muestras pequeñas (William, 2006).

Finalmente, los resultados fueron comparados con el mapa de erosión permisible, que se había generado con base en el material parental y la profundidad de los suelos SCS (1977), citado por Loredó-Ostí et al, (2009). Se realizó un análisis estadístico por medio de la prueba “t” para datos aparejados utilizando el software estadístico STATA 12, StataCorp (2007).

3. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Para estimar la pérdida de suelo y cumplir con el objetivo de la investigación se usó la ecuación universal de pérdidas de suelo (Wischmeier & Smith, 1978) USLE, la cual fue desarrollada con el propósito de estimar la pérdida de suelo promedio anual, usando una relación de factores expresados en la siguiente ecuación.

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

Donde:

- A = pérdida de suelo por unidad de superficie y tiempo, expresado en ($T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)
- R = factor de erosividad de la lluvia ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$)
- K = factor de erorabilidad del suelo [$(Mg \cdot ha^{-1}) \cdot (MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1})$]
- LS = factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional)
- C = factor de cobertura (adimensional)
- P = prácticas de conservación del suelo (adimensional)

La USLE ha sido ampliamente utilizada en muchas regiones del mundo, incluyendo América Latina y en Guatemala, también se ha utilizado. Algunos de los estudios realizados en Guatemala, en donde se ha empleado la USLE, son los siguientes: Arana (1992), Motta, (1999), Argueta (2010), Meléndez (2011), González (1,994), citado por Tobías (2013), este último como parte de su tesis doctoral. A continuación se describen los procedimientos que se siguieron para generar cada uno de los factores que forman la ecuación. Los

estudios anteriores fueron desarrollados, principalmente como parte del trabajo de tesis, no se identificaron estudios realizados por las instituciones de gobierno relacionadas con el tema.

Los factores que conforman la USLE, para la microcuenca del río Pixcayá, fueron estimados de la forma siguiente:

3.1.1. Factor R

Es uno de los factores más importantes que determina el poder de la erosividad de la lluvia y se expresa el promedio anual de la energía y la intensidad de la lluvia, para su cálculo se requiere análisis de intensidades de lluvia y contar con registros de información pluviométrica, en el caso de la presente investigación solamente se cuenta con información pluviométrica en la estación Balanyá. El factor R estimó por medio de la combinación de dos métodos: el índice modificado de Fournier propuesto por Arnoldus et al. (1980), y el índice, también basado en Fournier, establecido por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992), para zonas tropicales.

3.1.2. Factor K

En la USLE, el factor K es el factor de la erorabilidad del suelo que representa la susceptibilidad del suelo a le erosión. Para la estimación de este factor se utilizará la función propuesta por Williams (1990), ya que para todo el departamento de Chimaltenango se cuenta con estudio reciente de los suelos (MAGA, 2010), y la microcuenca del río Pixcayá, se encuentra en el departamento de Chimaltenango.

3.1.3. Factor LS

El cálculo del factor de la longitud y gradiente de la pendiente ha sido uno de los más complicados de estimar para áreas a nivel de cuenca, ya que la USLE, fue desarrollada a nivel de parcelas. Con la ayuda de los sistemas de información geográfica y los modelos digitales de terreno DEM, es factible modelar esta información a nivel de celdas y, por consiguiente, obtener información que sin la ayuda de estas herramientas sería muy difícil de cuantificar. Se utilizó el DEM de país, el cual tiene una resolución 15 metros por pixel (MAGA, 2007). Para la estimación de este parámetro se siguió la metodología propuesta por Desmet & Govers (1996), citado por Velásquez (2008), empleando las ecuaciones siguientes:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

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

Donde:

- $A_{(i,j)}[m]$ = área aportadora unitaria de un pixel (celda)
- D = tamaño del pixel
- X = factor de corrección

El factor S: el ángulo β se toma como el ángulo medio en la dirección de mayor pendiente

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

3.1.4. Factor C

Representa los efectos de las plantas, la cobertura de suelo, la biomasa del suelo y las actividades disturbadoras del suelo en los procesos de erosión. Para la utilización de los valores de C se utilizó la información generada por Lianes et al. (2009), ya que ambas áreas de estudio tienen condiciones similares en cuanto al uso de la tierra, origen de los suelos y topografía (tabla V).

Tabla V. Valores para el factor P

Práctica mecánica	Valor de P
Surcado al contorno	0,75
Surcos rectos	0,80
Fajas en contorno	0,60
Terrazas (2-7% de pendiente)	0,50
Terrazas (7-13 % de pendiente)	0,60
Terrazas (mayor de 13 %)	0,80
Terrazas de banco	0,10
Surcado líster	0,50
Ripper	0,60
Terrazas de zing	0,10

Fuente: Wischmeier & Smith, 1978. p. 82.

Tabla VI. Factor de vegetación (factor C)

Cobertura	Factor C Mora 1987	FAO 1989	ICE 1999	Saborio 2002 Gómez 2002 CATIE 2003	Marchamalo 2004, 2007	Lianes 2009
Bosque						
Bosque primario						
Bosque natural						
Selva virgen						
Bosque denso	0,0001					0,003
Bosque claro, subestrato herbáceo denso		0,003 0,001				
Bosque claro, subestrato herbáceo degradado			0,001-003	0,003-0,010 0,003-0,010 0,010-0,100	0,003	
Bosque secundario	0,018	0,007			0,012	0,037
Charral, pasto						
Charral						
Bosque degradado						
Matorral,/pastos						
Matorral denso						
Matorral claro, subestrato herbáceo denso						
Matorral claro, subestrato herbáceo degradado						
Páramo						
Pasto						
Pasto (natural o mejorado)				0,003-0,030 0,003-0,030 0,030-0,100 0,003-0,040	0,013	
Vegetación natural baja (altura. 50cm)						
Pastizal natural completo		0,009 0,008 0,012	0,01-0,015	0,030-0,010 0,040-0,200 0,003-0,040		0,012 0,013 0,002 0,002 0,016
Pastizal natural pastoreado						
Pastizal cultivado (manejado)						
Pasto de corta						
Potrero normal						
Potrero carga normal						
Potrero degradado						
Potrero muy degrada						

Continuación de la tabla VI.

Cultivos permanentes	0,300					
Café, café con macadamia o pejibaye		0,079 0,09 0,062	0,086		0,080	
Cultivos perennes		0,05				
Café				0,010-0,300		
Banano				0,100-0,450		
Cacao				0,300-0,900		
Cultivos permanentes asociados (densos)						0,003
Cultivos permanentes no densos						
Huertos de subsistencia						
Árboles frutales						
Cultivos anuales	0,050					
Caña, caña brava						
Cultivos anuales		0,495	0,340			
Papa-zanahoria o papa-cebolla		0,615				
Maíz		0,519				
Tomate/chile dulce		0,502				
Caña		0,263			0,050	
Cultivos anuales de ciclo corto(1-6 meses)				0,300-0,800		
Cultivos anuales de ciclo largo (6 meses)				0,400-0,900	0,650	
Cultivos (cobertura baja)					0,500	0,260
Cultivos (cobertura media)					0,400	0,300
Cultivos (cobertura alta)						0,390
Papa-brócoli						0,390
Papa-zanahoria						0,360
Papa-zanahoria-papa						
Papa-papa-brócoli						
Papa-zanahoria-brócoli						

Fuente: Lianes et al. (2009). 7 p.

3.2. Estimación de factores hidrológicos para la estimación de caudales (Q ,qp)

Para la estimación de caudales a nivel de cada microcuenca, se empleó el método de la curva número, (Mockus, 1969). Se estimó el volumen de agua escurrida y el caudal pico, estimando la curva número por medio de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. La curva número se obtuvo como resultado de la interacción del mapa de propiedades hidrológicas de cada unidad de suelos (derivado del mapa de suelos de Chimaltenango) y el mapa de cobertura y uso de la tierra (MAGA, 2006).

3.3. Descripción biofísica y socioeconómica de la microcuenca del río Pixcayá

3.3.1. Ubicación y delimitación del área de estudio

La cuenca del río Pixcayá inicia en el cerro Puculaj en el municipio de Santa Apolonia del departamento de Chimaltenango, a una altura de 2 653 msnm; se localiza en los paralelos 461 801 a 448 718 de latitud norte y los meridianos 1 635 100 a 1 614 830 de longitud oeste (coordenadas GTM). Para la presente investigación, la cuenca de aportación se delimitó al punto de la presa El Tesoro localizada en la coordenada 1 623 351; 461 813 a una altura de 1 740 msnm. La superficie de la cuenca es de 156,059 km² y el perímetro de 64,366 kilómetros. Se encuentra localizada en la región del altiplano central, en el departamento de Chimaltenango y cubre parcialmente los municipios de Tecpán Guatemala, Santa Apolonia, Santa Cruz Balanyá, Patzicía, San Juan Comalapa, Zaragoza, San Andrés Itzapa y Chimaltenango. La población según INE (2003), para el censo del 2002 era de 43 555 habitantes. La población estimada para el 2014 es de 61 524 habitantes. En la cuenca se tienen

identificados 78 centros poblados (INE, 2004). En la figura 1 se puede observar su localización. La distribución del territorio por municipio se observa en la tabla VII y en la figura 2 se observa la distribución espacial de la cuenca con relación a los municipios.

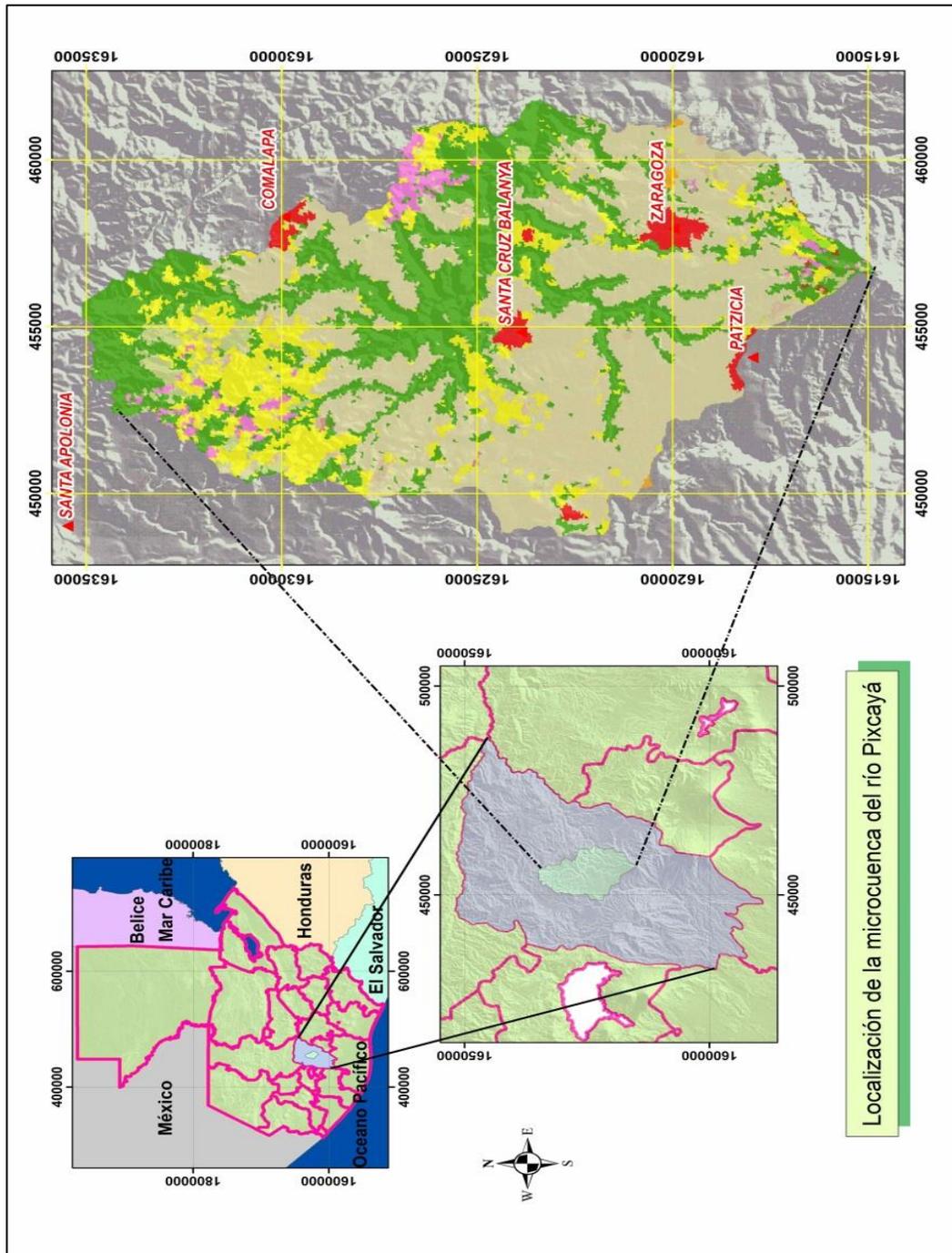
Tabla VII. **Municipios que comporten la microcuenca del río Pixcayá**

Municipio	Área dentro de la cuenca en km²	% de la cuenca
<i>Tecpán Guatemala</i>	15,787	10,12
<i>San Juan Comalapa</i>	48,101	30,82
<i>Chimaltenango</i>	2,192	1,40
<i>Zaragoza</i>	35,150	22,52
<i>Santa Cruz Balanyá</i>	19,799	12,69
<i>Patzicía</i>	25,276	16,20
<i>San Andrés Itzapa</i>	9,755	6,25
Total	156,059	100,00

Fuente: elaboración propia, 2014.

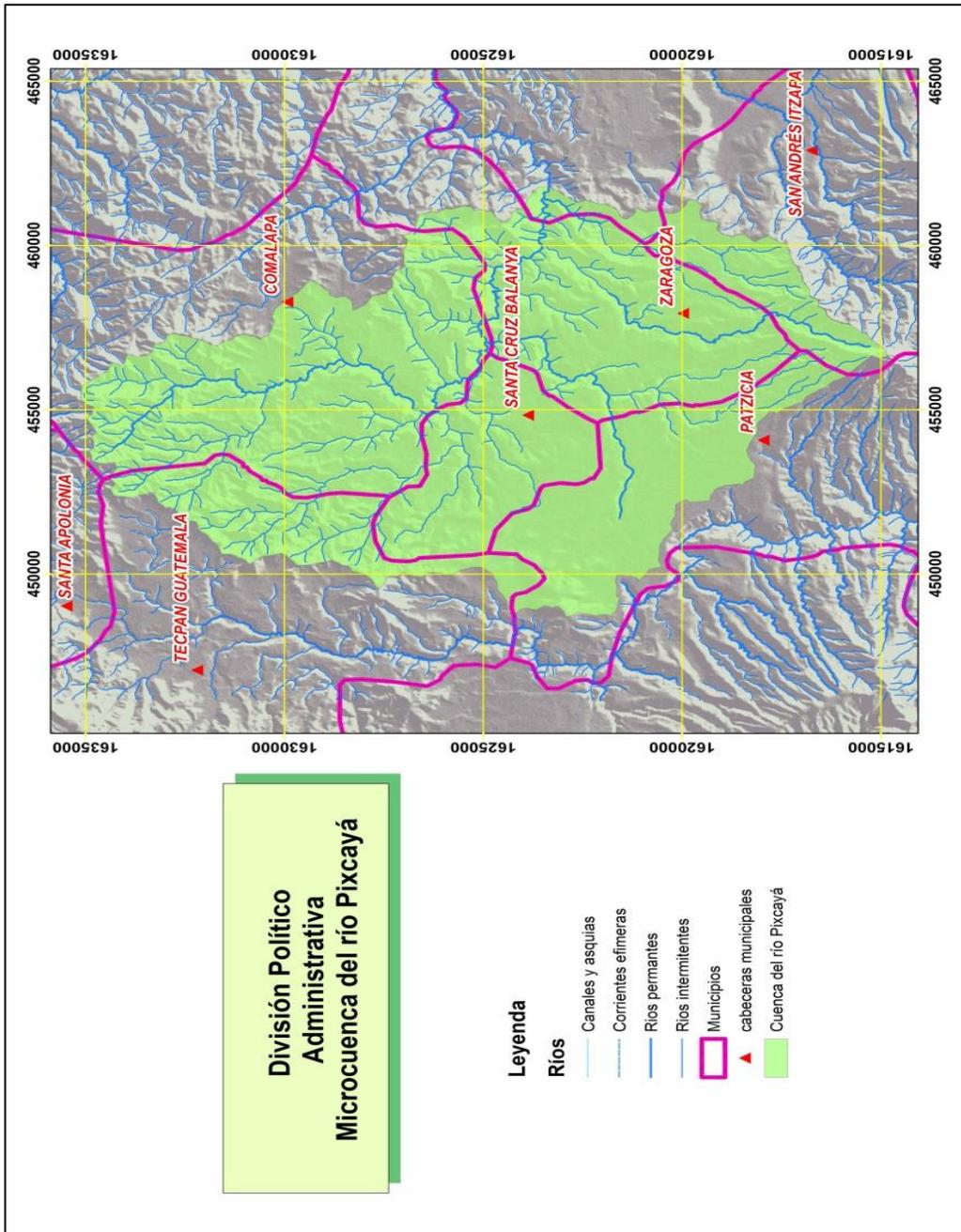
A continuación se presenta un breve caracterización del medio físico, biológico y socioeconómico como una referencia de la cuenca del río Pixcayá.

Figura 1. Localización de la microcuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Distribución espacial por municipio. Microcuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

3.4. Clima

Es el conjunto de condiciones y cambios en la atmósfera que se presentan en una región por un período de al menos 30 años, considerando variables de temperatura, precipitación y humedad relativa entre otras; una de las metodologías utilizada en Guatemala para clasificar zonas climáticas, y de esta manera tener una idea general del comportamiento del clima, es la propuesta por Thornthwaite (1948).

De acuerdo con el mapa de clasificación climática de Thornthwaite para Guatemala (CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, ESPREDE, & MAGA, 2001), la cuenca del río Pixcayá se encuentra localizada en dos regiones climáticas consideradas como BB'2 húmedo templado (145,05 km², 92,95 %), que domina la mayor parte de la cuenca, y BB'3 húmedo semifrío (11 km², 7,5 % del territorio) al noroeste de la cuenca. En la figura 3 se puede observar la distribución espacial de las regiones.

En Guatemala, el Instituto de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) realizó una clasificación climática del territorio de Guatemala para agrupar regiones que presentan condiciones (climáticas) similares, en cuanto al comportamiento de las principales variables que dan origen al clima; de acuerdo a esta clasificación, la cuenca del río Pixcayá se encuentra localizado en la región climática de mesetas y altiplanos. Herrera (2003), define esta zona como una región en donde la precipitación presenta promedios anuales entre 800 y 1 600 mm, la temperatura promedio puede ir de 18 a 8 °C, cubre varios departamentos, incluyendo el de Chimaltenango.

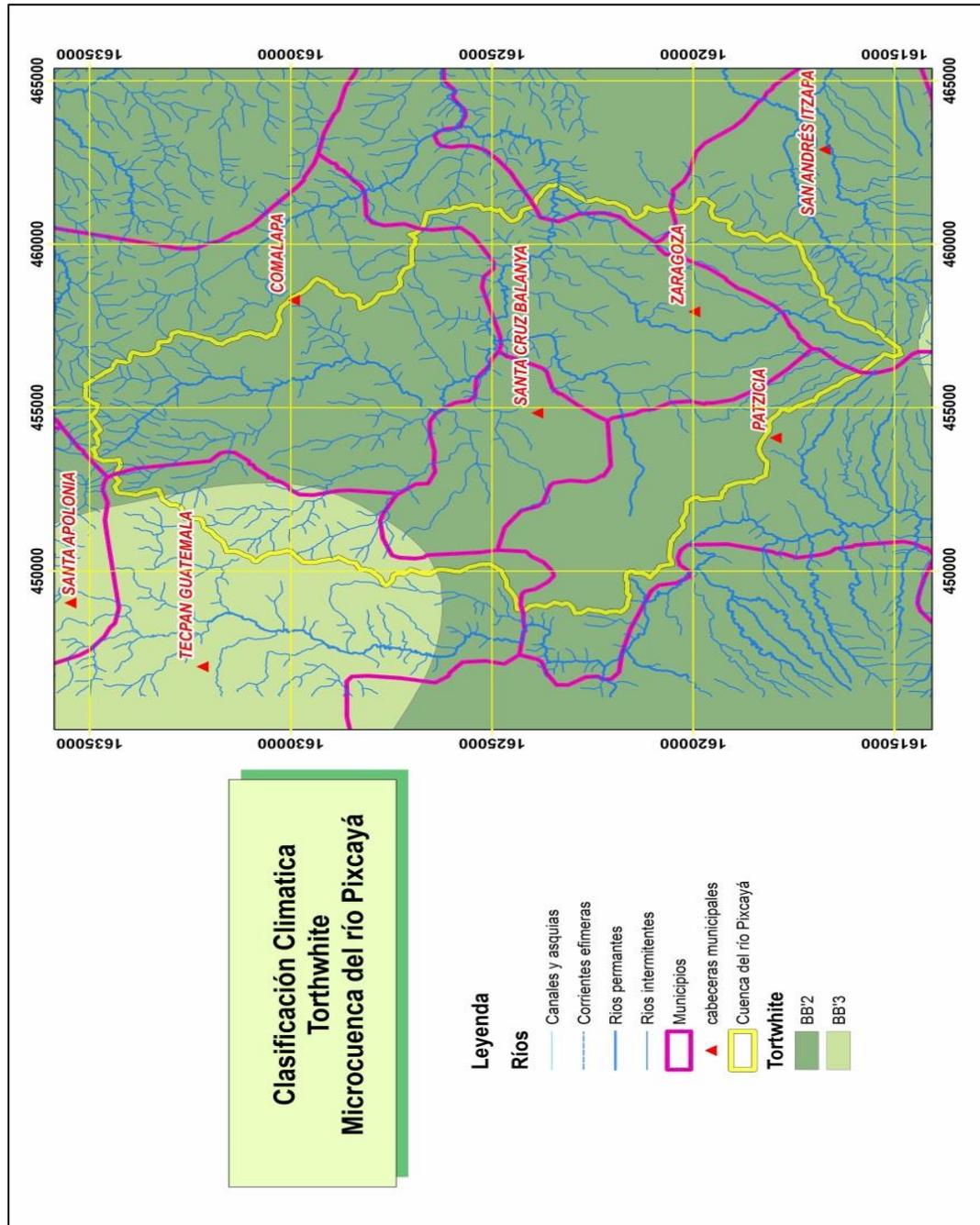
Para el análisis de las variables que intervienen en el clima en la región, como una referencia, se analizó la estación de Balanyá, ya que es una estación que cuenta con registro de más de 30 años y se encuentra dentro de la cuenca. Los datos analizados corresponden al período de 1990 al 2013. La tabla VIII muestra los promedios de las principales variables climáticas.

Tabla VIII. **Promedio de variables climáticas de la estación Balanyá, 1990 a 2013**

Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL
<i>T media en °C</i>	15	16	17	18	18	17	17	17	17	17	16	15	17
<i>T máxima °C</i>	22	23	24	25	23	22	22	23	23	22	21	21	23
<i>T mínima °C</i>	7	7	8	9	11	11	11	11	11	11	9	7	9
<i>T máxima absoluta °C</i>	26	25	27	28	27	25	25	25	25	25	25	25	26
<i>T mínima absoluta °C</i>	7	7	8	9	11	11	11	11	11	11	9	7	9
<i>Humedad relativa °C</i>	75	73	71	73	78	83	82	80	86	85	81	78	79
<i>Lluvia mm</i>	2,0	2,5	7,6	24,5	132,1	209,5	151,4	136,3	200,6	122,2	31,4	9,0	1029,1
<i>Días de lluvia</i>	1	1	2	4	14	20	17	17	20	14	5	2	117

Fuente: elaboración propia. 2014.

Figura 3. Clasificación climática de Thornthwaite, cuenca del río Pixcayá

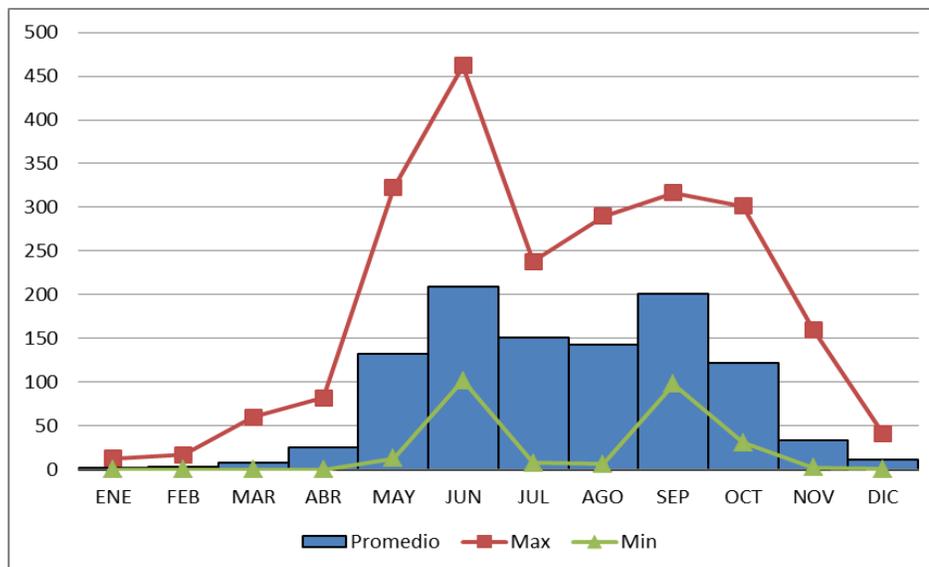


Fuente: elaboración propia.

3.5. Precipitación pluvial

La precipitación media anual para la estación de Balanyá es de 1 029,10 mm, con valores máximos anuales de 1 581,00 mm y mínimos anuales de 648,00 mm. Tiene una precipitación media mensual de 86 mm, con valores máximos de junio a septiembre; la lluvia máxima registrada a nivel mensual, para la serie de datos disponible fue de 462,2 mm de lluvia en junio del 2005.

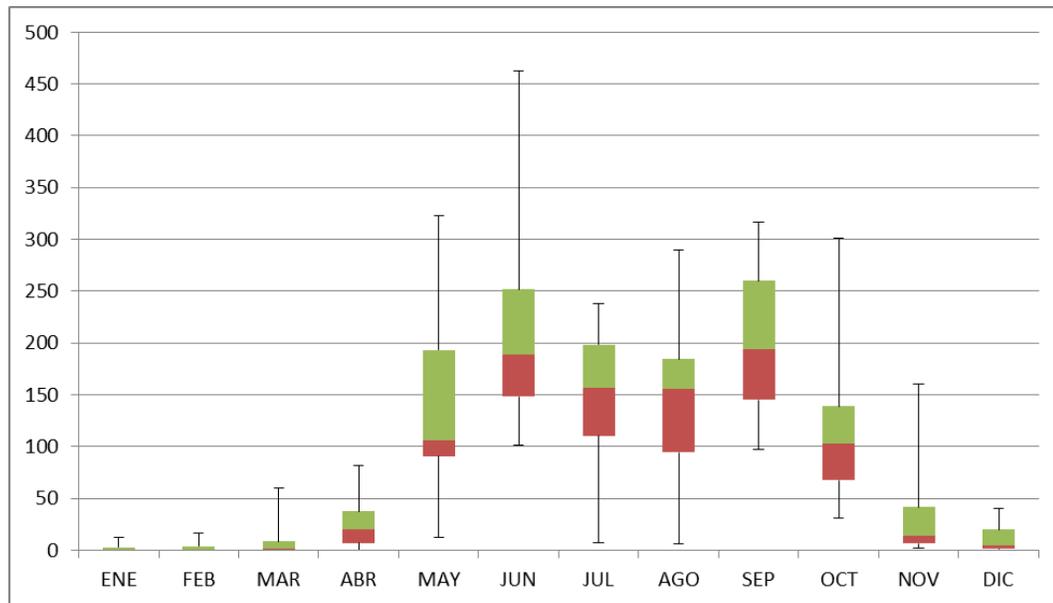
Figura 4. **Precipitación interanual (mm), estación meteorológica Balanyá (1990-2013)**



Fuente: elaboración propia, 2014. Con base en Insivumeh, 2014.

En la figura 4 se observa que los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, presentan un comportamiento de menor lluvia, aún en los años en los que hay precipitación extraordinaria, esta no supera los 100 mm. Se aprecia un marcado descenso de las lluvias entre julio y agosto, lo cual coincide con el período de canícula.

Figura 5. **Análisis mensual de la precipitación (mm), valores medios (mediana, cuartil 1 y cuartil 3), y valores extremos y mínimos máxiestación meteorológica Balanyá (1990-2013)**

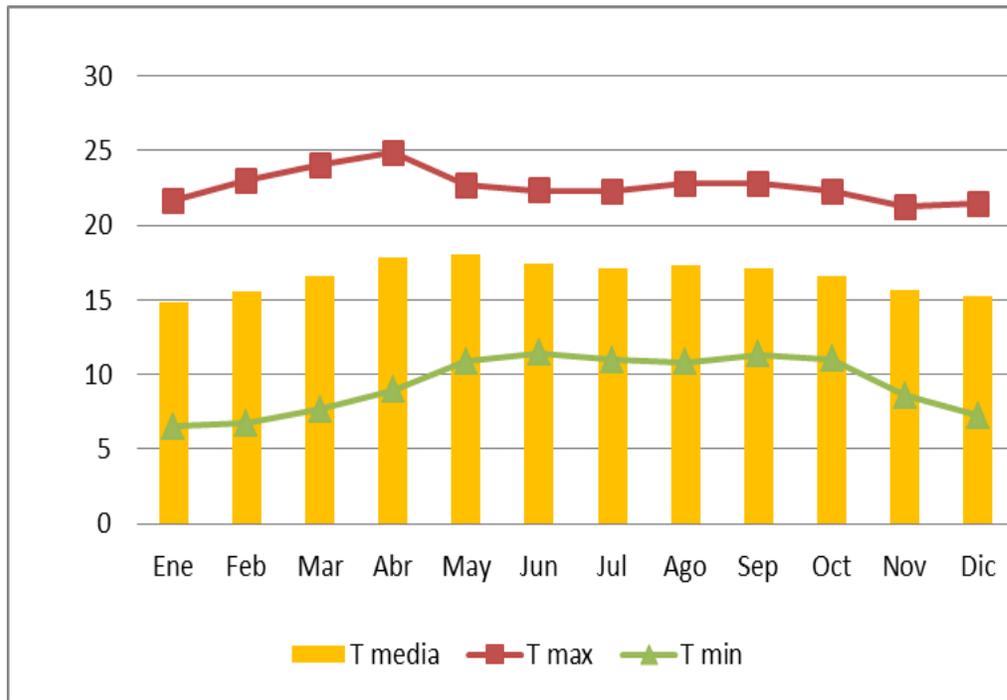


Fuente: elaboración propia, 2014. Con base en Insivumeh, 2014.

3.6. Temperatura

La temperatura media anual en la estación Balanyá es de 17 °C, con una temperatura mínima de 20,2 °C en enero y con temperaturas máximas absolutas de 25 a 27 °C, en marzo y abril.

Figura 6. **Temperatura media mensual, máxima y mínima. Estación meteorológica Balanyá (1990-2013)**



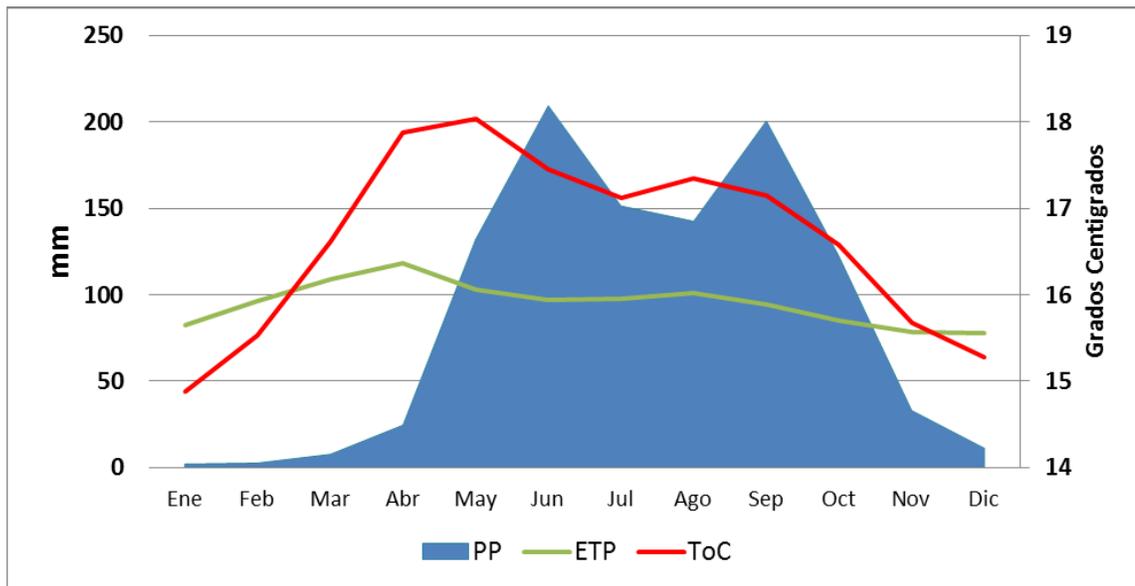
Fuente: elaboración propia.

3.7. Evapotranspiración potencia

La evapotranspiración de la estación meteorológica Balanyá, fue calculada utilizando la fórmula de Hargreaves (Sánchez, 2008), la cual es ampliamente utilizada en Guatemala, requiere para su estimación de los valores de temperatura, radiación solar y precipitación media. La evapotranspiración es el factor de mayor consumo de humedad en la ecuación del balance hídrico, por lo tanto, es un buen indicador del agua disponible para escurrimiento y recargar los acuíferos. La evapotranspiración anual estimada es de 1 140 mm, la media mensual es de 95 mm, la evapotranspiración máxima es de 118 mm en abril, la

mínima evapotranspiración se tiene en diciembre con 78 mm. El balance negativo que se tiene es de 102 mm.

Figura 7. **Evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves. Estación meteorológica Balanyá (1990-2013)**



Fuente: elaboración propia.

En la cuenca del río Pixcayá el clima guarda un patrón muy similar al que se tiene en la estación de Santa Cruz Balanyá, sin embargo, en las partes altas de las montañas con mayores alturas se tiene precipitaciones más altas y temperaturas más frías, especialmente las mínimas absolutas, por lo tanto, el balance hídrico a nivel de toda la cuenca tiende a ser positivo.

3.8. Geología

En la cuenca del río Pixcayá se identifican dos unidades geológicas dominantes, siendo estas: los flujos piroclásticos conformado por pómez del cuaternario y las tobas del terciario.

Pómez del cuaternario (Qp): las planicies localizadas en la cuenca que conforman un altiplano volcánico, fueron creadas a partir de pómez que inundaron las partes bajas y/o relleno de los valles a partir de material piroclástico que se erosionó de los cerros cercanos. La mayoría de los pómez se originó en la erupción de la caldera que creó el lago de Atitlán. Los cañones de esta región se han formado por la erosión hídrica desde ese momento (MAGA, 2010).

Tobas del terciario (Tv): conocidas como materiales volcánicos del terciario y tienen su origen en la actividad volcánica del complejo de volcanes de Atitlán.

En general, ambas unidades dan origen a suelos con características adecuadas para la agricultura y propiedades hidráulicas propicias para la circulación de agua. La cuenca, la mayor parte del año funciona como efluente y tiene un alto potencial para el aprovechamiento de las aguas subterráneas (Rosales, 2005).

3.9. Geomorfología

El relieve de la superficie terrestre es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas creadoras de las elevaciones (montañas y cordilleras) y fuerzas exógenas que moldean las primeras como la meteorización-erosión

transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008). El mapa geomorfológico es la representación gráfica y precisa de las diferentes formas del relieve en un paisaje determinado, por lo tanto, resulta de mucha importancia su delineación para el análisis de aspectos ambientales en general, y físicos en particular, como por ejemplo: el análisis de cuencas, estudios de suelos, planificación territorial, entre otros. Serrato (2009), Zinck (2012), Martín (1997).

En Guatemala, a nivel de país se cuenta con un mapa general de fisiografía y geomorfología (Alvarado & Herrera, 2001), aunque representa un esfuerzo importante por conocer la geomorfología, su aplicación se limita para estudios a escala regional, ya que fue elaborado a escala 1:250,000.

Tabla IX. **Geomorfología de la cuenca del río Pixcayá**

Paisaje	Tipo de relieve	Forma del Terreno	Hectáreas	%
Altiplano hidrovolcánico	Cañon	Ladera	2687,84	17,22
	Lomas	Ladera	230,61	1,48
	Terraza	Plano de terraza	6166,83	39,52
	Vallecito	Plano aluvio coluvial	47,59	0,30
	Sub total		9132,87	58,52
Montaña volcanoerosional	Cañon	Ladera	145,77	0,93
	Filas y vigas	Ladera	3669,19	23,51
	Glacis	Plano inclinado	248,04	1,59
	Lomas	Ladera	2410,09	15,44
	Subtotal		6473,09	41,48
Total			15605,96	100,00

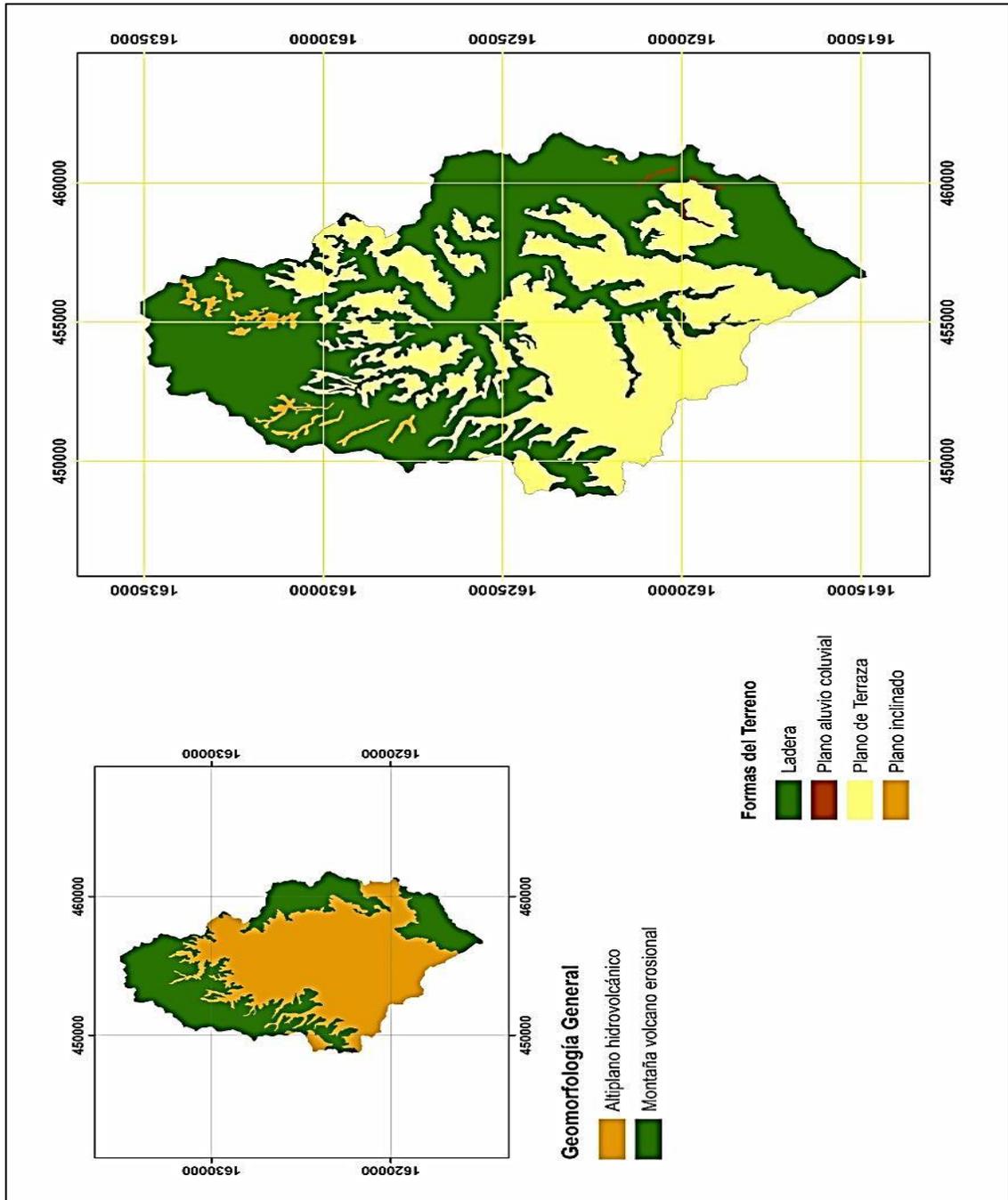
Fuente: elaboración propia.

La cuenca del río Pixcayá se encuentra conformada por dos paisajes geomorfológicos: el altiplano hidrovulcánico, que cubre el 58,52 % de la cuenca y el paisaje conformado por montaña volcanoerosional que cubre el 41,48 % (MAGA, 2010). El relieve se encuentra dominado por terrazas en un 39,52 % seguido de laderas en un 43,5 %. La distribución espacial de las unidades geomorfológicas por paisaje y forma del terreno, se pueden observar en la figura 8.

La cuenca del río Pixcayá presenta un gradiente altitudinal de 898 metros, ya que la parte más alta se encuentra localizada a 2 656 msnm y la más baja a 1 756 msnm. La altura con la mayor frecuencia es de m 2 115 msnm, y la altura media es de 2 100 msnm.

La cuenca, a pesar de estar localizada en el altiplano de Guatemala, presenta un moderado cambio altitudinal, con motañas que se encuentran sobre la meseta y los cañones en los puntos en donde corren los ríos.

Figura 8. Mapa de geomorfología de la cuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia

3.10. Suelos

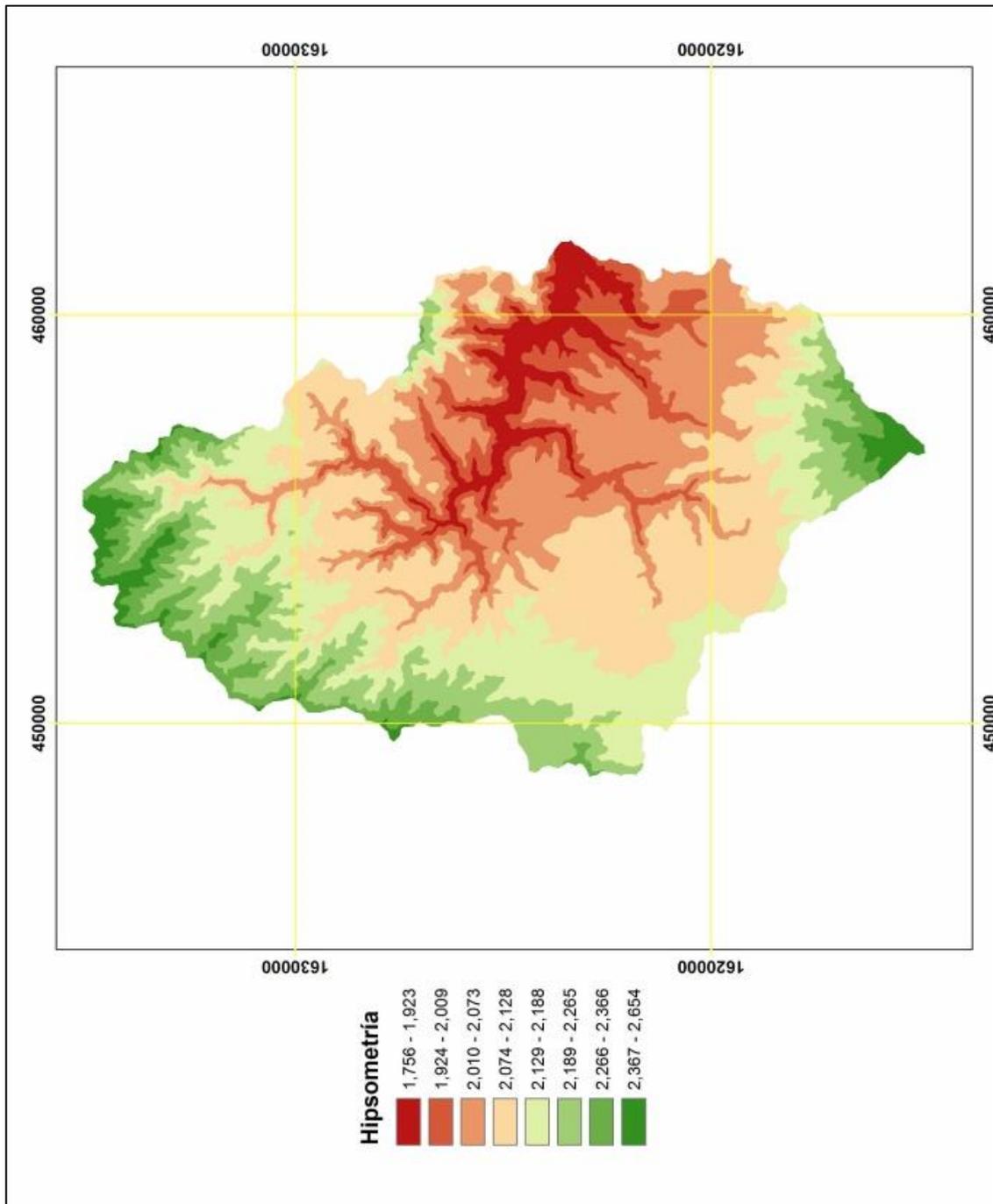
Los suelos en la cuenca del río Pixcayá son relativamente profundos, ya que las unidades analizadas el 81,9 % de los suelos tiene más de noventa centímetros profundidad. El 39,3 % de los suelos presenta una pendiente menor al 12 %, lo cual hace que la zona presente una alta vocación a la agricultura, los suelos con más del 55 % de pendiente corresponde al 11,2 % de la superficie de la cuenca (tabla X).

Tabla X. **Distribución de la profundidad de los suelos en la cuenca del río Pixcayá**

<i>Profundidad cm</i>	<i>Ha</i>	<i>%</i>	<i>% acumulado</i>
30	2 432,7	15,6	15,6
50	145,80	0,9	16,5
51	1,2	0,0	16,5
62	168,0	1,1	17,6
90	72,6	0,5	18,1
105	1 321,3	8,5	26,5
107	230,6	1,5	28,0
115	2 165,9	13,9	41,9
120	281,9	1,8	43,7
122	966,8	6,2	49,9
130	1 565,2	10,0	59,9
140	1 487,4	9,5	69,5
150	4 766,6	30,5	100,0
	15 605,9	100,0	

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Mapa hipsométrico de la cuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Distribución de las categorías de pendiente de suelos de acuerdo a INAB**

Categoría	Ha	%
<12	6 127,3	39,3
12-26	3 088,5	19,8
26-36	1 748,6	11,2
36-55	2 876,4	18,4
>55	1 753,0	11,2
<i>Total</i>	<i>15 605,9</i>	<i>100,0</i>

Fuente: elaboración propia.

3.11. Capacidad de uso de la tierra

Para el análisis de la capacidad de uso de la tierra se siguió la metodología oficial para Guatemala de clasificación de tierras por capacidad de uso (INAB, 1997). La metodología de INAB, requiere de dos variables fundamentales, siendo estas la profundidad del suelo, para lo cual se empleó la información generada por MAGA, (2010), para la pendiente se procedió a generar un mapa de pendientes utilizando el modelo de elevación digital DEM de 20 metros (MAGA, 2007).

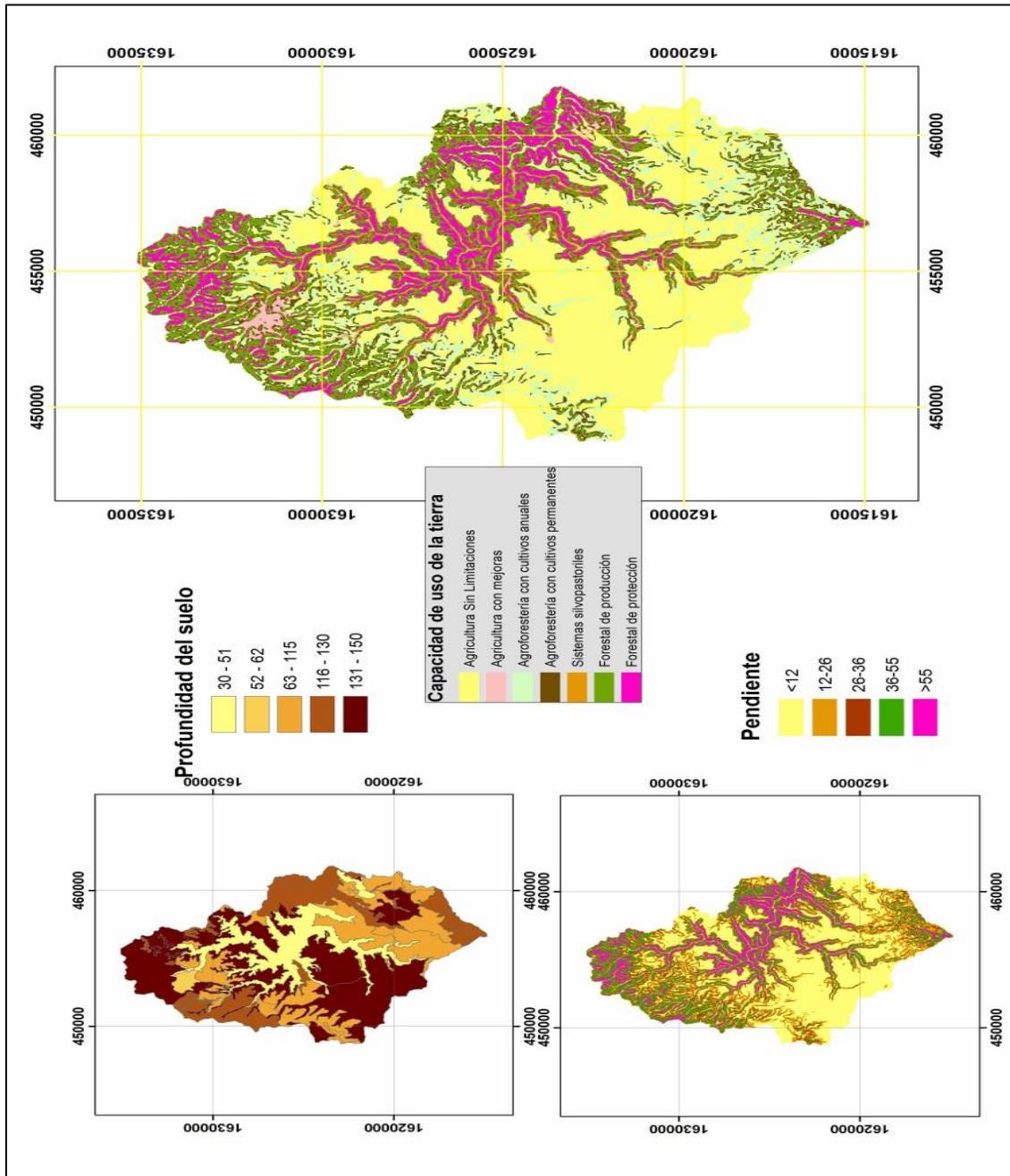
Se realizó una reclasificación de pendientes para las tierras altas volcánicas y con herramientas de intersección de mapas (profundidad y pendientes), se procedió identificar las categorías de capacidad de uso de la tierra. En la tabla XII se pueden observar las categorías de capacidad de uso de la tierra, en donde se observa un balance entre el potencial agrícola 40 % y forestal 30 %.

Tabla XII. **Clasificación de tierras por capacidad de uso. Metodología INAB**

<i>Categoría</i>	<i>Ha</i>	<i>%</i>
<i>Agricultura con mejoras</i>	340,63	2,2
<i>Agricultura sin limitaciones</i>	5 897,90	37,8
<i>Agroforestería con cultivos anuales</i>	2 650,69	17,0
<i>Agroforestería con cultivos permanentes</i>	1 748,60	11,2
<i>Sistemas silvopastoriles</i>	326,62	2,1
<i>Forestal de producción</i>	2 876,39	18,4
<i>Forestal de protección</i>	1 763,95	11,3
<i>Total</i>	15 605,90	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Mapa de profundidad, pendiente y capacidad de uso de la tierra



Fuente: elaboración propia, 2014.

3.12. Taxonomía de suelos

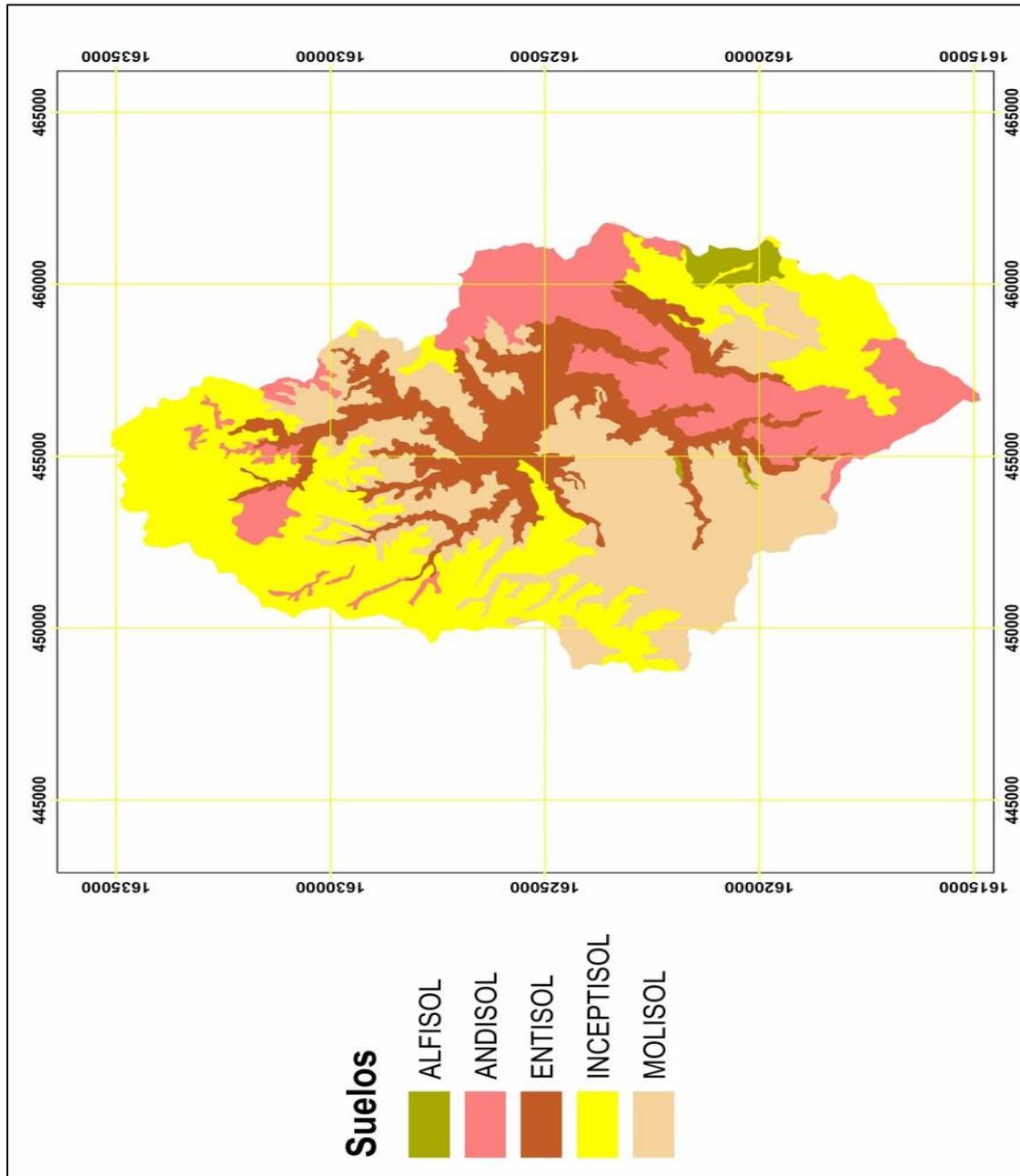
Los suelos en cuenca del río Pixcayá, de acuerdo a la clasificación de suelos del departamento de Chimaltenango (MAGA, 2010), se encuentran conformados por 5 órdenes, de los cuales los dos que cubre la mayor parte del territorio son: molisol, representan el 30,5 % del área y los suelos inceptisol cubre el 25,05 % del territorio. Se identifican 10 subgrupos, como se puede observar en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Suelos presentes en la cuenca del río Pixcayá a nivel de subgrupo**

Orden	Suborden	Grupo	Subgrupo	Hectáreas	%
ALFISOL	Ustalfs	<i>Haplustalfs</i>	<i>Typic Haplustalfs</i>	230,6	1,48
ANDISOL	Ustands	<i>Haplustands</i>	<i>Typic Haplustands</i>	1 646,8	10,55
			<i>Vitric Haplustands</i>	1 397,5	8,95
ENTISOL	Orthents	<i>Ustorthents</i>	<i>Vitrantic Ustorthents</i>	255,1	1,63
	Psamments	<i>Ustipsamments</i>	<i>Typic Ustipsamments</i>	2 432,7	15,59
INCEPTISOL	Ustepts	<i>Dystrustepts</i>	<i>Andic Dystrustepts</i>	1 445,5	9,26
			<i>Humic Dystrustepts</i>	2 244,8	14,38
			<i>Typic Dystrustepts</i>	218,4	1,40
		<i>Haplustepts</i>	<i>Andic Haplustepts</i>	966,8	6,19
MOLISOL	Ustolls	<i>Haplustolls</i>	<i>Typic Haplustolls</i>	4 767,8	30,55
<i>Total</i>				15 606,0	100,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Clasificación de suelos de la cuenca del río Pixcayá a nivel de orden



Fuente: elaboración propia, 2014.

3.13. Hidrografía

La cuenca del río Pixcayá es una subcuenca del río Motagua, que es uno de los más grandes de Guatemala con una extensión de 14,452.53 km², atraviesa cinco departamentos del país, hasta su desembocadura en el mar Caribe. La cuenca del río Pixcayá, a la altura de la presa El Tesoro, de acuerdo con Alvarado et al., (1988), presenta un caudal medio diario de 1,212 m³/s. Los cuales guardan una estrecha relación con el régimen de lluvias, de mayo a noviembre.

Las curvas de duración de caudales y recesión indican un almacenamiento importante de agua subterránea, esto tiene relación con la cantidad de pequeñas depresiones que se encuentran en la cuenca y la poca pendiente que se tiene en la parte media, así como, con la capacidad de conducir agua en el perfil de suelo. Las principales características morfométricas de la cuenca se presentan en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Características morfométricas de la cuenca del río Pixcayá**

	<i>Propiedades de la superficie</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
	<i>Área</i>	<i>km²</i>	<i>156,0595</i>
	<i>Perímetro</i>	<i>km²</i>	<i>64,3666</i>
	<i>Cota mínima</i>	<i>M</i>	<i>1740</i>
	<i>Cota máxima</i>	<i>M</i>	<i>2653</i>
	<i>X Centroide</i>	<i>M</i>	<i>455 270,7</i>
	<i>Y Centroide</i>	<i>M</i>	<i>1 624 975</i>
	<i>Z Centroide</i>	<i>M</i>	<i>2 230</i>
	<i>Altitud media</i>	<i>m</i>	<i>2 100</i>
	<i>Altitud más frecuente</i>	<i>m</i>	<i>2 115</i>
	<i>Pendiente promedio</i>	<i>%</i>	<i>24,8</i>

Continuación de la tabla XIV.

	Propiedades de la uperficie	Unidad	Valor
2	Propiedades de la red hídrica		
	<i>Longitud del cauce principal</i>	<i>KM</i>	<i>21,093</i>
	<i>Orden de la red hídrica</i>	<i>No</i>	<i>5</i>
	<i>Sumatoria de longitudes de cada orden de la red hídrica</i>		<i>5</i>
	<i>Longitud total de la red hídrica</i>	<i>Km</i>	<i>87,3</i>
	<i>Pendiente promedio de la red hídrica</i>	<i>%</i>	<i>24,64</i>
3	Parámetros generados		
	<i>TC</i>	<i>Hr</i>	<i>1,2</i>
	<i>Pendiente del cauce principal</i>	<i>M</i>	<i>0,045</i>

Fuente: elaboración propia.

3.14. Uso y cobertura de la tierra

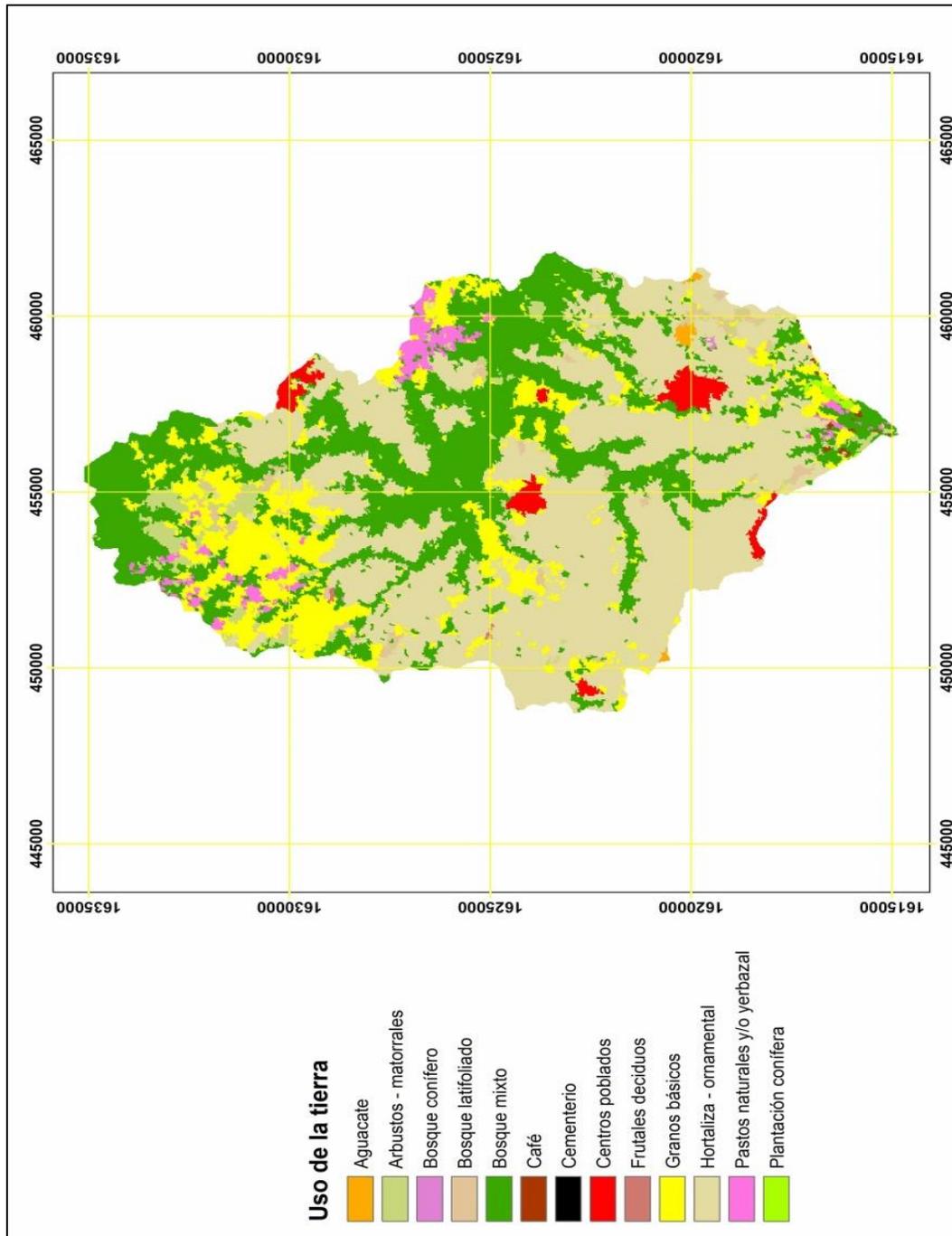
El uso de la tierra de acuerdo al mapa elaborado por MAGA, 2006, muestra un predominante uso agrícola 9 958,7 hectáreas, equivalente a 63,15 % del territorio para uso agrícola. El principal uso agrícola lo constituyen las hortalizas con un poco más de 7 000 hectáreas, el área urbana un ocupa un área de 313 hectáreas (2 % del territorio) , más detalles se pueden observar en la tabla XV, la distribución espacial de los usos de la tierra se puede observar en la figura 12.

Tabla XV. Distribución del uso del tierra por microcuena (hectáreas)

<i>Microcuena</i>	<i>Bosques de coníferas</i>	<i>Pastos naturales</i>	<i>Arbustos y matorrales</i>	<i>Granos básicos</i>	<i>Hortalizas</i>	<i>Bosque mixto</i>	<i>Bosque latifoliado</i>	<i>Centro Poblado</i>	<i>Frutales deciduos</i>	<i>Aguacate</i>	<i>Plantación de coníferas</i>	<i>Café</i>
<i>Río Chicoj</i>	-	-	8,8	75,1	209,3	267,9	3,9	10	-	-	-	-
<i>Pixcayá Alto</i>	-	-	73	177,3	10,7	661	11,4	-	-	-	-	-
<i>Xetomax</i>	-	63,5	169,4	330,3	8,6	255,5	35,6	-	-	-	-	-
<i>Comalapa</i>	-	-	2,8	20,2	179,8	105	3,6	67,2	-	-	-	-
<i>Panabajal</i>	-	2,2	5,9	179,5	320	265,3	4,6	-	-	-	-	-
<i>Pacorral Bajo</i>	0	-	15,4	239,6	525,7	325,1	31,1	-	-	-	-	-
<i>Balanya Alto</i>	-	-	7	93,5	1 612,0	164,1	6,6	17,7	-	5	-	-
<i>Paxilón</i>	-	-	20,1	152,7	610,6	183,6	12,8	17,3	4	-	-	-
<i>Pixcayá Medio</i>	-	9,1	8,3	70,4	538,7	658,6	7,5	-	-	-	-	-
<i>Balanya Bajo</i>	-	-	3,3	83,4	498,8	261,8	12,3	44,7	-	-	-	-
<i>Río El Sitán</i>	-	13,7	32	50,5	991,8	306,6	31,6	31,7	-	-	1,1	9
<i>Yerbabuena</i>	5,3	-	35,8	65,6	765,7	237,2	54,2	12,2	-	29,9	-	2,6
<i>Pachoj</i>	-	15,4	26,2	133,3	468,5	307	1,3	112,5	-	-	26,8	4,8
<i>Pacorral Alto</i>	0,7	64,1	55,2	339,8	154,7	212	22,7	-	5,5	-	-	-
<i>Sochal</i>	-	90,1	4,6	120,8	2,7	194,7	-	-	-	-	-	-
<i>Esbaquiej</i>	-	43	11,9	24,7	61,3	131,5	0,5	-	-	-	-	-
<i>Pixcaya Bajo</i>	-	0	24,9	6,3	28	171,7	-	-	-	-	-	-
<i>Chuanimoche</i>	-	28,9	7,7	2,9	55,2	102,5	10,6	-	-	-	-	-
<i>Total</i>	6,1	330,1	512,1	2 165,70	7 042,0	4 811,20	250,3	313	9,5	34,9	27,9	16,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Mapa de uso de la tierra en la microcuenca del río Pixcayá



Fuente: MAGA, 2006.

3.15. Vegetación y características bióticas

La cuenca del río Pixcayá se encuentra conformada por dos zonas de vida, el bosque húmedo montano bajo subtropical, la cual cubre el 80 % del territorio y el bosque muy húmedo montano bajo que ocupa el área restante; esta zona de vida se encuentra conformada por dos franjas, una hacia el norte y otra más pequeña hacia el sur, ver figura 13.

Ambas zonas de vida se caracterizan por presentar un clima frío, pero con diferencia de humedad, lo cual da origen a formaciones vegetales diferentes. Al norte en las partes altas de la cuenca conformada por paisajes de montaña se tienen bosques húmedos y fríos que son el hábitat adecuado para la formación de especies de musgos y hongos comestibles que requieren una alta humedad.

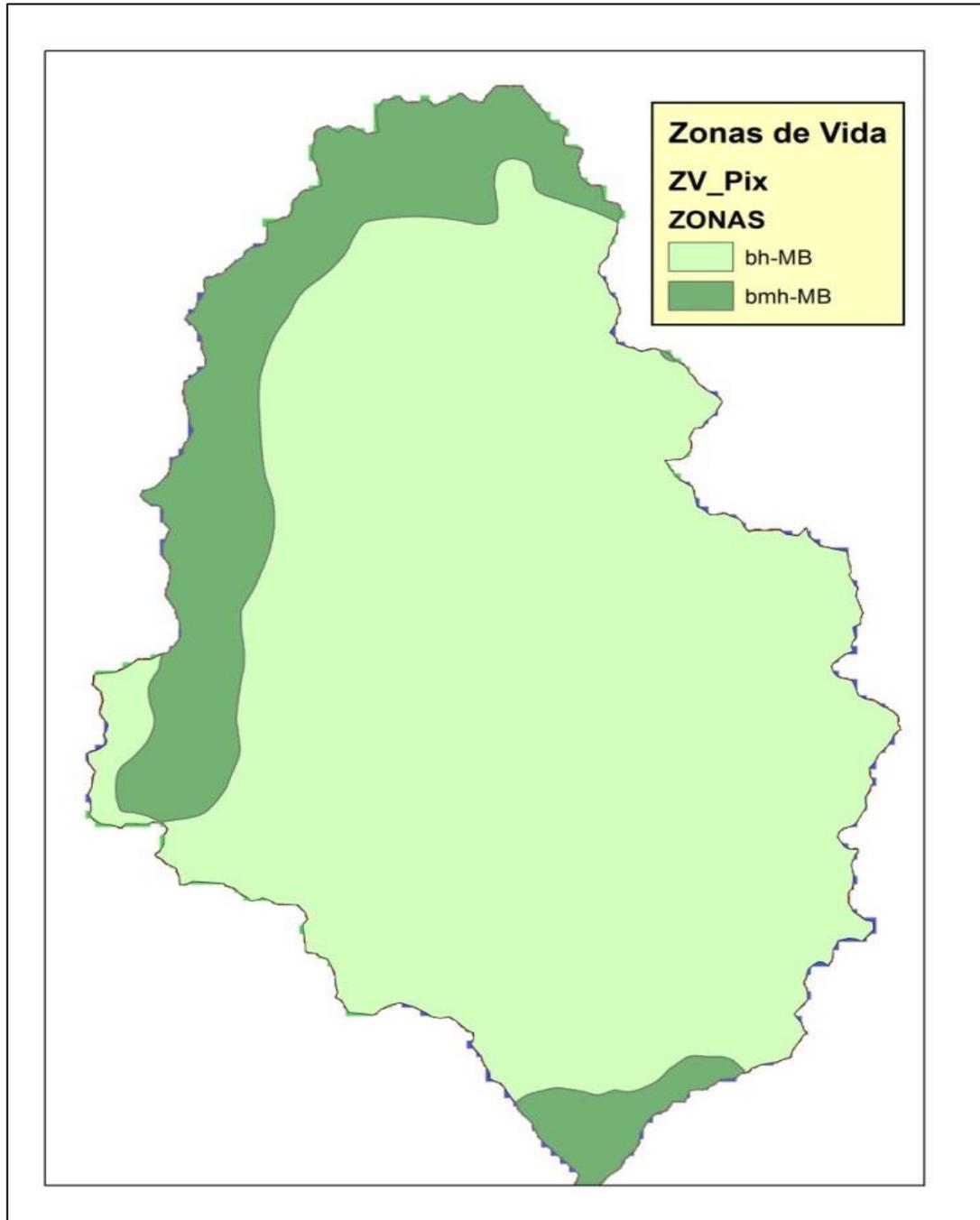
La comunidad vegetal se encuentra conformada por especies de pino-encino. La dinámica forestal (tabla XVI), muestra para el período analizado 2006-2010, el balance negativo representando poco más del 1 % de pérdida de bosque en la cuenca, para el período analizado (figura 14).

Tabla XVI. **Dinámica de la cobertura forestal 2006-2010 (hectáreas)**

Nombre	Bosque	No bosque	Pérdida	Ganancia
<i>Río Chicoj</i>	265,0	283,7	16,0	10,3
<i>Pixcayá Alto</i>	3815	388,9	47,0	115,8
<i>Xetomax</i>	182,6	552,8	51,3	76,2
<i>Comalapa</i>	53,5	302,1	8,5	14,4
<i>Panabajal</i>	185,3	541,4	25,0	25,8
<i>Pacorral Bajo</i>	284,4	743,8	59,8	48,8
<i>Balanyá Alto</i>	109,8	1 738,4	28,1	29,5
<i>Paxilón</i>	162,5	787,2	38,6	12,5
<i>Pixcaya Medio</i>	466,5	685,7	67,0	73,2
<i>Balanya Bajo</i>	247,6	612,8	12,3	31,5
<i>Río El Sitán</i>	332,4	1 054,3	43,2	38,4
<i>Yerbabuena</i>	253,2	775,1	119,2	60,9
<i>Pachoj</i>	319,1	644,9	89,7	42,1
<i>Pacorral Alto</i>	139,2	621,4	36,9	57,3
<i>Sochal</i>	151,7	196,2	54,8	10,1
<i>Esbaquiej</i>	123,6	94,7	34,5	20,2
<i>Pixcayá Bajo</i>	132,3	58,1	31,4	9,1
<i>Chuanimoche</i>	79,6	74,3	35,3	18,5
	3 869,9	10 155,8	798,4	694,7

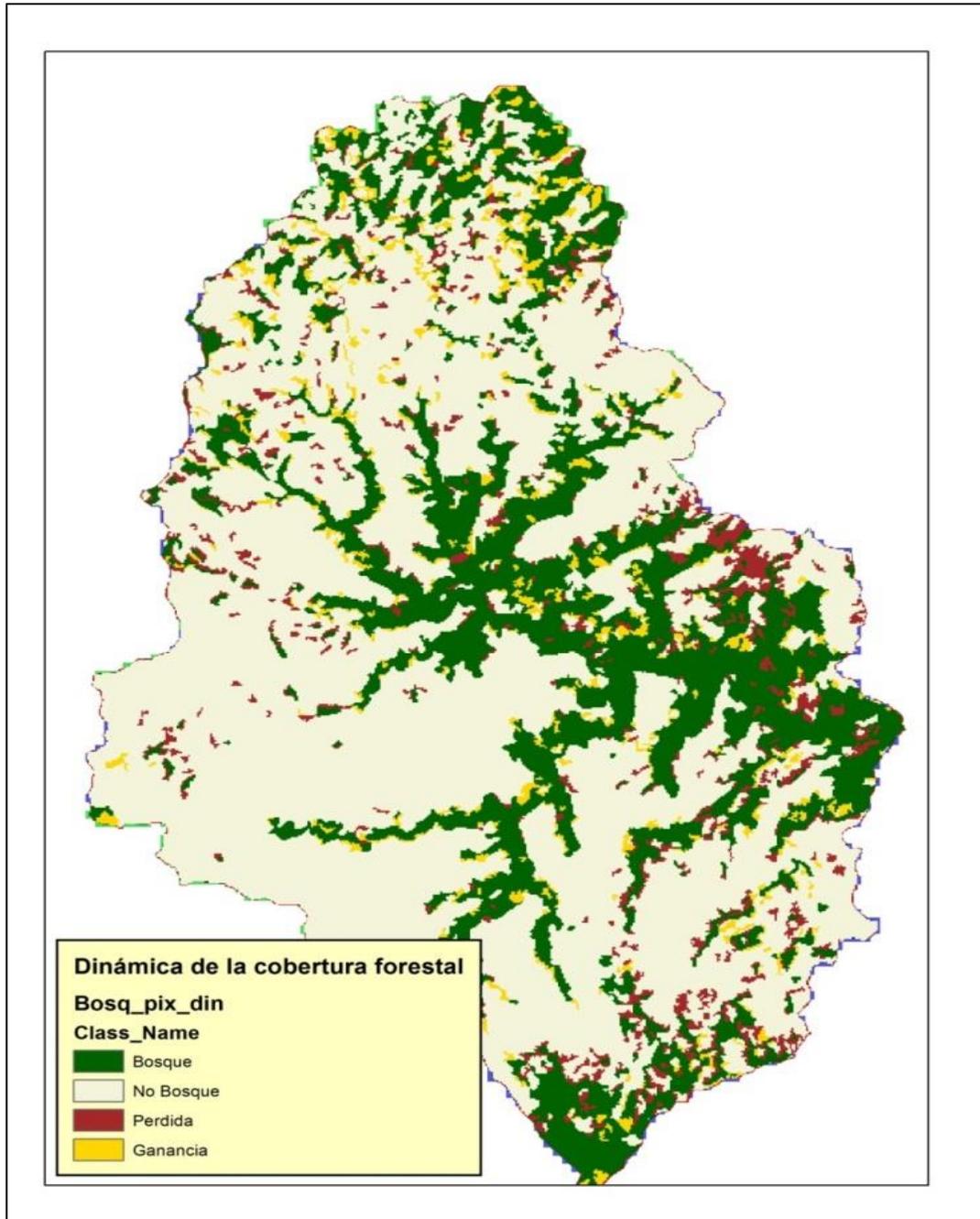
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Zonas de vida presentes en la cuenca del río Pixcayá



Fuente: CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza et al., 2001. p. 144.

Figura 14. Dinámica de la cobertura forestal años 2006-2010.
Microcuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

3.16. Aspectos socioeconómicos relevantes de la cuenca del río Pixcayá

La población en la cuenca del río Pixcayá para el 2002 era de 43 555 habitantes (INE, 2003), el municipio que tiene la mayor población dentro de la cuenca es el de Zaragoza, con 15 734 habitantes (tabla XVII). La distribución etaria de la población muestra que se tienen valores de hasta 16 % de población menor de 4 años y hay una marcada inclinación hacia la población joven (figura 15). La población predominantemente es indígena, de acuerdo al mapa de regiones lingüísticas de Guatemala pertenece a la etnia cakchiquel.

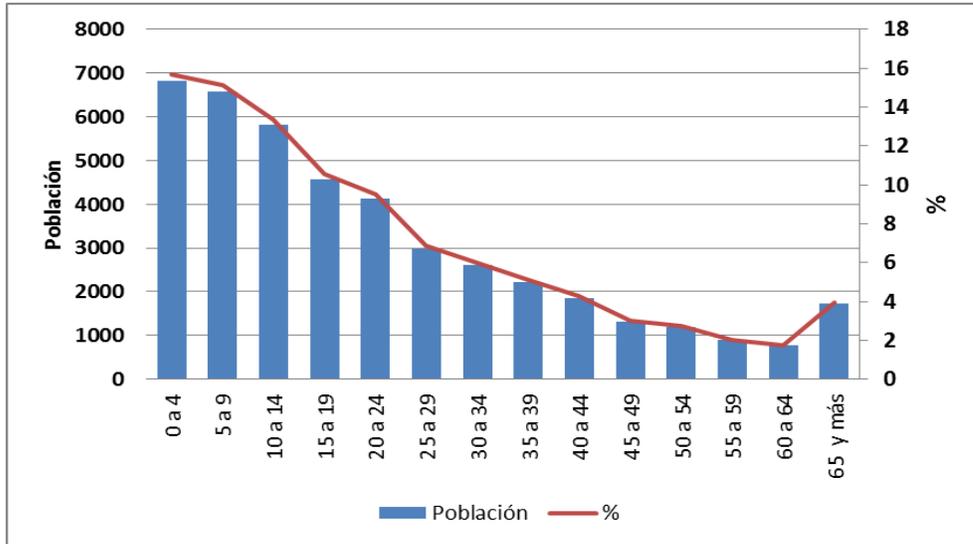
La estimación de población para el 2014 es de 61 524 habitantes y la que se podría esperar para el 2020 (dentro de 6 años) es de 75 213 habitantes (gráfica IV 6).

Tabla XVII. **Distribución de la población por municipio. Cuenca del río Pixcayá**

<i>Municipio</i>	<i>Total</i>	<i>Hombres</i>	<i>Mujeres</i>
<i>Chimaltenango</i>	0	0	0
<i>San Juan Comalapa</i>	7 094	3 499	3 595
<i>Patzicía</i>	7 051	3 414	3 637
<i>San Andrés Itzapa</i>	766	377	389
<i>Santa Cruz Balanyá</i>	6 504	3 204	3 300
<i>Tecpán Guatemala</i>	6 406	3 204	3 202
<i>Zaragoza</i>	15 734	7 803	7 931
Total	43 555	21 501	22 054

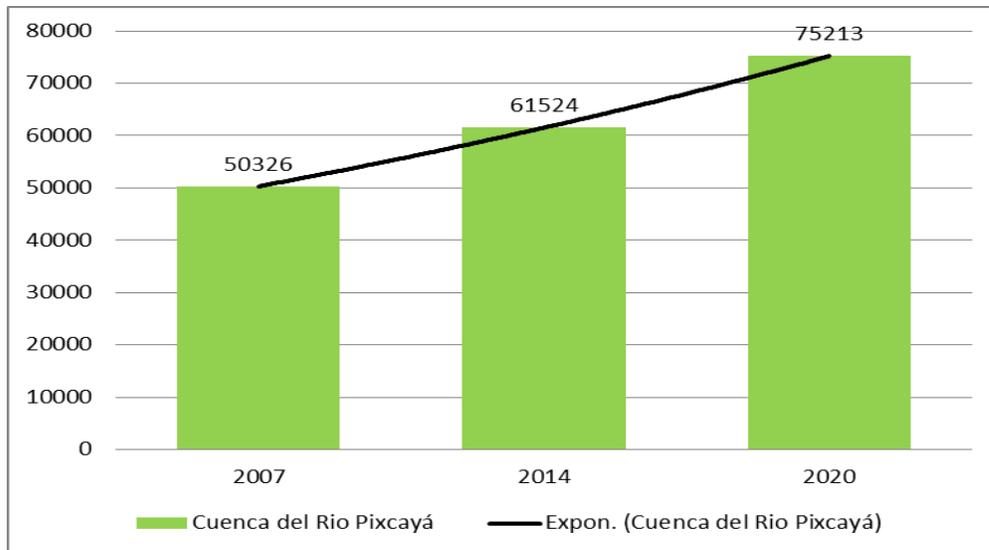
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Distribución de la población etárea**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Proyecciones de población. Cuenca del río Pixcayá**



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la distribución de la población por género se guarda la misma relación que a nivel nacional con una mayor proporción de mujeres. La distribución urbana y rural muestra que el 44,9 % de la población es urbana y el restante 55,01 es rural.

Al analizar la distribución de la población a nivel de microcuencas se puede observar que la de Pachoj presenta la mayor población con 8 587 habitantes. La densidad de población en las microcuencas muestra valores muy heterogéneos desde 783 habitantes por km² para la microcuenca del río Pachoj, hasta microcuencas que no presentan población, el promedio de densidad de la población es de 291,4 habitantes por km². (Ver detalles de la distribución de la población por microcuenca en la tabla XVIII).

Tabla XVIII. **Características de la población por microcuenca**

Microcuenca	Población total	Hombres	Mujeres	Urbana	Rural	Densidad de población hab/km ²
Balanyá Alto	3 753	1 825	1 928	-	3 753	197
Balanyá Bajo	5 383	2 663	2 720	4 446	937	595
Comalapa	2 157	1 057	1 100	1 831	326	571
Pachoj	8 587	4 259	4 328	8 561	26	783
Pacorral Alto	1 411	705	706	-	1 411	165
Pacorral Bajo	4 234	2 074	2 160	2 058	2 176	373
Panabajal	3 374	1 673	1 701	-	3 374	434
Paxilón	4 331	2 123	2 208	2 143	2 188	433
Pixcaya Alto	954	475	479	-	954	102
Río Chicoj	2 318	1 166	1 152	-	2 318	404
Río El Sitán	1 547	767	780	-	1 547	105
Sochal	125	62	63	-	125	30
Xetomax	1 008	501	507	-	1 008	117
Yerbabuena	4 252	2 095	2 157	467	3 785	352
Total	43 555	21 445	21 989	19 506	23 928	197
%		49,4	50,6	44,9	55,1	

Fuente: elaboración propia.

La principal actividad que genera empleo en la cuenca del río Pixcayá, es la agricultura, ya que representa el 65 % de la población económicamente activa, seguido de las ramas de actividad de industria manufacturera y el comercio que representan el 8,8 y 8,3 % respectivamente, esto se debe a su cercanía con zonas urbanas, al permitir que un número importante de personas de la cuenca se trasladen todos los días a trabajar a la ciudad de Guatemala o bien a Chimaltenango (tabla XIX).

Tabla XIX. **Principales actividades de la PEA, por ramas de la actividad**

<i>Rama de la actividad</i>	<i>PEA</i>	<i>%</i>	<i>% acumulado</i>
<i>Agricultura</i>	9 549	65,0	65,0
<i>Industria manufacturera</i>	1 292	8,8	73,8
<i>Comercio</i>	1 225	8,3	82,2
<i>Construcción</i>	763	5,2	87,3
<i>Servicios comunales</i>	643	4,4	91,7
<i>Trasporte</i>	365	2,5	94,2
<i>Otros</i>	850	5,8	100,0

Fuente: elaboración propia, con base en INE. 2003.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de erosividad de la cuenca del río Pixcayá presentan un comportamiento uniforme con un valor medio ponderado para toda la cuenca, este es de 6,432 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1 y el rango se encuentra desde 5,578 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1, en la parte baja y central de la cuenca en los alrededores del casco urbano del municipio de Santa Cruz Balanyá, hasta valores de 7 434 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1 en las partes altas de las montañas, al norte y al sur de la cuenca. En la figura 17 se puede observar la distribución espacial del valor de erosividad de la lluvia y la tabla XX contiene el los valores de erosividad: máximo, mínimo, promedio y la desviación estándar, para cada una de las microcuencas de la cuenca del río Pixcayá.

Tabla XX. **Valores de erosividad de la lluvia por microcuenca. Cuenca del río Pixcayá**

Nombre	Min	Max	Media	DS
<i>Río Chicoj</i>	5608	5929	5701	72
<i>Pixcayá Alto</i>	6390	7054	6743	171
<i>Xetomax</i>	6369	7058	6740	160
<i>Comalapa</i>	5922	6270	6105	80
<i>Panabajal</i>	6041	6608	6265	128
<i>Pacorral Bajo</i>	5982	6786	6428	196
<i>Balanyá Alto</i>	6147	7359	6804	261
<i>Paxilón</i>	5862	6793	6372	255
<i>Pixcayá Medio</i>	5738	6517	6042	203
<i>Balanya Bajo</i>	5691	6341	5960	158
<i>Río El Sitán</i>	6145	7338	6791	286
<i>Yerbabuena</i>	5578	6622	5973	276
<i>Pachoj</i>	5604	7435	6197	455

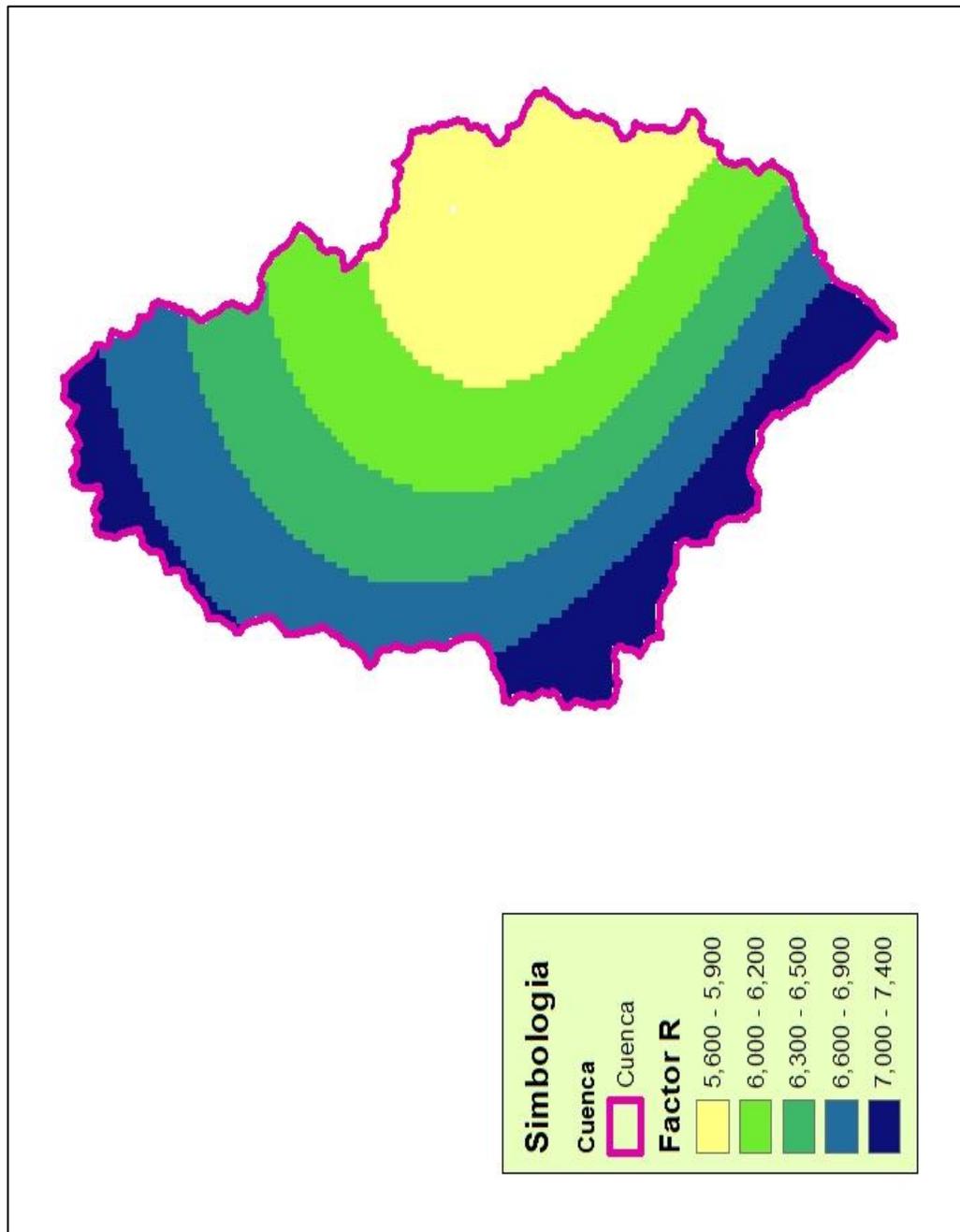
Continuación de la tabla XXII

Nombre	Min	Max	Media	DS
<i>Pixcaya Bajo</i>	5581	5656	5601	13
<i>Chuanimoche</i>	5620	5768	5691	37
<i>Pacorral Alto</i>	6272	6900	6619	166
<i>Sochal</i>	5607	5796	5687	52
<i>Esbaquej</i>	5656	5835	5751	42

Fuente: elaboración propia.

La erosividad de la lluvia en Guatemala, de acuerdo con Bravo, Chonay, & González (1989), presenta valores desde 34,000 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1, hasta 2 000 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1, por lo tanto, los valores encontrados en la cuenca del río Pixcayá (6,432 MJ*mm*ha-1*h-1*año-1), pueden considerarse como bajos a nivel nacional.

Figura 17. Erosividad de la lluvia Factor R. Cuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

4.1. Factor K erorabilidad del suelo

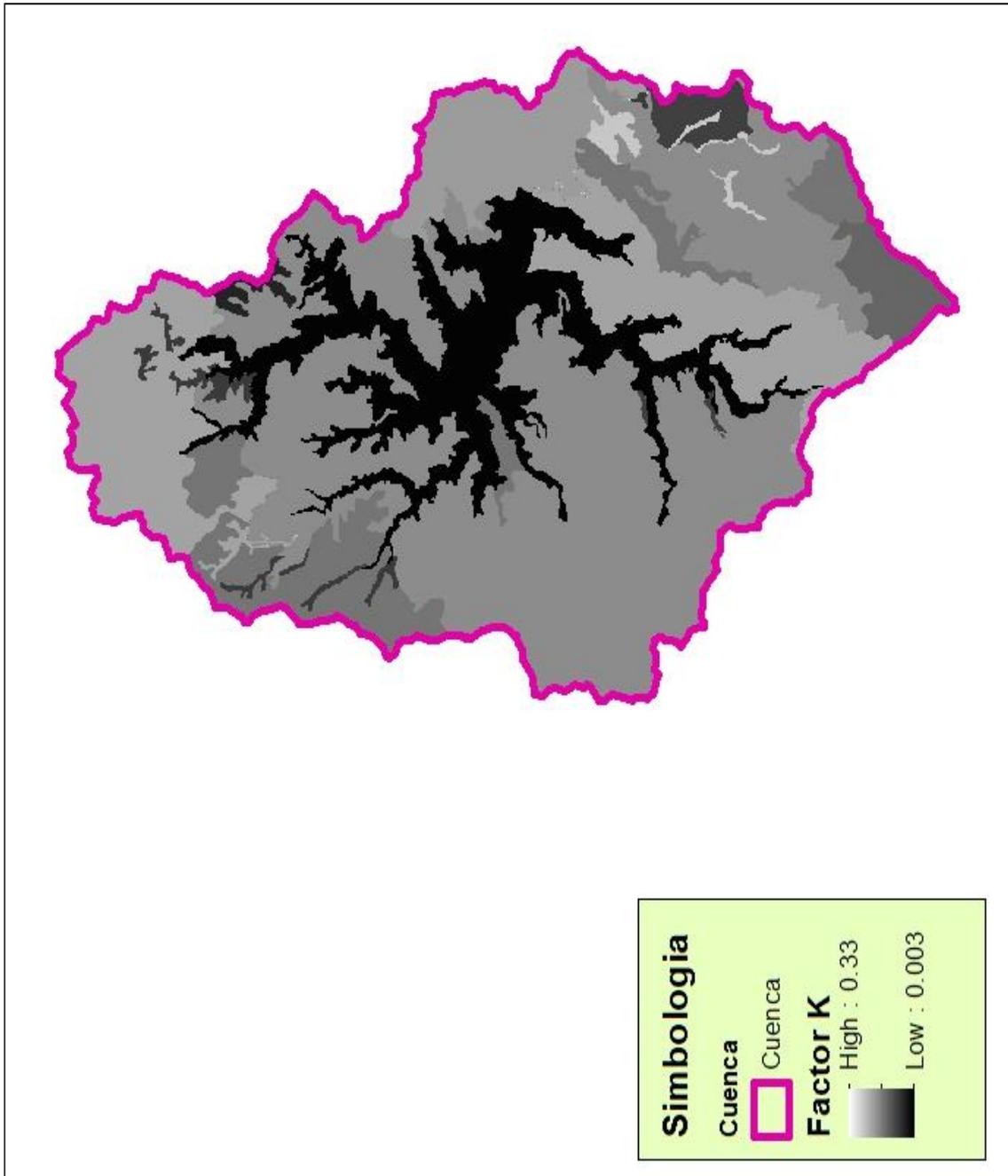
La erorabilidad del suelo en la microcuenca tiene una media de 0,02846 [(Mg*ha-1) * (MJ*mm*ha-1*h-1)] y con valor máximo de 0,327 [(Mg*ha-1) * (MJ*mm*ha-1*h-1)] y mínimo de 0.001 [(Mg*ha-1) * (MJ*mm*ha-1*h-1)]; la distribución espacial de la erorabilidad se puede observar en la figura 18, los valores de la erorabilidad: máxima, media y la desviación estándar, para cada una de las microcuencas analizadas se puede observar en la tabla XXI.

Tabla XXI. **Valor ponderado de la erorabilidad por microcuenca.**
[(Mg*ha⁻¹) * (MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹)]

Nombre	Max	Media	DS
<i>Río Chicoj</i>	0,003	0,05	0,026775
<i>Pixcayá Alto</i>	0,003	0,038	0,033161
<i>Xetomax</i>	0,003	0,038	0,032388
<i>Comalapa</i>	0,004	0,033	0,022835
<i>Panabajal</i>	0,004	0,038	0,025042
<i>Pacorral Bajo</i>	0,003	0,033	0,025134
<i>Balanya Alto</i>	0,004	0,037	0,031853
<i>Paxilón</i>	0,003	0,033	0,027905
<i>Pixcaya Medio</i>	0,004	0,038	0,018622
<i>Balanya Bajo</i>	0,003	0,045	0,024875
<i>Río El Sitán</i>	0,003	0,045	0,030584
<i>Yerabuena</i>	0,016	0,33	0,030348
<i>Pachoj</i>	0,025	0,05	0,031404
<i>Pacorral Alto</i>	0,004	0,045	0,028857
<i>Sochal</i>	0,036	0,036	0,036
<i>Esbaquiej</i>	0,004	0,037	0,018677
<i>Pixcayá Bajo</i>	0,025	0,05	0,036891
<i>Chuanimoche</i>	0,004	0,037	0,029291

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Distribución espacial de la erorabilidad, factor K. Cuenca del río Pixcayá**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Factor LS longitud y gradiente de la pendiente (adimensional)

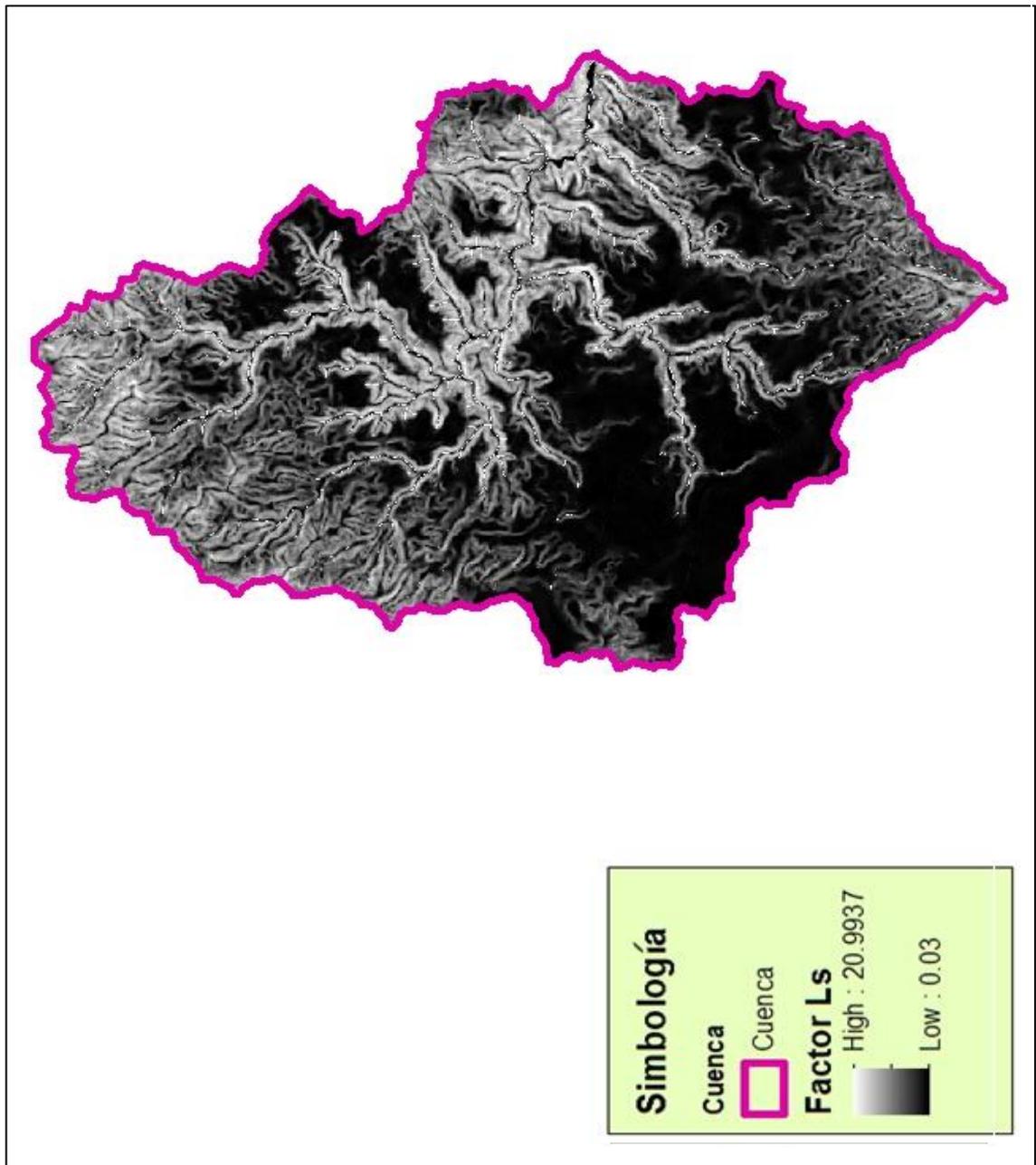
Este factor representa el efecto que la topografía tiene en el proceso de la erosión hídrica. El valor medio en la cuenca es de 3,65 con valores máximos de 20,99 y mínimos de 0,03, guardando una correlación con la geomorfología, en la zona en donde predominan los paisajes de laderas con fuertes pendientes predominan los valores altos y en los paisajes de terrazas con pendiente suave y moderada se presentan los valores bajos. Este factor puede ser exagerado al modelarlo utilizando SIG para los sitios en donde se tienen pendientes fuertes, por lo tanto se utilizó el criterio de poner un límite de 21 a los sitios que tienen valores por encima de este valor. En la figura 19 se puede observar la distribución espacial del factor LS y en el tabla XXII se presentan los resultados de la distribución del factor a nivel de la microcuenca, considerando los valores máximo, mínimo, medio y la desviación estándar.

Tabla XXII. Valor ponderado del factor LS por microcuenca

Nombre	Min	Max	Media	DS
<i>Río Chicoj</i>	0,03	20,80816	4,429166	3,514998
<i>Pixcayá Alto</i>	0,03	20,93815	6,023606	2,576294
<i>Xetomax</i>	0,03	20,77558	5,195453	2,583392
<i>Comalapa</i>	0,03	20,51631	2,873674	3,090782
<i>Panabajal</i>	0,03	20,62316	3,881436	3,114555
<i>Pacorral Bajo</i>	0,03	20,78868	4,139657	2,86124
<i>Balanyá Alto</i>	0,03	20,91511	1,245555	1,949129
<i>Paxilón</i>	0,03	20,90018	2,757777	2,751562
<i>Pixcaya Medio</i>	0,03	20,85516	4,511751	3,539692
<i>Balanyá Bajo</i>	0,03	20,96452	2,896878	3,448831
<i>Yerbabuena</i>	0,03	20,87877	2,945759	2,673456
<i>Pachoj</i>	0,03	20,94133	3,874467	3,075927
<i>Pacorral Alto</i>	0,03	20,81033	4,558749	2,5008
<i>Sochal</i>	0,03	20,96674	5,611579	2,851982
<i>Esbaquej</i>	0,03	20	5,622958	3,23014
<i>Pixcayá Bajo</i>	0,03	20	6,642264	3,230518
<i>Chuanimoche</i>	0,03	20,00735	5,86699	3,235989

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Distribución espacial del factor LS. Cuenca del río Pixcayá



Fuente: elaboración propia.

4.3. Factor C del cultivo

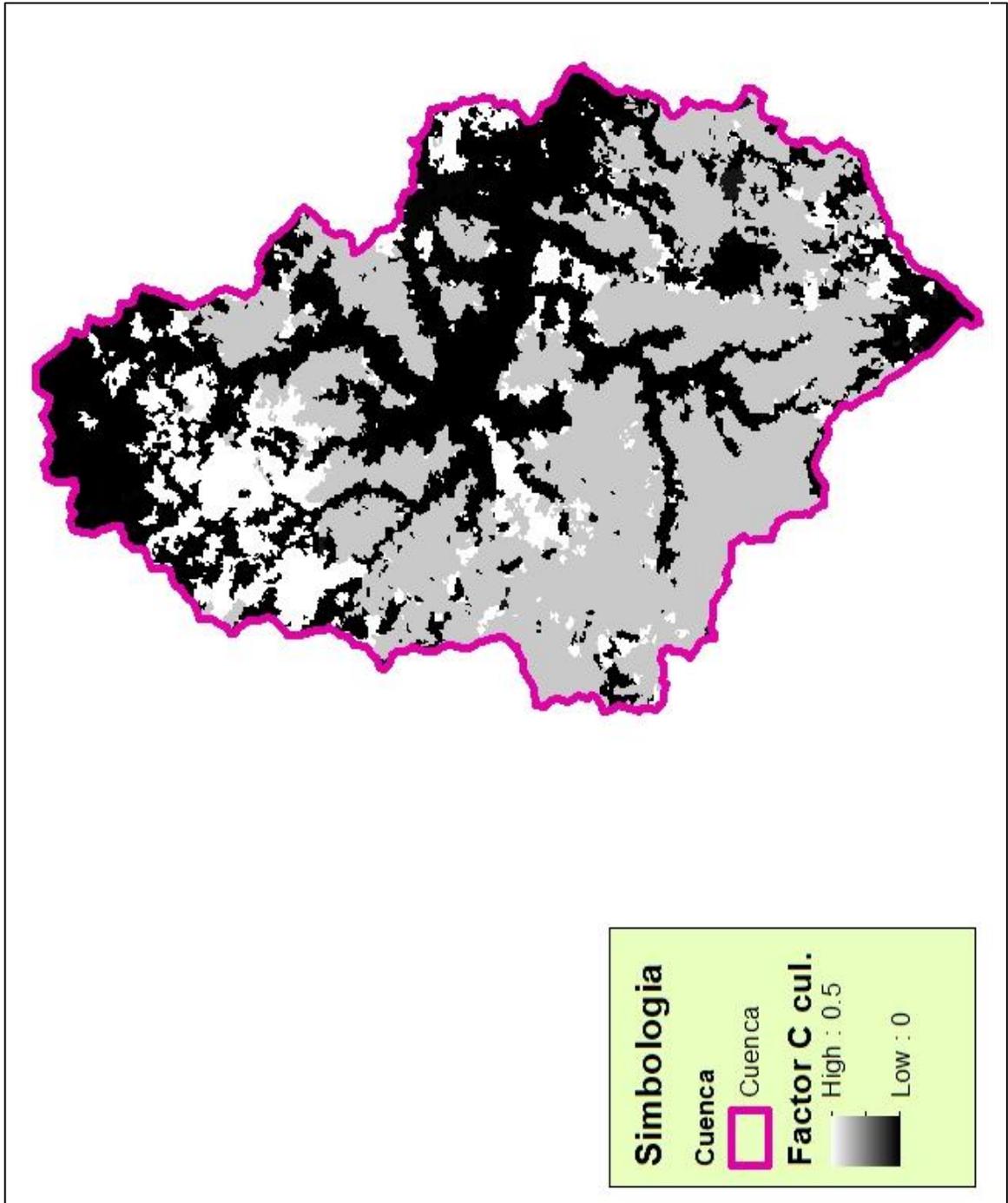
El factor C para la cuenca concuerda con el uso predominante en esta que es la agricultura, el valor medio del factor C es de 0,2523 y el máximo es de 0,5; el valor mínimo es de 0,001. La distribución espacial del factor C del cultivo se presenta en la figura 20 y los valores del factor C a nivel de las microcuencas se encuentra en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. Valor ponderado del factor C por microcuenca (adimensional)

Nombre	Min	Max	Media	DS
<i>Río Chicoj</i>	0	0,5	0,212667	0,214336
<i>Pixcayá Alto</i>	0,001	0,5	0,10134	0,197531
<i>Xetomax</i>	0,001	0,5	0,199254	0,24138
<i>Comalapa</i>	0	0,5	0,21764	0,205137
<i>Panabajal</i>	0,001	0,5	0,280769	0,211486
<i>Pacorral Bajo</i>	0,001	0,5	0,290807	0,204981
<i>Balanyá Alto</i>	0	0,5	0,363117	0,125204
<i>Paxilón</i>	0	0,5	0,320901	0,180684
<i>Pixcaya Medio</i>	0,001	0,5	0,194583	0,205412
<i>Balanya Bajo</i>	0	0,5	0,267695	0,199456
<i>Río El Sitán</i>	0	0,5	0,288551	0,183109
<i>Yerbabuena</i>	0	0,5	0,282992	0,187421
<i>Pachoj</i>	0	0,5	0,232536	0,211148
<i>Pacorral Alto</i>	0,001	0,5	0,27314	0,231609
<i>Sochal</i>	0,002	0,5	0,152474	0,225512
<i>Esbaquiej</i>	0,001	0,5	0,136789	0,197928
<i>Pixcaya bajo</i>	0,002	0,5	0,063408	0,147475
<i>Chuanimoche</i>	0,001	0,5	0,116	0,180184

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Distribución del factor C. Cuenca del río Pixcayá**



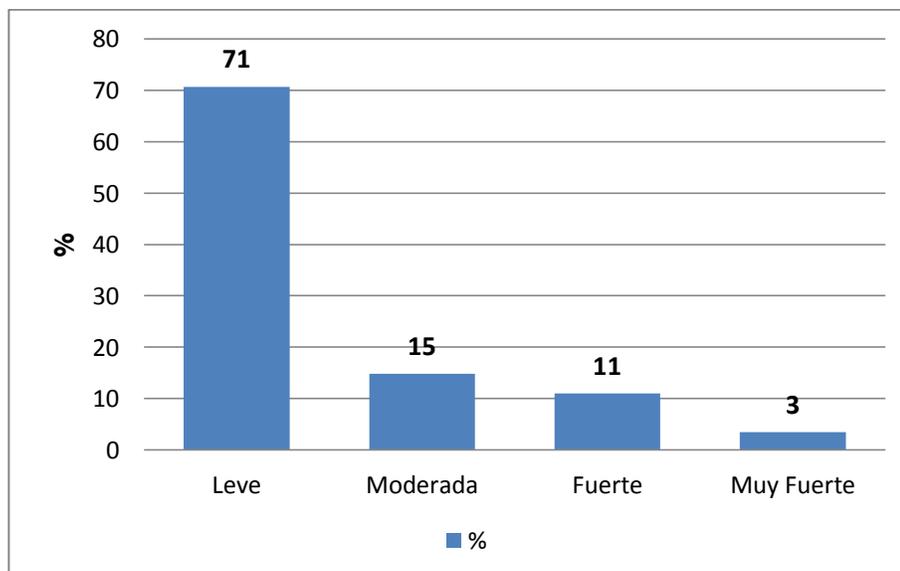
Fuente: elaboración propia.

4.4. Erosión potencial en la cuenca del río Pixcayá, método USLE

La erosión potencial media en la cuenca del río Pixcayá es de 120 ($T \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), la distribución porcentual de la erosión de acuerdo al sistema de clasificación de FAO et.nal (1980), muestra que el 71 % del territorio presenta una tasa de erosión leve, lo cual es consistente con la topografía predominante en la cuenca, ya que el 59 % tiene una pendiente menor del 26 % y al comportamiento erosivo de las lluvias con un valor de erosividad R medio de $6,432 MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$.

En la figura 21 se presenta la distribución porcentual de la erosión de acuerdo a las clases de erosión, el territorio afectado por una erosión severa es solamente el 3 %, lo cual equivale a 435 hectáreas.

Figura 21. **Distribución porcentual de la erosión de acuerdo a la clase de erosión**



Fuente: elaboración propia.

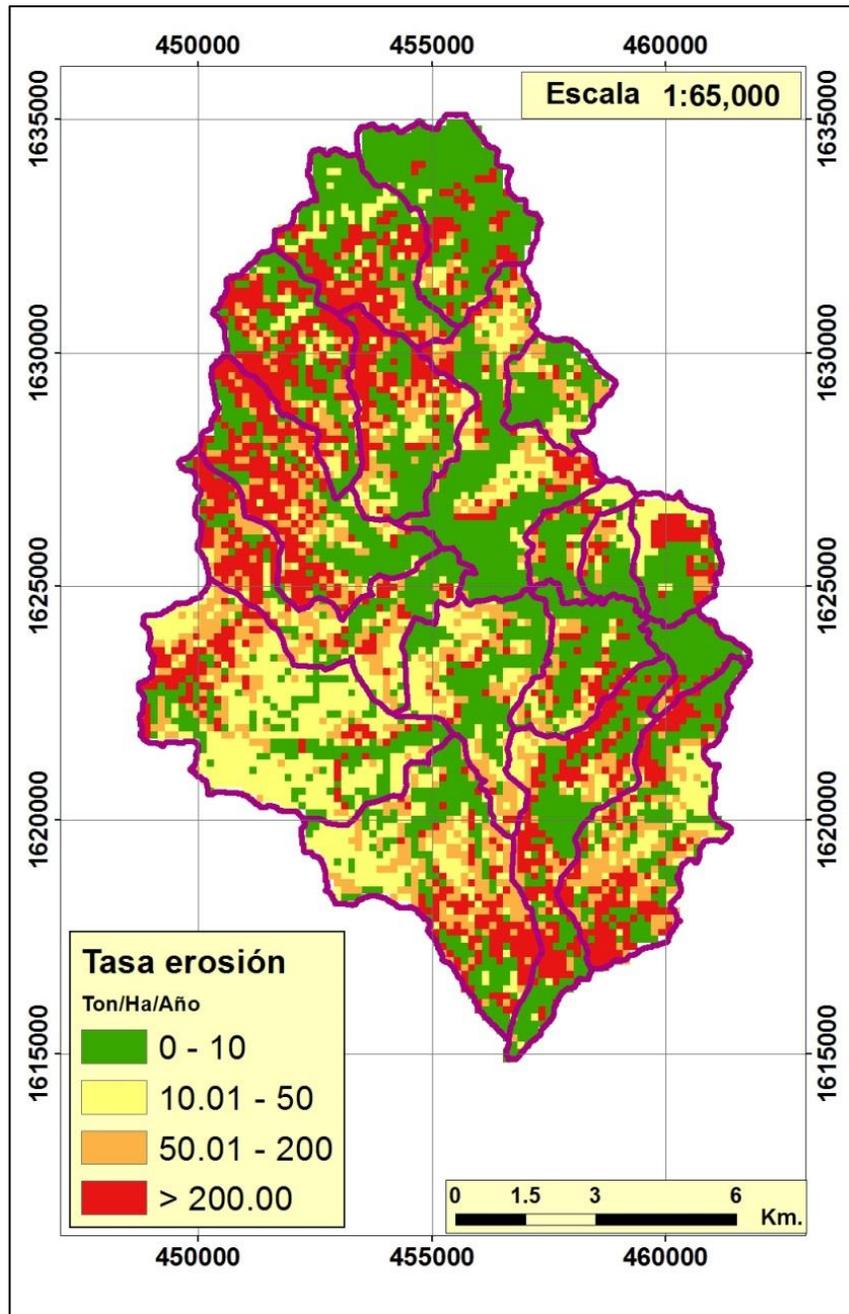
El comportamiento de la erosión por microcuenca permite visualizar que la pérdida media de suelo en 16 de las 18 microcuencas analizadas supera las 50 $T*ha^{-1}* año^{-1}$, y en 9 supera las 100 $T*ha^{-1}* año^{-1}$. El volumen de suelo erosionado en la cuenca del río Pixcayá es de 0.801 millones de $T*ha^{-1}* año^{-1}$, la cuenca que más aporta erosión es Pacorral Alto, con 91 566 $T*ha^{-1}* año^{-1}$, a su vez, es la microcuenca que presentó el valor más alto de erosión medio con 240.9 $T*Ha^{-1}*año^{-1}$.

Tabla XXIV. **Distribución de la erosión por microcuenca, media, desviación estándar y volumen de suelo erosionado en $T*Ha^{-1}*año^{-1}$**

<i>Microcuenca</i>	<i>Media $T*Ha^{-1}*año^{-1}$</i>	<i>Desv Est. $T*Ha^{-1}*año^{-1}$</i>	<i>Total $T*año^{-1}$</i>
<i>Río Chicoj</i>	<i>79,12</i>	<i>157,49</i>	<i>19 938,30</i>
<i>Pixcayá Alto</i>	<i>97,30</i>	<i>236,76</i>	<i>39 016,03</i>
<i>Xetomax</i>	<i>197,53</i>	<i>294,43</i>	<i>73 874,64</i>
<i>Comalapa</i>	<i>47,33</i>	<i>99,11</i>	<i>7 761,96</i>
<i>Panabajal</i>	<i>147,75</i>	<i>196,99</i>	<i>50 825,34</i>
<i>Pacorral Bajo</i>	<i>186,49</i>	<i>212,60</i>	<i>91 565,51</i>
<i>Balanyá Alto</i>	<i>73,93</i>	<i>120,12</i>	<i>59 440,52</i>
<i>Paxilón</i>	<i>128,08</i>	<i>158,72</i>	<i>55 587,44</i>
<i>Pixcaya Medio</i>	<i>68,73</i>	<i>137,97</i>	<i>38 626,86</i>
<i>Balanyá Bajo</i>	<i>52,33</i>	<i>98,47</i>	<i>20 931,68</i>
<i>Río El Sitán</i>	<i>111,55</i>	<i>161,50</i>	<i>68 157,97</i>
<i>Yerbabuena</i>	<i>145,20</i>	<i>192,32</i>	<i>75 940,02</i>
<i>Pachoj</i>	<i>146,17</i>	<i>210,16</i>	<i>69 574,91</i>
<i>Pacorral Alto</i>	<i>240,87</i>	<i>271,65</i>	<i>89 121,07</i>
<i>Sochal</i>	<i>130,83</i>	<i>222,19</i>	<i>23 288,19</i>
<i>Esbaquiej</i>	<i>60,86</i>	<i>140,41</i>	<i>7 181,79</i>
<i>Pixcaya Bajo</i>	<i>49,21</i>	<i>129,93</i>	<i>5 265,13</i>
<i>Chuanimoche</i>	<i>57,79</i>	<i>116,17</i>	<i>5 201,19</i>
Total cuenca			801 298,54

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Distribución de la erosión potencial en la cuenca del río Pixcayá**



Fuente: elaboración propia.

La erosión en la cuenca, comparada con los usos de la tierra, muestra que los principales usos erosivos están relacionados con las actividades agrícolas, el uso más erosivo son los granos básicos con $278,5 \text{ T*Ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, el cultivo de café con $\text{T*Ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ y los frutales deciduos con $179,9 \text{ T*Ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Considerando el vínculo de dependencia que existe en las poblaciones y los granos básicos (maíz y frijol), para garantizar la seguridad alimentaria, el tener los valores más altos de erosión potencial en los granos básicos, es una situación negativa para la cuenca, pudiendo tener repercusiones a mediano y largo plazo la reducción en las cosechas e incluso, pudiendo afectar la seguridad alimentaria.

Una de las razones de los valores elevados para el uso de la tierra, correspondiente a granos básicos, puede estar relacionado con el desplazamiento que ha estado ocurriendo de dicha actividad por el cultivo de hortalizas. Dejando a los granos básicos, principalmente, el cultivo de maíz en los terrenos que presentan las condiciones menos aptas para el desarrollo de cultivos. Los granos básicos representan el 0,25 millones de toneladas de suelo perdido, aproximadamente un tercio de todo el suelo erosionado en la cuenca del río Pixcayá.

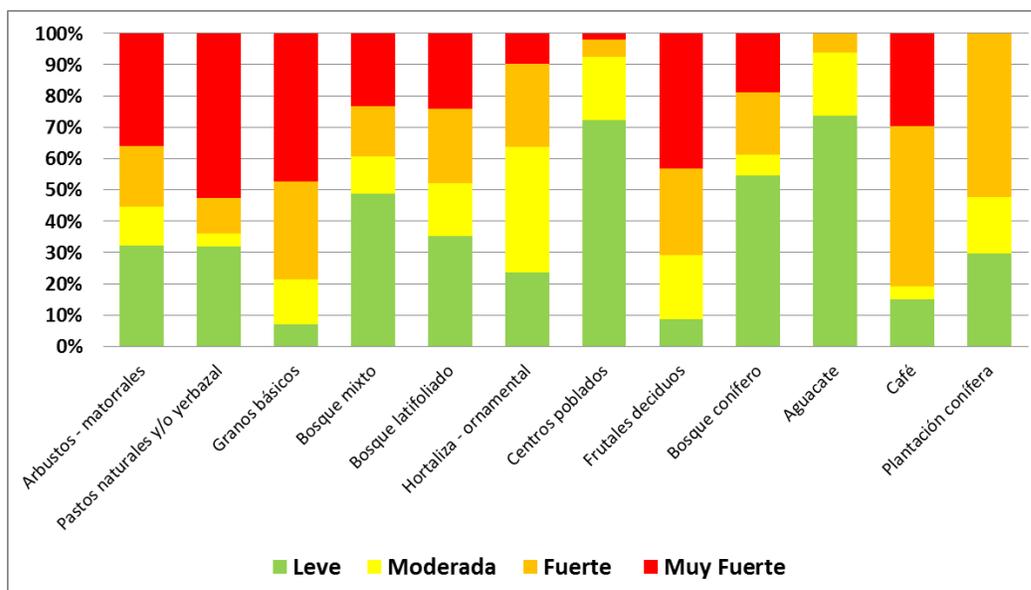
Los valores de erosión potencial por hectárea y el volumen de suelo erosionado por año se presenta en el tabla XXV, la distribución porcentual de los tipos de erosión, de acuerdo a los usos de la tierra, se presenta en la figura 23; los usos de la tierra que presentan el mayor potencial de erosión severa lo constituyen los granos básicos, los pastos y los arbustos (barbecho).

Tabla XXV. Erosión potencial por uso de la tierra

Uso de la tierra	ARE A (km ²)	Media T*Ha ⁻¹ año ⁻¹	T*año ⁻¹
Arbustos - matorrales	5,416742	98,72276	23496,02
Pastos naturales y/o yerbazal	3,5959883	101,6599	16062,26
Granos básicos	20,893146	278,5157	255677,40
Bosque mixto	51,683811	50,43745	112269,90
Hortaliza - ornamental	69,643824	126,6142	387439,30
Centros poblados	2,935965	13,23534	1707,358
Frutales deciduos	0,0910377	175,939	703,7562
Bosque conífero	0,0455188	25,01839	50,03677
Aguacate	0,3869101	40,49066	688,3412
Café	0,2275942	179,8597	1798,597
Plantación conífera	0,273113	117,1281	1405,537
Total de suelo perdido			801298,50

Fuente: elaboración propia. 2014

Figura 23. Distribución porcentual de los tipos de erosión por usos de la tierra



Fuente: elaboración propia. 2014

La ecuación universal de pérdida de suelo permite estimar la erosión del suelo a lo largo de un período de un año, lo cual es válido para las variables que no tienen cambio a lo largo del año, como el factor LS, sin embargo, en lo relacionado al factor C de cobertura y uso del suelo, el nivel de cobertura que el suelo puede tener en un momento dado es diferente, de acuerdo al período fenológico del cultivo y al desarrollo de las malezas, por ejemplo, en el caso del cultivo de maíz en la zona se siembra a finales de abril y se cosecha a principios de diciembre.

Esto, en cuanto a la cobertura del suelo, implica que en mayo con el cultivo recién establecido al presentarse las lluvias, el suelo está desnudo o con muy baja cobertura, mientras que en septiembre, cuando se tiene la mayor cantidad de lluvia, el suelo se encuentra cubierto por malezas.

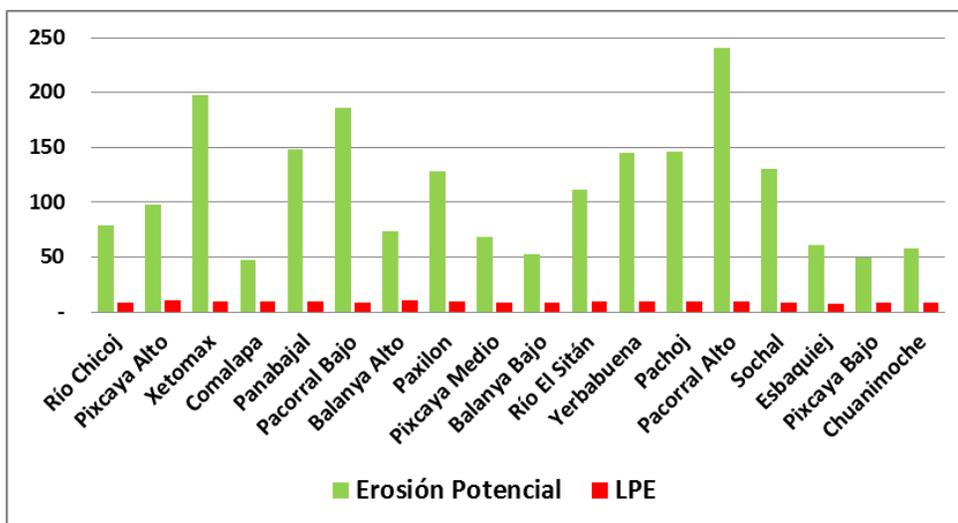
Diversos investigadores han tratado de considerar la variabilidad de la cobertura vegetal a lo largo del año, recientemente en las últimas décadas con el acceso a la información de las imágenes de satélite se ha considerado la variable de (Índice Normalizado de Vegetación, (NDVI) por sus siglas en inglés), la cual, en términos simples indica el índice de verdor, o bien lo contrario, el valor de desnudes del suelo, por lo tanto ofrece una buena información de la cobertura del suelo.

Zhang et al. (2010) desarrollaron una metodología para priorizar áreas para implementar medidas para el control de la erosión, esta metodología ha sido aplicada por el proyecto Euroclima, para determinar la degradación de los suelos de América Latina (Comisión Europea, 2013).

4.5. Límite permisible de erosión

El límite permisible de erosión para la microcuenca presenta un valor medio de $9.1 \text{ T}^*\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, este valor es aproximadamente doce veces más pequeño que el de la erosión media estimada en la cuenca ($119.56 \text{ T}^*\text{Ha}^{-1}\text{a}^{-1}$). La diferencia entre los valores de la erosión potencial estimada y los de la erosión permisible se muestran en la figura 24 y la distribución espacial del LPE, se puede observar en la figura 25.

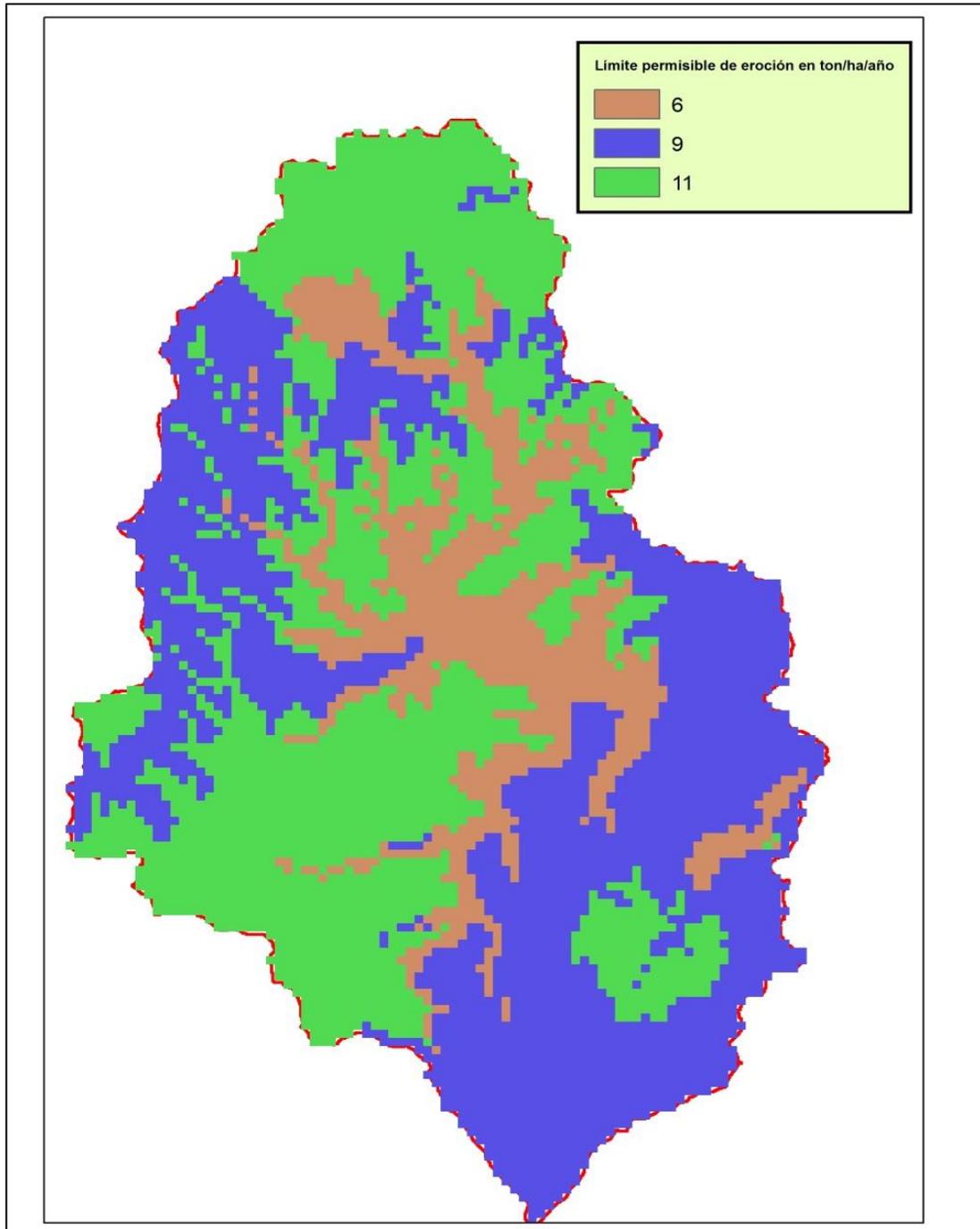
Figura 24. Erosión potencial y límite permisible de erosión



Fuente: elaboración propia. 2014

El análisis estadístico, por medio de la comparación de medias a nivel de microcuencas utilizando el estadístico t para la comparación de medias da un valor de 7,67, con 17 grados de libertad, por lo tanto se comprueba la hipótesis de que la erosión en la cuenca del río Pixcayá es superior que el límite permisible de erosión, habiendo una diferencia altamente significativa ($\text{Pr}(T > t) = 0,0000$). Ver resultado del análisis estadístico en la sección de anexos.

Figura 25. **Distribución espacial del LPE. Cuenca del río Pixcayá**



Fuente: elaboración propia. 2014.

4.6. Producción de sedimentos en la cuenca del río Pixcayá. MUSLE

La estimación de sedimentos se basó en los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo y en la estimación del valor de la curva número ponderada para cada microcuenca. Los valores estimados para los parámetros que conforman la ecuación universal de pérdida de suelo modificada se presenta en el tabla XXVI. Cada uno de los parámetros fue calculado y ponderado espacialmente para cada microcuenca.

Tabla XXVI. Valores ponderados generados para cada microcuenca

Microcuenca	K	LS	C	P	CN II
Río Chicoj	0,026775	4,429166	0,212667	1	71
Pixcayá Alto	0,033161	6,023606	0,10134	1	77
Xetomax	0,032388	5,195453	0,199254	1	77
Comalapa	0,022835	2,873674	0,21764	1	77
Panabajal	0,025042	3,881436	0,280769	1	73
Pacorral Bajo	0,025134	4,139657	0,290807	1	73
Balanya Alto	0,031853	1,245555	0,363117	1	71
Paxilón	0,027905	2,757777	0,320901	1	75
Pixcaya Medio	0,018622	4,511751	0,194583	1	72
Balanyá Bajo	0,024875	2,896878	0,267695	1	75
Río El Sitán	0,030584	2,437588	0,288551	1	74
Yerbabuena	0,030348	2,945759	0,282992	1	72
Pachoj	0,031404	3,874467	0,232536	1	71
Pacorral Alto	0,028857	4,558749	0,27314	1	70
Sochal	0,036	5,611579	0,152474	1	64
Esbaquiej	0,018677	5,622958	0,136789	1	72
Pixcayá Bajo	0,036891	6,642264	0,063408	1	57
Chuanimoche	0,029291	5,86699	0,116	1	66

Fuente: elaboración propia. 2014.

La curva se ajustó de acuerdo a las condiciones de humedad y precipitación existentes para cada uno de los meses. Los valores del caudal

máximo (qp) se estimaron para cada uno de los meses con base al método de SCS, los valores de qp para cada mes se presentan en la sección de anexos.

Los resultados del escurrimiento y la producción de sedimentos por microcuenca se presentan en el tabla XXVII. El promedio de producción de sedimentos por hectárea en las microcuencas es de 10,0 toneladas; el valor máximo se presenta en la microcuenca Xetomax con 20 toneladas y el valor mínimo en la microcuenca Comalapa con valor de 4,13 toneladas. La microcuenca que produce la mayor cantidad de sedimentos es la de Balanyá Alto con 26 314 toneladas por año.

Tabla XXVII. **Producción de sedimentos por microcuenca**

Microcuenca	Precipitación (m³)	Q (mm)	Q (m³)	qp (m³/s)	Sedimentos (T*ha⁻¹)	Sedimentos (T*año)
Río Chicoj	989,30	249,18	216 822,16 ³	36,16	10,94	3 629,39
Pixcayá Alto	1 229,12	485,62	577 487,59 ⁴	23,02	12,70	11 773,80
Xetomax	1 228,60	486,44	222 425,10 ⁴	19,61	19,93	17 134,65
Comalapa	1 087,82	371,69	1427 636,56	3,97	4,13	1 550,07
Panabajal	1 124,40	353,82	2751 151,15	15,08	11,59	9 011,66
Pacorral Bajo	1 156,86	376,41	4290 933,66	25,80	15,16	17 202,82
Balanyá Alto	1 235,64	421,51	8085 542,19	117,56	13,86	26 314,08
Paxilón	1 145,01	388,18	3903 266,89	25,47	13,25	13 228,71
Pixcayá Medio	1 075,57	312,98	4056 141,43	22,86	6,44	8 312,90
Balanya Bajo	1 048,39	320,33	2898 965,86	16,91	7,55	6 822,80
Río El Sitán	1 215,58	443,13	6552 708,61	57,86	15,57	22 757,51
Yerbabuena	1 017,36	297,04	3628 620,38	29,27	10,44	12 536,74
Pachoj	1 078,24	326,47	3592 718,09	40,69	15,73	17 193,36
Pacorral Alto	1 201,23	383,76	3295 284,57	16,61	16,23	13 832,03
Sochal	986,13	205,94	861 998,36	3,64	5,36	2 191,21

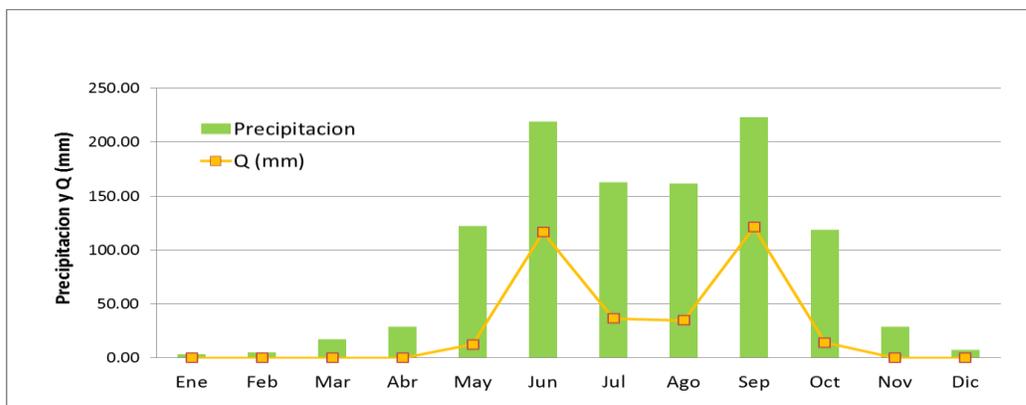
Continuación de la tabla XXVII.

Microcuenca	Precipitación (m ³)	Q (mm)	Q (m ³)	qp (m ³ /s)	Sedimentos (T*ha ⁻¹)	Sedimentos (T*año)
Esbaquiej	1 010,74	263,69	3404 102,52	40,62	6,94	659,42
Pixcayá Bajo	956,42	152,43	1967 806,41	32,88	4,52	324,22
Chuanimoche	992,89	212,44	2742 511,01	43,93	8,69	520,99
Total						184 996,37

Fuente: elaboración propia. 2014

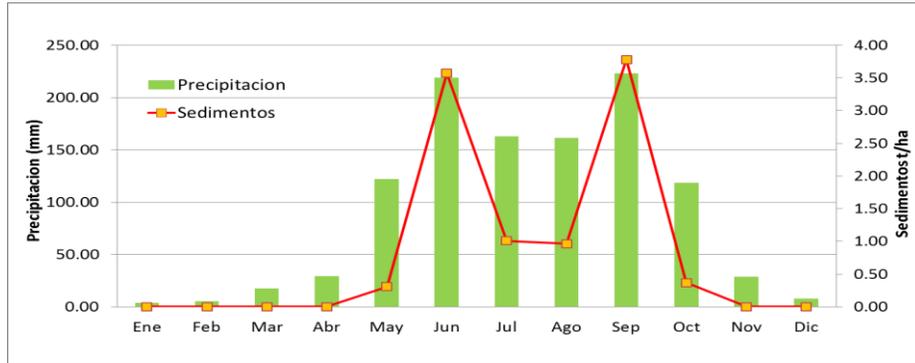
El volumen de agua que escurre en la cuenca del río Pixcayá es en promedio el 30 % del volumen precipitado. Los meses en los que se produce escorrentía es de mayo a octubre. La escorrentía máxima se produce en junio y septiembre, con valores cercanos a los 120 mm, como se puede observar en la figura 26.

Figura 26. **Comportamiento mensual de la precipitación y la generación de caudal**



Fuente: elaboración propia. 2014.

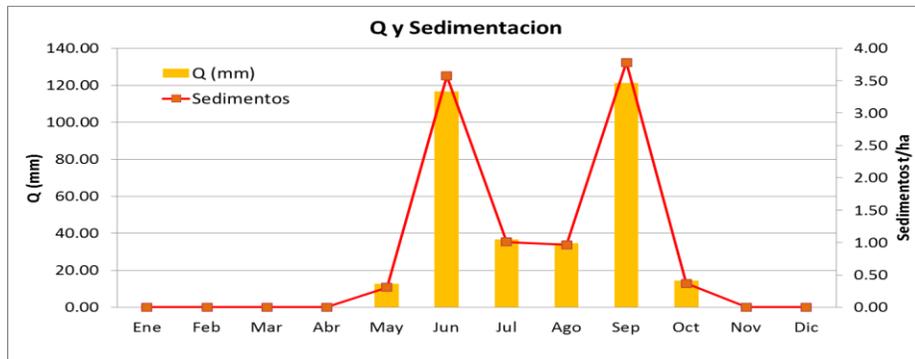
Figura 27. **Comportamiento mensual de la precipitación y la generación de sedimentos**



Fuente: elaboración propia. 2014.

La producción de sedimentos mensual tiene una relación directa con el volumen escurrido y, en los meses en los que se produce la mayor cantidad de sedimento es en junio y septiembre, con una producción estimada de 3,7 toneladas por hectárea.

Figura 28. **Comportamiento mensual de los caudales y la generación de sedimentos**



Fuente: elaboración propia. 2014.

4.7. Escenarios de manejo de la cuenca

Se generaron dos escenarios de manejo de la cuenca, para evaluar la respuesta que se tendría en cuanto al comportamiento de la erosión y la generación de sedimentos. Los escenarios establecidos corresponden a prácticas simples de manejo de recursos naturales, con énfasis en el recurso suelo y al uso de la tierra de acuerdo a su capacidad, a continuación se hace una descripción de los escenarios propuestos.

Los dos escenarios planteados se consideran como posibles de implementar, no se toman en cuenta otros escenarios más complejos en donde a corto o mediano plazo sea muy difícil que se pueda implementar. Sin embargo, es importante que el escenario que podría mostrar la tendencia actual fuera uno más negativo, especialmente, debido al cambio de uso de la tierra de los pocos remanentes de bosque, que aún permanecen en la cuenca hacia usos agrícolas.

- Escenario 1. Implementación prácticas de conservación de suelos

Uno de los factores que interviene en la estimación de la generación de erosión-sedimentos son las prácticas de conservación de suelos, por lo tanto se generó una capa con el factor P, el cual tiene influencia directa en las áreas cultivadas.

Se generó un mapa considerando las pendientes y los usos agrícolas (estos representan el 60 % 9,270 ha) finalmente se estima un factor P de la interacción de las variables (uso agrícola, pendiente y prácticas consideradas), un valor ponderado del factor P se presenta en la tabla XXVIII.

- Escenario 2. Considera el escenario 1 más cambio de uso de la tierra de acuerdo a la capacidad de uso

Se consideró la posibilidad de cambiar hacia bosques, las tierras que, de acuerdo al mapa de capacidad de uso de la tierra (figura 31), que tienen una categoría de F (forestal) y Fp (forestal de protección), y que actualmente se encuentran desprovistas de bosque. Además se consideró las acciones del escenario 1 (factor P).

El cambio de uso de la tierra que resultó, corresponde a 319 hectáreas con diferente usos de la tierra (diferente a bosque), y por consiguiente se tiene efecto en factores utilizados para el análisis como: factor C del cultivo y curva número CN. Los valores estimados se presentan en la tabla XXVIII. Los factores de C y curva número muestran una leve diferencia, ya que el área que se a de cambiar solo tiene incidencia en el 2 % del territorio.

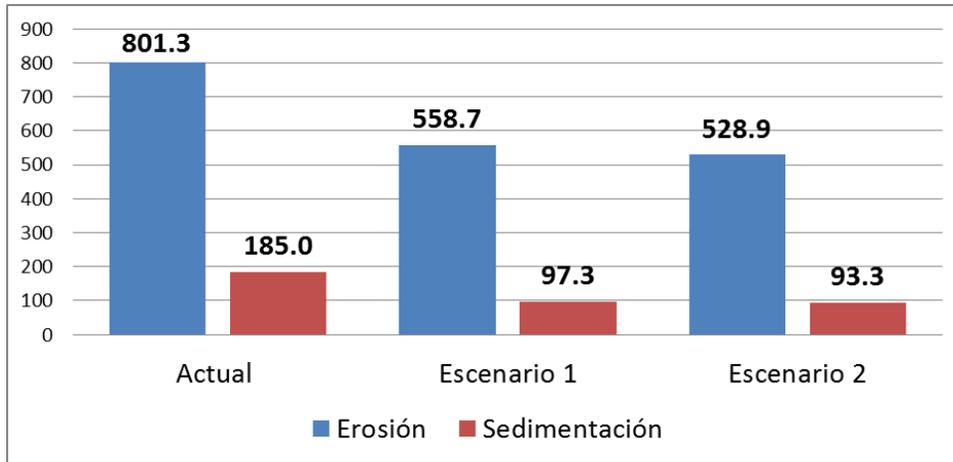
Tabla XXVIII. Factores que se consideraron en los escenarios

Microcuenca	Escenario actual			Escenario 1			Escenario 2		
	C	P	Curva número	C	P	Curva número	C	P	Curva número
Río Chicoj	0,21	11,00	71,15	0,21	0,66	71,15	0,21	0,66	71,06
Pixcaya Alto	0,10	11,00	76,91	0,10	0,88	76,91	0,09	0,88	76,60
Xetomax	0,20	11,00	77,26	0,20	0,75	77,26	0,18	0,75	76,81
Comalapa	0,22	11,00	77,39	0,22	0,63	77,39	0,22	0,63	77,31
Panabajal	0,28	11,00	72,96	0,28	0,56	72,96	0,28	0,56	72,87
Pacorral Bajo	0,29	11,00	72,69	0,29	0,56	72,69	0,28	0,56	72,49
Balanya Alto	0,36	11,00	71,00	0,36	0,36	57,00	0,36	0,36	55,00
Paxilon	0,32	11,00	74,88	0,32	0,47	74,88	0,32	0,47	74,77
Pixcaya Medio	0,19	11,00	72,40	0,19	0,67	72,40	0,19	0,67	72,40
Balanya Bajo	0,27	11,00	75,39	0,27	0,54	75,39	0,26	0,54	75,27
Río El Sitán	0,29	11,00	73,60	0,29	0,49	73,60	0,29	0,49	73,49
Yerbabuena	0,28	11,00	71,86	0,28	0,50	71,86	0,28	0,50	71,87
Pachoj	0,23	11,00	71,15	0,23	0,63	71,15	0,23	0,63	70,81
Pacorral Alto	0,27	11,00	69,63	0,27	0,63	69,63	0,26	0,63	68,90
Sochal	0,15	11,00	64,24	0,15	0,81	64,24	0,15	0,81	63,40
Esbaquiej	0,14	11,00	71,74	0,14	0,79	71,74	0,14	0,79	71,06
Pixcaya Bajo	0,06	11,00	56,85	0,06	0,90	56,85	0,06	0,90	56,52
Chuanimoche	0,12	11,00	65,70	0,12	0,81	65,70	0,11	0,81	65,07

Fuente: elaboración propia. 2014.

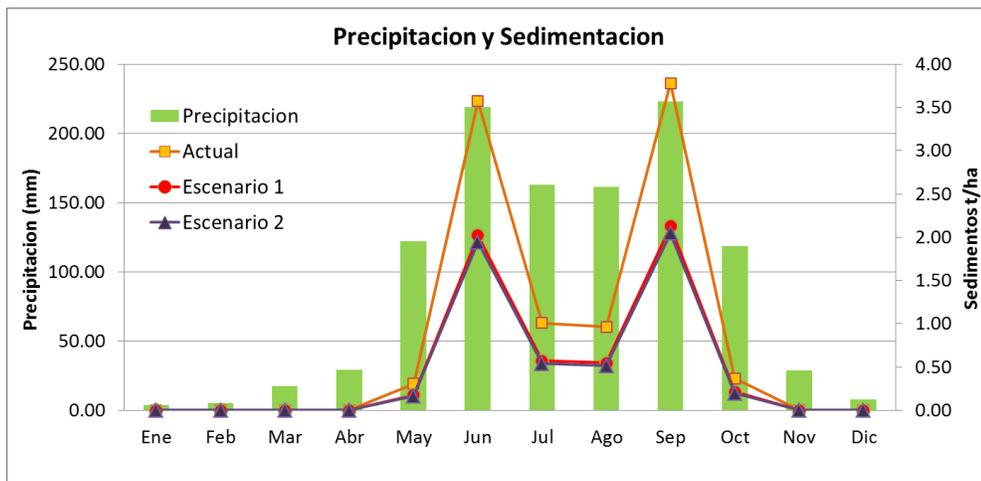
La comparación de los escenarios muestra el efecto que se tiene con la implementación de prácticas de conservación de suelos, en donde la reducción de la producción de sedimentos es aproximadamente el 50 %, simplemente con la consideración del factor P en las tierras de uso agrícola. Los resultados del escenario 2 muestran una reducción de 5 000 toneladas de sedimento por año (figura 29).

Figura 29. **Comparación de la erosión y producción de sedimentos anual, situación actual escenario 1 y escenario 2 (miles de toneladas por año)**



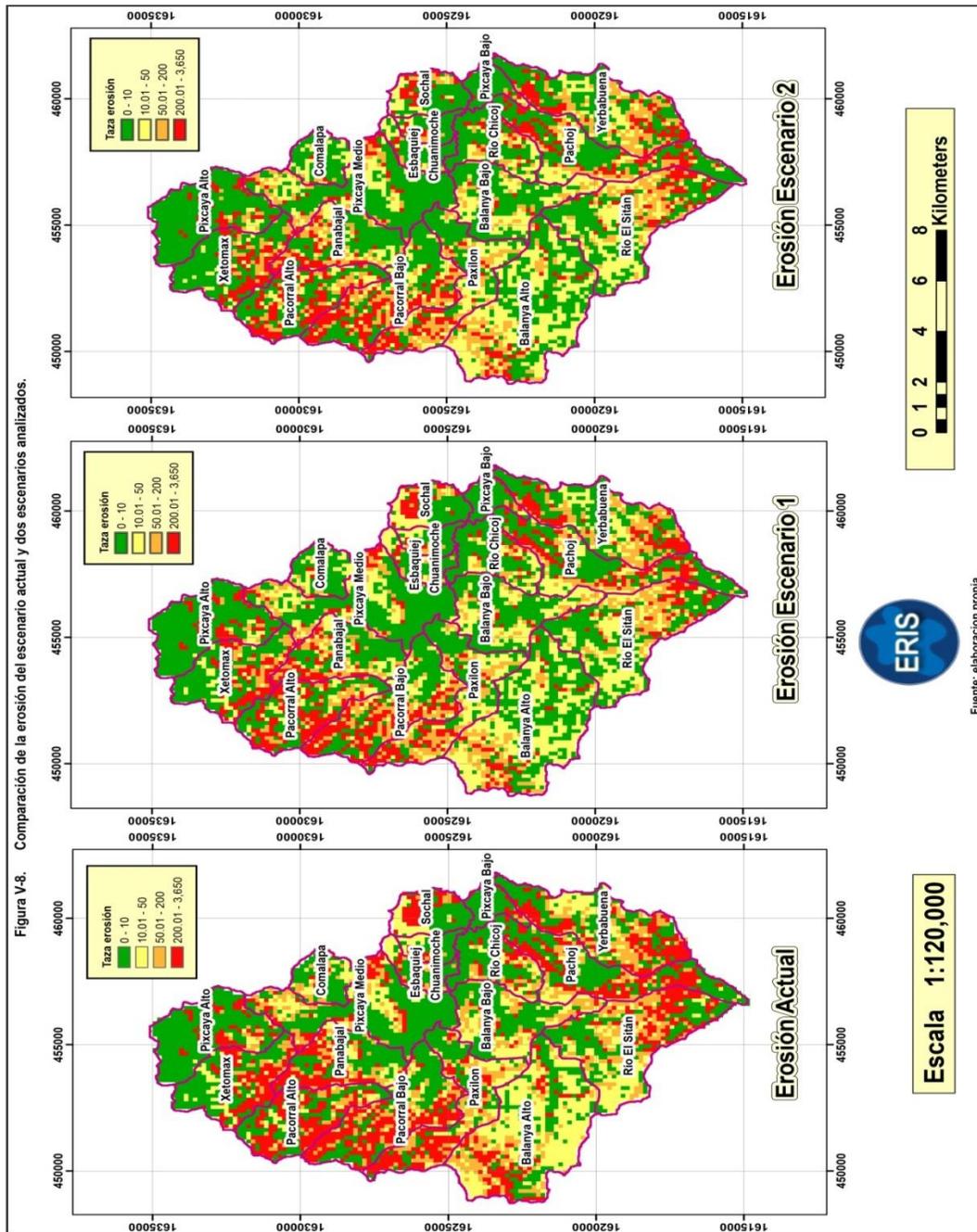
Fuente: elaboración propia. 2014.

Figura 30. **Producción mensual de sedimentos, situación actual y escenario 1 y escenario 2**



Fuente: elaboración propia. 2014.

Figura 31. Distribución de la erosión potencial de acuerdo a los escenarios de manejo



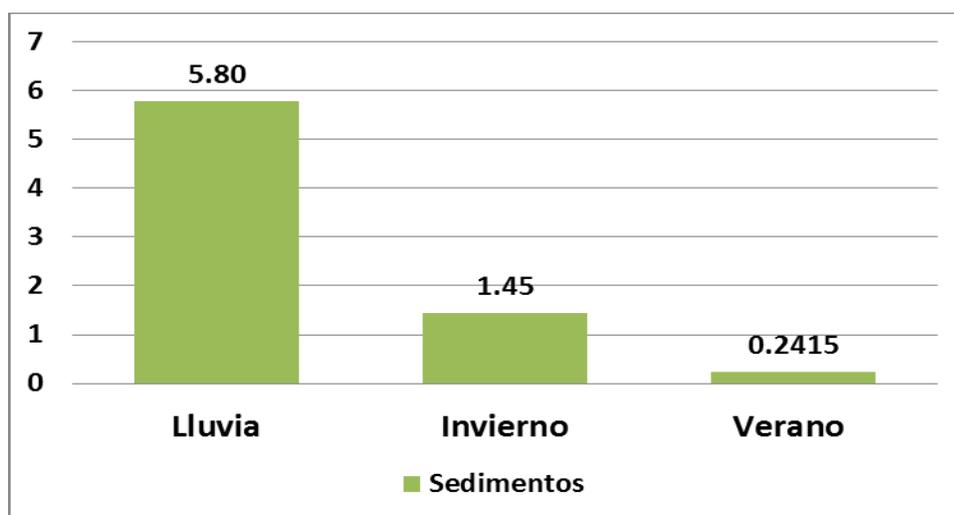
Fuente: elaboración propia. 2014

La producción de sedimentos guarda una estrecha correlación con las altas precipitaciones. La diferencia, entre implementar el escenario 1 y el escenario 2 a nivel mensual, no muestra una diferencia significativa (figura 31).

4.8. Consideraciones de la producción de sedimentos y la calidad del agua

En la cuenca, actualmente no se cuenta con registro de producción de sedimentos, por lo tanto, con base en la información proporcionada en el sitio de la presa por parte de los trabajadores y a la operación que se realiza del desarenador del sistema de conducción del proyecto Xayá-Pixcayá, se procedió a estimar la producción de sedimentos por día, variando desde cinco mil ochocientos metros cúbicos hasta doscientos cuarenta. El valor está fuertemente influenciado por los eventos de lluvia.

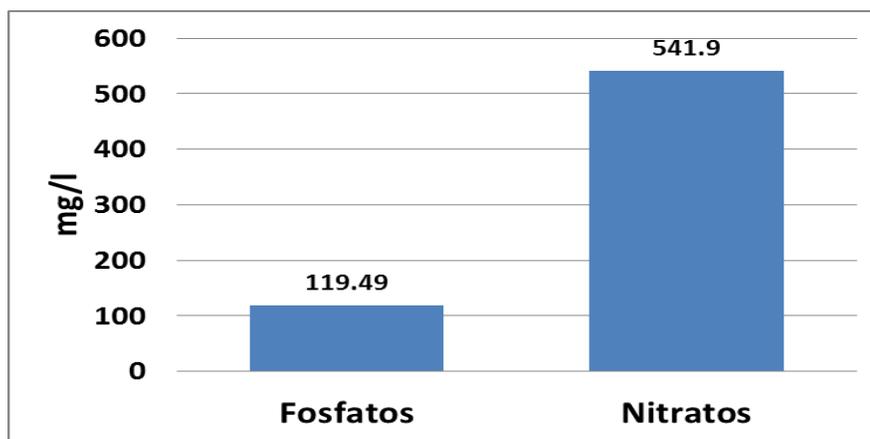
Figura 32. Producción diaria de sedimentos estimados en la presa El Tesoro, en miles



Fuente: elaboración propia. 2014.

De acuerdo a las características de la cuenca y al uso de la tierra (63 % agrícolas), se esperaría que los sedimentos presenten características relacionadas con dichas actividades. Para tener una referencia al respecto se procedió a tomar una muestra de los sedimentos acumulados en la unidad de sedimentación del sistema de tratamiento de potabilización de agua en la planta Lo de Coy. Se analizaron los parámetros principales relacionados con la utilización de nutrientes en agricultura, siendo estos: fosfatos y nitratos, ambos valores se encuentran elevados en comparación con los valores típicos de los sedimentos de los cuerpos lóticos (figura 33).

Figura 33. **Valores de nutrientes en sedimentos. (Planta de tratamiento Lo de Coy)**



Fuente: elaboración propia. 2014.

La calidad del agua para el punto de la presa El Tesoro, analizando los parámetros que pueden tener relación directa con la sedimentación, muestran valores distintos, esto puede estar relacionado con la época del año en la que se realizó el muestreo, para que se produzca una lluvia que lleve a formar escorrentía.

En el tabla XXIX se puede observar que los valores de turbiedad y color presentan valores muy diversos relacionados con el momento de la toma de muestra. Los valores de los nutrientes indican que el agua presenta niveles altos de nitratos, ya que los valores de máximos para determinar la calidad de agua superficial en países como Costa Rica y Perú es de 5 mg/L y 10 mg/L, respectivamente.

Tabla XXIX. **Calidad de agua en la presa El Tesoro**

Parámetro	26/11/2007	26/05/2008	16/07/2008	12/05/2011	16/11/2011	05/07/2012	16/11/2011	19/08/2013	21/11/2013	12/03/2014	06/08/2014
<i>COLOR</i> Unidades	50	26	153	72	3 450	29	3 450	57	80	53	145
<i>TURBIEDAD</i> UTN	41	12,6	156	81,1	2 475	12,8	2 475	13,9	26,5	10,1	49
<i>NITRATOS</i> mg/l	13,64	14,9	31,6	30,8	25,96	11	25,96	6,2	24	25	12,8
<i>FOSFATOS</i> mg/L					0,4	1	0,4				3,83

Fuente: Infom. 2014.

4.9. Lineamientos de manejo de la cuenca con fines de reducción de la erosión y la producción de sedimentos

Se establecen lineamientos básicos para el manejo de la cuenca del río Pixcayá confines de reducción de la erosión y los sedimentos, no es considerado el manejo integral de la cuenca, ya que para esto sería necesario el involucramiento de un equipo multidisciplinario y una amplia participación de los actores locales. Se plantean dos líneas de acción para el manejo de la cuenca, la primera tiene como propósito establecer los lineamientos para iniciar

con un programa de conservación de suelos y aguas, y el segundo define las acciones que se deben realizar para llevar a cabo un proceso que tenga como resultado un plan de manejo integrado de la cuenca del río Pixcayá.

El programa de conservación de suelos consiste en implementar una serie de acciones de manejo integrado de los cultivos y de prácticas, y obras de conservación de suelos y aguas, con el fin de reducir la erosión y la sedimentación.

El manejo de la cuenca requiere la consideración integral de los recursos naturales como: el agua, la vegetación, el suelo, la fauna y las interacciones con la población que habita en dicho territorio. Para el proceso de planificación del manejo de la cuenca es necesario considerar todos los elementos, procesos y actores que interactúan. Por lo tanto, es preciso desde un inicio establecer un mecanismo de participación que permita establecer la visión compartida del futuro de la cuenca.

4.10. Descripción de los planes de manejo de la cuenca del río Pixcayá

A continuación se describen los lineamientos de manejo de la cuenca alta del río Pixcayá con fines de reducción de la erosión y sedimentos.

4.10.1. Objetivo

- Implementar acciones de conservación de suelos en la cuenca del río Pixcayá, con fines de reducir la erosión y la sedimentación.
- Establecer un plan de manejo integrado de la cuenca del río Pixcayá.

4.10.2. Conservación de suelos

La conservación de suelos en la mayoría de las intervenciones a nivel de finca tiende a la implementación de medidas de manejo integrado de cultivo (MIC), más que a la implementación de obras de infraestructura, por lo tanto, el esfuerzo principal se encuentra en la extensión por medio del acompañamiento de los agricultores a nivel de la parcela durante períodos de tiempo, que permitan generar los cambios que se requiere a nivel de paisaje y, especialmente en la cultura de los agricultores, para que las prácticas y las medidas se incorporen de manera espontánea.

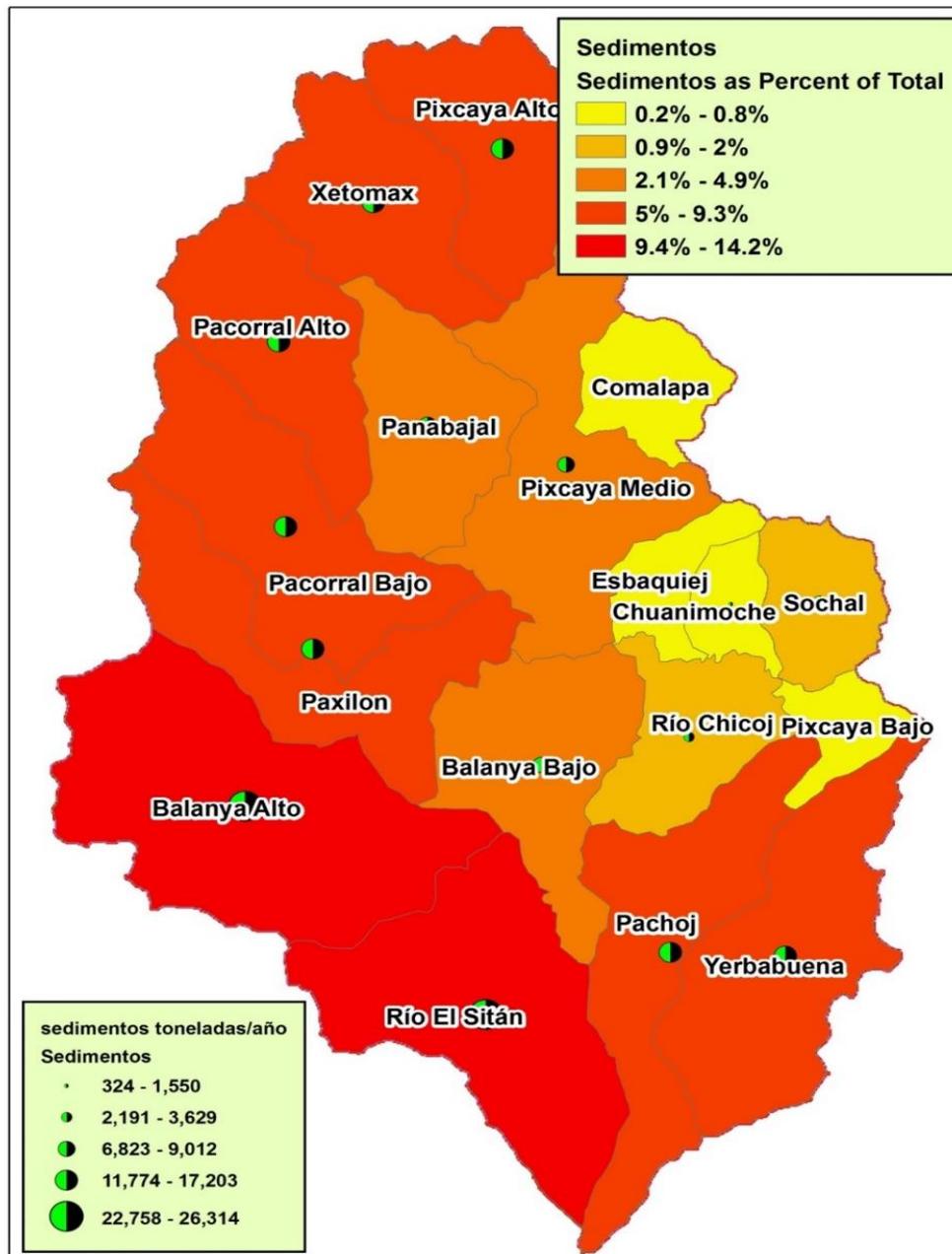
La importancia de implementar medidas y prácticas de conservación de suelos ha sido reconocida en diferentes estudios en donde se considera la degradación de los recursos naturales en Guatemala y en la cuenca del río Pixcayá, Granados (1983), Alvarado et al. (1988); sin embargo, hay una diferencia entre el conocer las técnicas *versus* el proceso de implementarlas a escala de microcuenca o paisaje.

En Guatemala, algunas experiencias puntuales, en donde se ha trabajado conservación de suelos a nivel de cambios en el paisaje, han permanecido en el tiempo; sin embargo, la mayoría de los proyectos en los cuales se ha trabajado a nivel de parcelas demostrativas, se ha visto que las prácticas no son replicadas, e incluso, en las mismas parcelas demostrativas se tienden a abandonar los trabajos realizados a los pocos años de su implementación.

Para tener un efecto significativo importante en la cuenca se priorizó la microcuenca en la que se podría tener los más altos beneficios de la implementación de prácticas de conservación de suelos en cuanto a la disminución de los sedimentos. La microcuenca del río Balanyá Alto es la que

tiene el mayor crédito en la reducción de la sedimentación, como resultado de implementar prácticas de conservación de suelos, ya que se tiene una reducción de 20,400 T/año. El programa de conservación de suelos se estaría implementando en un área de 1 712 hectáreas esto equivaldría, aproximadamente, unos 5 000 campesinos que deberán ser atendidos por el programa.

Figura 34. Priorización de microcuencas para reducción de sedimentación en la cuenca del río Pixcaya



Fuente: elaboración propia. 2014.

4.11. Acciones y procesos para la elaboración de un plan de manejo integrado de la cuenca

El plan de manejo integrado debe tener como eje central el agua y la importancia que esta tiene para el abastecimiento de la ciudad de Guatemala. En las relaciones y los intereses de los municipios y las comunidades que se encuentran dentro de la cuenca, las potencialidades del territorio y las características biofísicas, socioeconómicas y culturales prevaletes. A continuación se describen algunos de los lineamientos considerados para su abordaje.

4.11.1. Liderazgo

Se considera necesario el involucramiento de una organización que asuma el liderazgo de llevar a cabo el proceso, que cuente con la experiencia y el recurso humano permanente que pueda dar soporte al proceso. En este sentido se considera la experiencia que tiene el CATIE en la región centroamericana en el manejo de cuencas y recursos naturales, así como los vínculos en la asistencia técnica, investigación y formación de postgrados.

Desde el inicio del proceso hay que considerar el involucramiento de la ERIS, para apoyar el proceso desde el inicio, a la vez, de generar capacidades para el manejo, gestión y cogestión de cuencas. La participación de Empagua, definitivamente es una organización que debe estar desde la concepción de las ideas iniciales.

Este comité *petit* tendrá bajo su responsabilidad iniciar las acciones que lleven a la conformación de una mesa de concertación de la cuenca y a la definición de organizaciones locales en donde se privilegie la representatividad

de todos los actores en el proceso, puede ser organización por microcuencas u otras formas de organización del territorio que se consideren adecuadas para el desarrollo del plan de manejo.

4.11.2. Enfoque de hacer acciones a nivel de las parcelas más que la generación de documentos

La región centroamericana se ha visto abrumada en las últimas décadas por la generación de documentos para el manejo de cuencas y de esto poco se ha traducido en acciones en terreno. Por lo tanto, el enfoque del plan de manejo tendrá como prioridad el implementar las acciones en terreno como la conservación de suelos, y no solamente la generación de documentos de información. La célula del manejo de cuencas es la parcela (o el lote de la finca), por lo tanto se deben realizar las acciones a este nivel para tener resultados y efectos de las acciones implementadas.

4.11.3. Organización para la gestión y la implementación

Consistirá en definir el mejor esquema de organización de la cuenca, pudiendo seguir diferentes modelos, como el de contar con un comité básico, una unidad ejecutora mínima y la participación de una asamblea en donde se encuentren los diferentes actores. En esta organización es importante la participación de diferentes instituciones, organizaciones de gobierno y municipalidades, ya que la cuenca se encuentra en 8 municipios del departamento de Chimaltenango. Se puede considerar el involucramiento de autoridades de los organizaciones del gobierno central presentes en el departamento.

4.11.4. Análisis del territorio y definición del plan de manejo

Se realizará una caracterización y diagnóstico del territorio de manera integral y con amplia participación, en donde se definirán las acciones que se realizarán en la cuenca, la gestión integrada de los recursos naturales y el desarrollo de las poblaciones actuales y futuras.

Es importante tomar en cuenta las medidas para hacer un mejor uso del agua. Entre estas medidas y, considerando las condiciones del territorio, se debe evaluar la posibilidad de aprovechar las depresiones y sumideros naturales que se tienen en la cuenca para regular e incrementar la disponibilidad de las aguas subterráneas durante la época de estiaje.

Asimismo, considerar los diferentes usos del agua en la cuenca, abastecimiento humano, riego en la agricultura, esparcimiento y los valores ecológicos del agua.

4.11.5. Estrategia de implementación

Se definirá la forma para alcanzar los objetivos esperados del plan de manejo y las estrategias a seguir para la implementación de estos, así como, para lograr la participación e involucramiento interinstitucional requerido, como la participación activa de representantes de diferentes organizaciones del Estado, la asignación de presupuestos específicos para el financiamiento.

4.11.6. Costos del plan y posibles mecanismos de financiamiento

Se cuantificarán los costos de las acciones desde los gastos de la asistencia técnica para implementar prácticas de manejo integrado de cultivo MIC, como por ejemplo: el manejo de rastrojos, hasta la consideración de los costos de administración, monitoreo e investigación. Sin embargo, desde un inicio se deberán considerar los mecanismos de financiamiento y su factibilidad y voluntad política de implementación, a fin de que las acciones que se plantean se consideren realizables de acuerdo a las proyecciones de financiamiento que se tenga y no se cuente con un documento más, sin posibilidades reales de ejecutarse.

En promedio se obtienen 140 mil metros cúbicos de agua por día para la ciudad de Guatemala, por ejemplo, si se considerara cobrar un valor de 0,25 centavos por metro cúbico de agua consumida a los usuarios, se podría contar con unos 12,8 millones anuales para inversión anual en la cuenca (bajo el concepto de pago por servicios ambientales).

4.11.7. Institucionalidad, sostenibilidad del plan de gestión y generación de capacidades

Es necesario buscar la participación de todos los actores de la sociedad civil que contribuyan al éxito de la implementación de las acciones, así como la participación de las instituciones del Gobierno central, municipalidades y universidades. Es importante es el aprovechar este proceso para la generación de capacidades locales en el manejo y gestión de cuencas hidrográficas.

Estos procesos tienen que ser aprovechados para la generación de información científica, que permita el desarrollo de un manejo adaptativo por medio de la participación de estudiantes de posgrado, maestrías y doctorados, para que los resultados de esta investigación se pueda emplear en los ajustes requeridos para el manejo de la cuenca.

Dentro de las posibles líneas de investigación se visualiza la necesidad de evaluar el potencial de implementar dentro del programa de conservación de suelos y aguas; acciones que contribuyan a una mayor retención del agua precipitada, lo cual se puede realizar, ya sea por medio de la implementación de pequeñas fosas de sedimentación a nivel de las parcelas (cuerda), utilizar los sumideros naturales existentes y la implementación de pequeñas represas en puntos específicos.

Otro tema que merece especial atención es la calidad del agua en la cuenca, específicamente por ser una cuenca agrícola, es de esperar la contaminación por nutrientes y pesticidas. Debido a lo importante y estratégico de la cuenca para el abastecimiento de agua a la ciudad de Guatemala, es necesario profundizar la investigación que permita determinar el estado del recurso, y estos aspectos, y proponer las medidas a implementar para su reducción.

CONCLUSIONES

1. La cuenca del río Pixcayá tiene un área de 156 km², el uso predominante es la agricultura, la cual cubre el 63,15 % de la cuenca. La densidad de población es de 291 habitantes/km², el 65 % de la población depende de la agricultura para la generación de ingresos.
2. El escurrimiento medio mensual de la cuenca es de 5,4 millones de m³. La parte media de las microcuencas localizadas hacia al noreste de la cuenca tienen un alto potencial de infiltración y, por consiguiente, de regulación de caudales en la época de estiaje.
3. El valor de erosividad en la cuenca del río Pixcayá, factor R (6,432 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹*año⁻¹), es relativamente bajo de acuerdo con los valores reportados por Bravo et al. (1989), quienes presentan valores para Guatemala desde 2 000 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹*año⁻¹, hasta 34 000 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹*año⁻¹.
4. El valor medio de la erosión potencial en la cuenca del río pixcayá es de 120 (T*Ha⁻¹año⁻¹), el cual se encuentra expresado, principalmente por dos factores: topografía (factor LS) y uso de la tierra (factor C). Los C valores de máxima erosión se presentan en sitios en donde coinciden los usos agrícolas con un elevado factor topográfico. La lámina media de suelo perdido por año equivale a 9,2 mm por año, esto a largo plazo tendrá un efecto negativo en la productividad de los suelos
5. Un tercio de los suelos corresponden al uso de la tierra de granos básicos: el cual aporta un total de 255 mil toneladas por año de

sedimentos, conformado principalmente por cultivos de maíz y frijol en asocio.

6. La erosión potencial presente en la cuenca es diez veces mayor que el LPE, estando en un proceso de deterioro el recurso suelo y todos los elementos relacionados con dicho recurso.
7. La erosión y la producción de sedimentos se puede disminuir en un 50 % con la implementación de prácticas y obras de conservación de suelos.
8. El plan de manejo integrado de la cuenca del río Pixcayá debe ser abordado con la participación de las organizaciones con presencia e intereses en la cuenca, para garantizar que las acciones se mantengan a largo plazo y no solamente respondan a un programa específico.

RECOMENDACIONES

1. Al momento de iniciar un programa enfocado a la reducción de los sedimentos y la contaminación del agua en la cuenca, es necesario considerar los aspectos sociales, económicos, gobernabilidad, financiamiento, entre otros. Para cada una de las actividades planteadas es conveniente realizar el análisis costo efectividad de las medidas de conservación de recursos naturales.
2. Evaluar la posibilidad de considerar dentro del programa de conservación de suelos la incorporación de medidas tendientes a la infiltración y alimentación del acuífero, para una mejor regulación de los caudales en la época de estiaje.
3. Que el presente modelo de análisis de la erosión con enfoque de cuenca sea adoptado por instituciones responsables en el manejo de temas relacionados con la gestión de recursos naturales y la protección ambiental, así como por universidades y centros de investigación para hacer análisis de la erosión y la producción de sedimentos a nivel de cuenca.
4. Calibrar el modelo para esta cuenca por medio de estaciones meteorológicas y la medición de caudales líquidos y sólidos en la presa El Tesoro, con lo cual se podrán adaptar mejores criterios al momento de definir los parámetros que intervienen en el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARGUETA, Juan Carlos. *Estimación de los riesgos y niveles de erosión hídrica en la microcuenca del río Negro, Chimaltenango*. Trabajo de graduación de Ing. agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 2010. 105 p.
2. Asociación Guatemalteca de Exportadores. *Comisión de arveja y vegetales*. [en línea] <http://export.com.gt/sectores/comision-de-arveja-y-vegetales/> [Consulta: 18 de mayo de 2014].
3. ALVARADO, Gilberto., et.al. *Diagnóstico, subcuencas prioritarias piloto Xayá Pixcayá. Guatemala: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 1988. 190 p.*
4. _____; HERRERA, Isaac. *Mapa fisiográfico-geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1:250,000*. Memoria Técnica. Guatemala: MAGA, 2001. 117 p.
5. ARANA, Gustavo. *Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, en el municipio de Santa María Magdalena, departamento de Sacatepequez*. Guatemala. Tesis Maestría. Turrialba, CR CATIE. 1992. 64 p.

6. ARNOLDUS, H.; BOODT, M. D.; GABRIELS, D. *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. Assessment of erosion.* 1980. 132 p.
7. BARRIOS, José.; MELLOR, John. *Distribución sectorial del crecimiento del empleo en el altiplano guatemalteco.* Serie de documentos técnicos. Guatemala: URL-IARNA, SEGEPLAN. 2006. 84 p.
8. BENNETT, James. *Concepts of mathematical modeling of sediment yield.* Water Resources Research, 1974. 492 p.
9. BRAVO, Marco.; CHONAY, José.; GONZÁLEZ, Allan. *Estudio preliminar de la erosividad de las lluvias en la república de Guatemala.* Tikalia. Núm. 14 , 1989. 108 p.
10. CASTELLANOS, Edwin. *Cómo estará el entorno ambiental en Guatemala en las siguientes décadas.* Revista Investigaciones Universidad del Valle Núm. 26, 2013. 55 p.
11. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza, THE NATURE CONSERVANCY. *Análisis de vulnerabilidad al cambio climático del caribe de Belice, Guatemala, Honduras y el Salvador.* CATIE, 2012. 68 p.
12. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Esprede, Programa de Emergencias por Desastres Naturales, Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Memoria: Base de datos digital de la República de Guatemala a escala 1:250,000.* Guatemala: MARN, 2001. 144 p.

13. Comisión Económica para América Latina. Secretaría de Planificación y Programación. *Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan*. Guatemala: Segeplan, 2005. 121 p.
14. Comisión Europea. *Cambio climático y degradación de los suelos en América Latina: escenarios, políticas y respuestas*. edited by P. Bruselas, Bélgica: EUROCLIMA. Edtion ed., 2013. 192 p.
15. Conferencia Internacional sobre Población y Desarrollo. *Informe nacional de la encuesta mundial de avances del programa de acción de la conferencia internacional sobre población y desarrollo*. Guatemala: 2013. 26 p.
16. CISNEROS, José. et. al. *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. Argentina: Unrío Editora, 2012. 290 p.
17. FLORES, Hugo. et. al. *Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán. Jalisco, México*: Terra Latinoamericana, Núm. 21, 2003. 244 p.
18. FOURNIER, Frederic. *Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques: Presses universitaires de France*. 1960. 113 p.
19. GONZÁLEZ, Allan. *Determining agricultural soil erosion and conservation in a mountain watershed in Guatemala*. Tesis Doctoral, Colorado State University, United State. 1994. 93 p.

20. HERRERA, José Luis. *Estado del clima y de la calidad del aire en Guatemala*. Guatemala: Instituto de Incidencia Ambiental, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, 2003. 95 p.
21. Instituto de Agricultura y Recursos Naturales. *Perfil ambiental de Guatemala 2008-2009. las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. Guatemala: 2a ed. 2009. 320 p.
22. Instituto Nacional de Bosques. *Metodología de clasificación de tierras por capacidad de uso*. In. Guatemala, 1997, p. 96.
23. JOHNSON, Leonard. *Soil loss tolerance: Fact or myth. Journal of Soil and Water Conservation*. 1987. 160 p.
24. KIRBY, M.; R. MORGAN. *Erosión de suelos*. México: Limusa, 1984.
25. LEÓN, J. *Estudio y control de la erosión hídrica*. Documento de trabajo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2001.
26. LIANES, Elena.; MARCHAMALO, Miguel.; SORIANO, Margarita. *Evaluación del factor C de la rusle para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís*. Costa Rica: Agronomía costarricense:, 2009. 235 p.
27. LOMBARDI NETO, Francisco., & MOLDENHAUER, Willian. Calvin. *Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)*. *Bragantia*: 51(2), (1992). 189-196 p.

28. LOREDO-OSTI, Catarina.; BELTRAN, Sergio.; MORENO, Francisco.; CASIANO, Marcos. *Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*. México: INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. Libro Técnico Núm. 3. 2009. 225 p.
29. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Chimaltenango*. Guatemala: Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol. I. Guatemala. 2010. 145 p.
30. _____. *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala (incluye 5 cultivos permanentes actualizados al año 2005)*. Guatemala: MAGA. Memoria Técnica. 2006. 210 p.
31. MARTÍN, José. *La geomorfología en los estudios del medio físico y planificación territorial: propuesta metodológica y aplicación a un sector del Sistema Central*. Tesis de doctorado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. 1997. 102 p.
32. MEDINA, Camilo. *Modelos numéricos y teledetección en el lago de Izabal. Guatemala*. España: Universidad de Cadiz, España. Doctorado 2009. 330 p.

33. MELÉNDEZ, Violeta. Beatriz. *Evaluación de la pérdida de suelo por erosión en el cultivo de macadamia (Macadamia integrifolia), finca Mocá Grande, Suchitepéquez, Guatemala. Licenciatura en Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 32 p.*
34. MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN. *Review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, 18(8–9), 761-799. [en línea] [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1). A. J. A. 2003.*
35. MORGAN, Royston. *Soil erosion and conservation*. Edtion ed.: John Wiley & Sons. ISBN 140514467X. 2009.
36. MOTTA, Julio. *Estudio de la erosión hídrica del suelo, microcuenca del río Itzapa, Chimaltenango, de 1994 a 1996*. Guatemala Trabajo de graduación de Ing. agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1999. 85 p.
37. Municipalidad de Guatemala. *Sistema Xayá Pixcayá y Plana de Tratamiento Lo de Coy*. Retrieved 10/05/2014, 2014. [en línea] <http://mu.muniguate.com/index.php/component/content/article/40-empagua/48-xayapixcayacoy>. 2014.
38. ONGLEY, Edwin. *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Food & Agriculture Org., 1997. ISBN 9253038756.

39. Programa de las Naciones Unidas para la Agricultura la Alimentación. *Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente. metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos.* Roma,1980. 85 p.
40. QUIÑÓNEZ, Gerardo. Osvely. *La degradación del suelo por erosión hídrica en cultivos de granos básicos y café en la microcuenca Torjá, cuenca del río Grande de Zacapa, Guatemala.* Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica: CATIE, 2012. 205 p.
41. RENARD, Kenneth.; FOSTER, George.; WEESIES, Gleann.; MCCOOL, DK., YODER, DC. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation* Washington: RUSLE. Agriculture Handbook Núm. 703. 1997. 203 p.
42. ROSALES, Marvin. *Disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en la cuenca del río Pixcayá, desde el puento Comalapa hasta la Finca El Tesoro, Chimaltenango Guatemala.* Maestría, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 2005. 123p.
43. SÁNCHEZ, Javier. *Cálculo de la evapotranspiración potencial mediante la fórmula de Hargreaves.* España: Universidad de Salamanca. [en línea] <http://hidrologia.usal.es>. 2008. 8 p.

44. SERRATOS ÁLVAREZ, Pedro. *Clasificación fisiográfica del terreno a partir de la inclusión de nuevos elementos conceptuales*. Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía. 2009, vol 14, Núm. 1, 2009. 218. p.
45. STATA CORP. *Stata data analysis and statistical Software*. Special Edition Release, 10. 2007.
46. SUÁREZ DE CASTRO, F., B. RAMAKRISHNA, S. DORESTE, J. BELTRÁN, et al. *Conservación de suelos*. 1980. 1027-2631.
47. THORNTON, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical review. 1948. 66 p.
48. TOBIAS, Hugo. *Estado del recurso suelo en Guatemala, prioridades y necesidades para su manejo sostenible*. Guatemala: 2013. 105 p.
49. VELÁSQUEZ, Sergio. Manual del curso: *Erosión de suelos utilizando la RUSLE*. Costa Rica: CATIE. 2008. 54 p.
50. VILLA, O. S. *Modelación de la erosión hídrica a escala de cuenca en la zona alta de la quebrada la garcía, municipio de Bello, Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. 2012. 95 p.
51. WILLIAM, Naviditi. *Estadística para ingenieros y científicos*. México: McGraw-Hill, 2006.

52. WILLIAMS, JR. *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models*. IAHS Publ, 1977. 179 p.
53. _____. *The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series B: Biological Sciences, 329 (1255), 421-428. 1990.
54. WISCHMEIER, Walter; SMITH, Dwight David. *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*. 1978.
55. ZHANG, X.; B. WU, F. LING, Y. ZENG, et al. *Identification of priority areas for controlling soil erosion*. *Catena*, 2010, 83(1), 86 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Variables climáticas, hidrológicas de la cuenca del río Pixcayá**

A continuación se presentan las siguientes tablas:

1. Lluvia
2. ETP
3. Q mm
4. Qp
5. Resultados del análisis estadístico de comparación de medias entre la erosión potencial y el límite de erosión permisible

Tabla 1. Lluvia

Microcuenca	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Río Chicoj	3.0	4.3	16.7	24.9	114.6	199.3	146.6	143.9	200.8	103.7	24.7	6.7	989.30
Pixcaya Alto	3.1	5.1	16.6	33.9	133.1	237.6	187.9	188.1	238.1	142.5	33.9	9.3	1,229.12
Xetomax	3.4	5.5	17.1	33.5	132.8	239.2	185.5	186.8	238.5	142.7	34.2	9.5	1,228.60
Comalapa	2.5	4.2	16.7	29.3	124.4	214.1	164.3	162.6	210.0	122.7	29.2	7.7	1,087.82
Panabajal	3.1	5.2	17.9	30.4	126.2	222.9	166.6	167.6	217.9	127.6	30.8	8.2	1,124.40
Pacorral Bajo	3.7	6.3	18.7	31.5	127.5	232.0	167.7	170.2	229.5	129.4	31.9	8.4	1,156.86
Balanaya Alto	5.2	8.7	20.4	35.8	130.0	251.2	174.5	177.9	261.2	129.2	33.3	8.3	1,235.64
Paxilon	4.0	6.7	19.1	31.5	125.9	231.2	164.6	167.0	231.3	124.7	31.1	8.0	1,145.01
Pixcaya Medio	2.7	4.6	17.5	28.9	123.2	213.2	160.5	160.0	207.7	120.8	28.9	7.7	1,075.57
Balanaya Bajo	3.7	5.4	18.0	27.5	118.3	211.4	153.1	152.6	214.2	110.1	26.9	7.1	1,048.39
Río El Sitán	6.3	8.4	18.9	33.9	123.4	244.1	176.1	174.3	274.0	118.2	30.0	7.9	1,215.58
Yerabuena	4.5	5.1	14.6	23.7	109.5	205.4	152.5	145.7	230.1	96.9	22.8	6.6	1,017.36
Pachoj	5.0	6.0	16.4	27.0	114.7	216.6	159.7	155.1	240.3	105.0	25.4	7.0	1,078.24
Pacorral Alto	3.5	6.0	17.9	32.5	130.9	237.3	177.5	179.8	235.0	138.1	33.5	9.2	1,201.23
Sochal	2.4	3.5	15.6	24.9	116.0	197.3	148.5	143.6	197.4	105.4	24.6	6.8	986.13
Esbaquej	2.5	4.1	17.1	26.5	118.5	202.0	150.7	148.7	196.5	110.9	26.4	7.0	1,010.74
Pixcaya Bajo	2.8	3.6	14.9	22.8	111.6	193.1	143.8	137.8	199.1	97.9	22.7	6.5	956.42
Chuanimoche	2.5	3.8	16.5	25.5	116.8	198.7	148.5	145.4	195.3	107.5	25.4	6.9	992.89

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. **ETM**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Río Chicoj	3.0	4.3	16.7	24.9	114.6	199.3	146.6	143.9	200.8	103.7	24.7	6.7	989.30
Pixcaya Alto	3.1	5.1	16.6	33.9	133.1	237.6	187.9	188.1	238.1	142.5	33.9	9.3	1,229.12
Xetomax	3.4	5.5	17.1	33.5	132.8	239.2	185.5	186.8	238.5	142.7	34.2	9.5	1,228.60
Comalapa	2.5	4.2	16.7	29.3	124.4	214.1	164.3	162.6	210.0	122.7	29.2	7.7	1,087.82
Panabajal	3.1	5.2	17.9	30.4	126.2	222.9	166.6	167.6	217.9	127.6	30.8	8.2	1,124.40
Pacorral Bajo	3.7	6.3	18.7	31.5	127.5	232.0	167.7	170.2	229.5	129.4	31.9	8.4	1,156.86
Balanya Alto	5.2	8.7	20.4	35.8	130.0	251.2	174.5	177.9	261.2	129.2	33.3	8.3	1,235.64
Paxilon	4.0	6.7	19.1	31.5	125.9	231.2	164.6	167.0	231.3	124.7	31.1	8.0	1,145.01
Pixcaya Medio	2.7	4.6	17.5	28.9	123.2	213.2	160.5	160.0	207.7	120.8	28.9	7.7	1,075.57
Balanya Bajo	3.7	5.4	18.0	27.5	118.3	211.4	153.1	152.6	214.2	110.1	26.9	7.1	1,048.39
Río El Sitán	6.3	8.4	18.9	33.9	123.4	244.1	176.1	174.3	274.0	118.2	30.0	7.9	1,215.58
Yerabuena	4.5	5.1	14.6	23.7	109.5	205.4	152.5	145.7	230.1	96.9	22.8	6.6	1,017.36
Pachoj	5.0	6.0	16.4	27.0	114.7	216.6	159.7	155.1	240.3	105.0	25.4	7.0	1,078.24
Pacorral Alto	3.5	6.0	17.9	32.5	130.9	237.3	177.5	179.8	235.0	138.1	33.5	9.2	1,201.23
Sochal	2.4	3.5	15.6	24.9	116.0	197.3	148.5	143.6	197.4	105.4	24.6	6.8	986.13
Esbaquej	2.5	4.1	17.1	26.5	118.5	202.0	150.7	148.7	196.5	110.9	26.4	7.0	1,010.74
Pixcaya Bajo	2.8	3.6	14.9	22.8	111.6	193.1	143.8	137.8	199.1	97.9	22.7	6.5	956.42
Chuanimoche	2.5	3.8	16.5	25.5	116.8	198.7	148.5	145.4	195.3	107.5	25.4	6.9	992.89

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. QMM

Microcuenca	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Río Chicoj	0.0	0.0	0.0	0.0	52.1	138.1	82.3	77.5	140.1	45.6	0.0	0.0	535.57
Pixcaya Alto	0.0	0.0	0.0	0.0	73.8	179.4	127.2	126.1	181.7	88.5	0.0	0.0	776.62
Xetomax	0.0	0.0	0.0	0.0	72.8	180.9	124.4	124.4	181.8	88.2	0.0	0.0	772.53
Comalapa	0.0	0.0	0.0	0.0	63.6	154.2	101.8	98.3	151.5	66.7	0.0	0.0	636.09
Panabajal	0.0	0.0	0.0	0.0	64.7	162.9	103.6	102.7	158.7	70.8	0.0	0.0	663.29
Pacorral Bajo	0.0	0.0	0.0	0.0	66.0	172.3	104.9	105.5	170.4	72.7	0.0	0.0	691.78
Balanya Alto	0.0	0.0	0.0	0.0	68.5	191.7	111.8	113.2	202.2	72.6	0.0	0.0	759.91
Paxilon	0.0	0.0	0.0	0.0	64.3	171.5	101.6	101.9	171.8	67.7	0.0	0.0	678.77
Pixcaya Medio	0.0	0.0	0.0	0.0	61.4	152.7	97.1	94.6	147.9	63.6	0.0	0.0	617.28
Balanya Bajo	0.0	0.0	0.0	0.0	55.8	150.5	89.0	86.1	153.4	51.9	0.0	0.0	586.63
Río El Sitán	0.0	0.0	0.0	0.0	62.3	184.9	113.8	110.3	215.7	62.3	0.0	0.0	749.31
Yerbabuena	0.0	0.0	0.0	0.0	49.0	145.8	90.2	82.0	172.2	41.5	0.0	0.0	580.67
Pachoj	0.0	0.0	0.0	0.0	53.7	157.0	97.2	90.9	181.9	49.0	0.0	0.0	629.74
Pacorral Alto	0.0	0.0	0.0	0.0	70.2	178.5	115.7	116.4	177.4	82.7	0.0	0.0	740.88
Sochal	0.0	0.0	0.0	0.0	55.1	137.2	85.8	79.3	138.7	49.3	0.0	0.0	545.41
Esbaquej	0.0	0.0	0.0	0.0	56.3	141.1	86.8	82.8	136.3	53.2	0.0	0.0	556.50
Pixcaya Bajo	0.0	0.0	0.0	0.0	49.8	131.9	79.8	72.3	139.4	41.0	0.0	0.0	514.14
Chuanimoche	0.0	0.0	0.0	0.0	54.8	137.8	84.6	79.6	135.3	50.0	0.0	0.0	541.99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Qp

Microcuenca	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Río Chicoj	-	-	-	-	2.44	31.83	7.67	6.72	32.45	1.62	-	-
Pixcaya Alto	-	-	-	-	3.56	20.34	9.34	9.21	20.66	5.03	-	-
Xetomax	-	-	-	-	3.01	17.49	7.74	7.74	17.60	4.31	-	-
Comalapa	-	-	-	-	0.57	3.56	1.38	1.30	3.49	0.63	-	-
Panabajal	-	-	-	-	1.66	13.54	4.44	4.37	13.10	2.05	-	-
Pacorral Bajo	-	-	-	-	2.73	23.15	7.19	7.26	22.83	3.41	-	-
Balanya Alto	-	-	-	-	2.76	79.87	13.71	14.16	86.26	3.50	-	-
Paxilon	-	-	-	-	2.87	22.80	7.18	7.21	22.86	3.22	-	-
Pixcaya Medio	-	-	-	-	2.34	20.52	6.35	6.04	19.69	2.55	-	-
Balanya Bajo	-	-	-	-	1.63	14.80	4.37	4.10	15.17	1.36	-	-
Río El Sitán	-	-	-	-	4.28	43.04	14.56	13.77	51.93	4.27	-	-
Yerbabuena	-	-	-	-	1.34	21.18	5.91	4.85	26.27	0.79	-	-
Pachoj	-	-	-	-	2.14	30.22	8.69	7.59	36.52	1.63	-	-
Pacorral Alto	-	-	-	-	1.65	14.91	4.86	4.91	14.79	2.43	-	-
Sochal	-	-	-	-	0.16	3.22	0.64	0.52	3.27	0.10	-	-
Esbaquej	-	-	-	-	3.54	36.45	9.78	8.85	34.81	3.03	-	-
Pixcaya Bajo	-	-	-	-	0.25	26.98	2.95	2.04	29.51	0.01	-	-
Chuanimoche	-	-	-	-	2.26	39.43	8.05	6.91	38.40	1.60	-	-

Fuente: elaboración propia.

