



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES MORFOPEDOLÓGICO Y
CUENCA EN LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA CON
USLE.**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA



Presenta:

ROSA MARTHA MEDINA HERNANDEZ

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
CENTRO DE SERVICIOS ESCOLARES
CARRERA DE INGENIERIA AGRICOLA

Bajo la supervisión de:

DR. LAMINE DIAKITE D.



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2016

**COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES MORFOPEDOLOGICO Y CUENCA EN
LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA CON USLE.**

Tesis realizada por Rosa Martha Medina Hernández bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

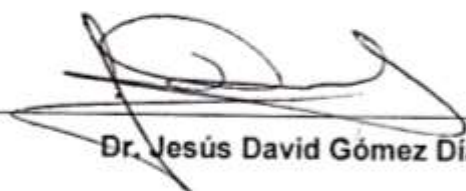
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



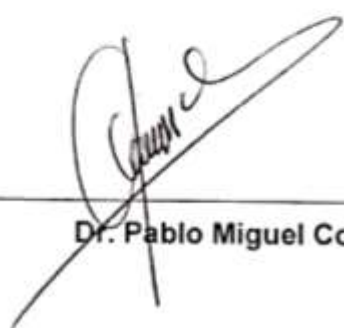
DR. Lamine Diakite Diakite

ASESOR:



Dr. Jesús David Gómez Díaz

ASESOR:



Dr. Pablo Miguel Coras Merino

Chapingo, México Diciembre de 2016.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ANEXOS	VIII
DEDICATORIA	X
AGRADECIMIENTOS	XI
DATOS BIOGRÁFICOS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Estimación de la erosión actual (E_a) y potencial (E_p).	3
2.2 Calculo del factor erosividad (R)	4
2.2.1. Método de la razón normal	5
2.3 Calculo del factor erodabilidad del suelo (K)	7
2.4 Calculo del factor L_s	8
2.5 Calculo del factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).	9
2.6 Calculo del factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P)	10
3. ARTÍCULO CIENTÍFICO	11
RESUMEN	12

ABSTRACT	12
3.1 Introducción	13
3.2 Materiales y métodos	14
3.3 Material cartográfico	17
3.4 Software para procesamiento digital	17
3.5 Metodología	18
3.6 Resultados	24
3.6.1. Clasificación de la imagen de satélite	28
3.6.2. Cálculo de la erosión actual y potencial con el enfoque Morfopedológico	28
3.6.3. Cálculo de la erosión actual y potencial con el enfoque de cuenca.	36
3.7. Literatura citada	45
4. ANEXOS	47

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Regiones de acuerdo a Cortes 1991, para la isoerosividad del suelo.	4
Cuadro 2 Lista de estaciones meteorológicas, su ubicación, la precipitación anual promedio y la zona a la que corresponde de acuerdo a Cortes 1991.....	6
Cuadro 3 Valores del factor C de algunos cultivos y labranza.....	9
Cuadro 4 Valores de P, para el contorno y el cultivo en surcos (Wishmeier y Smith, 1978).....	10
Cuadro 5 Valores de P, para prácticas combinadas (Wishmeier y Smith, (1978) y USDA-ARS (1997)).	10
Cuadro 6 Ecuaciones para cálculo de la Erosividad (R)	20
Cuadro 7 Características de las Unidades Morfopedológicas.	24
Cuadro 8 Algunas características de las microcuencas.....	26
Cuadro 9 Comparación de la erosión actual y potencial de acuerdo a la morfopedología.	33
Cuadro 10 Comparación de la erosión actual y potencial de acuerdo al enfoque de cuenca.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	15
Figura 2 Mapa de geología presente en el área de estudio.....	16
Figura 3 Metodología para la obtención de la Erosión de acuerdo al enfoque Cuenca y Morfopedológico.	18
Figura 4 Unidades cartográficas del área de estudio.....	23
Figura 5 Subdivisión de las Unidades Morfopedológicas.....	26
Figura 6 Subdivisión de las microcuencas.	28
Figura 7. Factor de erosividad de la lluvia, por unidad morfopedológica.	29
Figura 8. Factor de erodabilidad del suelo, por unidad morfopedológica.....	30
Figura 9. Factor de longitud y grado de pendiente, por unidad morfopedológica.	31
Figura 10. Factor de cobertura del suelo, por unidad morfopedológica.	32
Figura 11. Factor de prácticas de conservación de suelo, por unidad morfopedológica.	32
Figura 12. Erosión Actual del suelo, por unidad morfopedológica.	34
Figura 13. Erosión Potencial del suelo, por unidad morfopedológica.	35
Figura 14. Factor de erosividad de la lluvia, por microcuenca.	36
Figura 15. Factor de erodabilidad del suelo, por microcuenca.....	37
Figura 16. Factor de longitud y grado de pendiente, por microcuenca.	38

Figura 17. Factor de cobertura del suelo, por microcuenca.....	39
Figura 18. Factor de prácticas de conservación de suelo, por microcuenca. ..	39
Figura 19. Erosión actual del suelo, por microcuenca.	41
Figura 20. Erosión potencial del suelo, por microcuenca.....	42

ANEXOS

Anexo 1 Factor Erosividad (R), de acuerdo a la estación meteorológica.....	47
Anexo 2. Factor Erosividad (R), de acuerdo al enfoque morfopedológico	48
Anexo 3. Factor Erosividad (R), de acuerdo al enfoque cuenca.....	48
Anexo 4 Factor Erodabilidad del suelo (K), de acuerdo al enfoque morfopedológico.	49
Anexo 5 Factor Erodabilidad del suelo (K), de acuerdo al enfoque de cuenca.	50
Anexo 6 Factor LS, para el enfoque morfopedológico.	51
Anexo 7 Factor LS, para el enfoque de cuenca.....	52
Anexo 8 Cálculo del Factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).para el enfoque Morfopedológico.....	54
Anexo 9 Cálculo del Factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).para el enfoque de cuenca.....	55
Anexo 10 Factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P), para el enfoque morfopedológico.	55
Anexo 11 Factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P), para el enfoque de cuenca.	56
Anexo 12 Erosión Actual y Potencial, de acuerdo al enfoque Morfopedológico	57
Anexo 13 Erosión Actual y Potencial, de acuerdo al enfoque de cuenca.	58
Anexo 14 Erosión Actual y Actual Ponderada, de acuerdo al enfoque de unidades morfopedológicas.....	59

Anexo 15 Erosión Potencial y Potencial Ponderada, de acuerdo al enfoque de unidades morfoopedológicas.	60
Anexo 16 Erosión Actual y Actual Ponderada, de acuerdo al enfoque de cuenca.	62
Anexo 17 Erosión Potencial y Potencial Ponderada, de acuerdo al enfoque de cuenca.	64

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido culminar un peldaño más de mi vida profesional, sin ya que sin él nada podría ser.

A mis padres Ninfa y Nicolás por siempre estar a mi lado dándome ánimos en cada paso por más difícil que fuera, con su apoyo todo se vuelve fácil, de ustedes aprendí que siempre se debe luchar por lo que se quiere, aun cuando el tiempo este en contra.

A mis hermanos queridos, por su gran apoyo, consejos, motivación y fortaleza, ya que cada día que los necesito ustedes siempre están presentes de una u otra forma.

A mi fuente de inspiración, mi pequeño huracán, Arturito, te he limitado de estar conmigo, para poder brindarte algo mucho mejor más adelante.

A mis maestros y amigos; cada uno ha estado presente para que este logro se culmine, cada uno de ustedes participo de diferente manera pero apoyándome en este camino.

Todos ustedes son el pilar y motivación de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca para mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme realizar un logro más en tan prestigiada institución.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por el apoyo brindado para la culminación de este proyecto.

Al Dr. Lamine Diakit   Diakit  , por brindarme sus conocimientos, experiencias, paciencia, amistad y sobre todo por guiarme, en el proceso de la realización de este trabajo.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz y al Dr. Pablo Coras Merino, por sus conocimientos y sugerencias que fueron de gran apoyo para enriquecer la presente tesis, en calidad de asesores.

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA), por impulsar la capacitación docente para poder ser competente y tener mayor conocimiento para transmitir a los jóvenes.

A la Ing. Lorena Elizabeth Hernández Rodríguez, Responsable del área administrativa de la DGETA Puebla, por la confianza su compromiso con el Estado por brindar una educación de calidad.

Al M.C. Héctor Becerril Toral, por su amistad, su apoyo brindado y sobre todo la confianza puesta en mí para darme la oportunidad de superarme profesional y personalmente.

Al Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 255 Ext. 1, Molcaxac, Puebla y al Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 79, Zinacatepec, a todos y cada uno del personal, por su apoyo incondicional y su gran amistad.

A Mayra Luna Reyes, por todo el apoyo que me brindo en calidad de secretaría y amiga, en los trámites correspondientes.

A Josué Pérez Torres, por brindarme su amistad y valiosos conocimientos, para enriquecer mi proyecto de tesis.

Encontrar amigos verdaderos como ustedes es sin duda una mayor bendición que me ha dejado el Posgrado, ustedes han estado a mi lado incluso en los momentos más turbulentos, gracias Cesar, Carlos, Jaimes, Yesy, Belly, Abner, Río, Abraham, Yesica, Mijail, Gaby, Ruy, Paúl y a todas las personas que desinteresadamente, la maestría y el proyecto no fueron fáciles, pero cada uno estuvo motivándome a seguir en cada momento.

A todos y cada una de las personas que me han apoyado en este trabajo de tesis directa e indirectamente, muchas Gracias, sin ustedes no habría logrado llegar a este momento.

DATOS BIOGRÁFICOS



Rosa Martha Medina Hernández, nació el 30 de enero de 1984, en la comunidad Plan de Arrollo, Municipio de Francisco Z. Mena Puebla, realizó los estudios básicos en el Municipio de Álamo Temapache, Veracruz.

Su educación media superior fue en el Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz plantel 05-Álamo (COBAEV-05).

En el 2001 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), a propedéutico y en 2002 ingresa a la carrera de Ingeniero en Irrigación, egresando en 2006, con tesis denominada “Drenaje superficial para zonas húmedas y subhúmedas” obtuvo el título de Ingeniero en Irrigación en 2009, con número de cédula profesional 6358026.

Inició su fase laboral en 2006 y ha laborado en 3 lugares, Secretaria de Desarrollo Rural del Estado de Puebla (SDR); Gimtrac SA de CV; y en Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario (CBTa), en el Estado de Puebla.

En Agosto de 2014 ingresa al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo, en el estado de México, obteniendo el grado en diciembre de 2016.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión de suelos en México es un problema ambiental muy serio que afecta a gran parte del territorio nacional en diferentes grados de severidad. El 64% de los suelos de México presentan problemas de degradación en diferentes grados que van de ligera a extrema, y cerca de la mitad de la superficie nacional presenta niveles de degradación que van de severos a extremos (SEMARNAT-UACH, 2013).

La erosión en cuencas es causada principalmente por el salpicamiento de las gotas de lluvias y los escurrimientos, teniendo como consecuencia la pérdida de la productividad de los suelos, que constituyen un recurso no renovable, la contaminación de las aguas y del medio ambiente en general. Esto sin olvidar que anualmente es necesario dedicar grandes recursos económicos al desazolve de canales, ríos, embalses, estuarios, puertos, etc.

Para revertir los procesos de degradación y sus causas así como mitigar los impactos tales como baja en la productividad de las tierras, aumento en la fragilidad de los ambientes, usos inapropiados de las tierras, pérdida de la biodiversidad tanto vegetal como animal, presión sobre los diversos recursos naturales, entre otros, es necesario e indispensable estimar la erosión hídrica actual y potencial, que afecta cerca del 37% del territorio nacional.

La implementación de métodos para la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, ha sido limitada básicamente al uso de la USLE y sus modificaciones RUSLE 1 y 2 a nivel de cuencas. Se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de cuenca hidrográfica. Entre estas se pueden mencionar el Diagnóstico y estimación de la erosión hídrica en cuencas de la república Mexicana por varios autores: Omero Jiménez Jiménez, 2005; López García Alma Delia, 2005; Montiel Gonzaga Ricardo, 2006; Rivera Toral Francisco, 2010; Flores Cruz Luis Rodrigo, 2012; Molina Sánchez Claudia, 2013; Colín García Gerardo, 2013; Escobar

González Jesús Antonio, 2014, todos esos estudios han utilizado para estimar la pérdida de suelos la USLE y sus diferentes modificaciones.

La cuenca por sus parámetros morfológicos (relieve, longitud de la pendiente y su gradiente), su tipo de uso, es muy heterogénea para la determinación de los factores de la USLE. Por lo cual el valor de la erosión obtenido es muy poco preciso, para que sirva de base para la planeación de las prácticas y métodos de conservación a nivel de cuenca.

El propósito de la presente investigación es tratar de resolver el problema de heterogeneidad de la cuenca en cuanto a la determinación de los factores de la USLE. Ya que la USLE se aplica en áreas que tengan unas condiciones relativamente homogéneas de clima, suelo, relieve y vegetación (González, 1991).

Un método para lograr la homogeneidad de la unidad de tierra dentro de la cuenca es sin lugar a duda el enfoque morfopedológico, que consiste en dividir la cuenca en unidades simples en cuanto a factores de desgaste de suelos o erosión. La unidad morfopedológica es una unidad geomorfológica, bastante uniforme, homogénea y que presenta factores pedogenéticos y morfogenéticos uniformes en toda su extensión como para producir una unidad de paisaje con un grado de balance geodinámico que permite aplicar prácticas y métodos de conservación adecuados, óptimos y apropiados dentro de la unidad morfopedológica.

En esta investigación se ha realizado el cálculo de la erosión de acuerdo unidades morfopedológicas, realizando la superposición de la capa del tipo de geología, para delimitar las áreas de las cuales se obtuvieron 56 unidades, dentro de estas unidades se realizó el cálculo de los factores de erosividad (R), de erodabilidad del suelo (K), topográfico del terreno (LS), de manejo del cultivo (C), de prácticas mecánicas (P).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Estimación de la erosión actual (Ea) y potencial (Ep).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) desarrollado en Estados Unidos es el modelo empírico más utilizado en todo el mundo para estimar la pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1965). La USLE se utiliza en la planeación y diseño de prácticas de conservación. La USLE fue diseñada específicamente para predecir la pérdida de suelo de los suelos cultivados bajo características específicas. Algunas veces se ha utilizado de manera inadecuada y se ha aplicado a condiciones de uso del suelo y de la tierra distintas de aquellas para las que se desarrolló. El USLE es, sin embargo, ventajoso sobre modelos sofisticados porque es simple, fácil de usar, y no requiere numerosos parámetros de entrada o extensos conjuntos de datos para la predicción. La simplicidad de la ecuación para su uso práctico

El promedio anual de pérdida de suelos se calcula como sigue, ya sea el cálculo de erosión potencial y erosión actual, para los enfoques:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

$$EP = R \times K \times LS \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

A; es el promedio anual de pérdida de suelo actual ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

EP; es el promedio anual de pérdida de suelo potencial ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

R; es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$).

K; es el factor de erodabilidad del suelo ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ hr MJ mm ha}^{-1}$).

L; es el factor adimensional de la longitud de la pendiente.

S; es el factor adimensional del grado de la pendiente.

C; es el factor adimensional de cobertura o manejo.

P; es el factor adimensional de prácticas de conservación.

A continuación se describe el procedimiento para la obtención de cada uno de los factores:

2.2 Calculo del factor erosividad (R)

El factor erosividad, se obtienen mediante el producto de la energía cinética de la lluvia por la intensidad máxima en 30 minutos (EI30), para el México, (Cortes, 1991) preparo un mapa de isoerosividad, el cual se desarrolló con datos de 53 estaciones meteorológicas con periodos que varían de 4 a 11 años. De donde se dividió el país en 14 regiones de acuerdo a Cortes (cuadro 1) y cada una tiene las condiciones similares de lluvia.

Cuadro 1 Regiones de acuerdo a Cortes 1991, para la isoerosividad del suelo.

Región	Ecuación	R ²
01	$Y=1.2078x+0.002276 \chi^2$	0.92
02	$Y=3.4555x + 0.006470 \chi^2$	0.93
03	$Y=3.6752x - 0.001720 \chi^2$	0.94
04	$Y=2.8959x + 0.002983 \chi^2$	0.92
05	$Y=3.4880x - 0.00088 \chi^2$	0.94
06	$Y=6.6847x + 0.001680 \chi^2$	0.90
07	$Y=-0.0334x + 0.006661 \chi^2$	0.98
08	$Y=1.9967x + 0.003270 \chi^2$	0.98
09	$Y=7.0458x - 0.002096 \chi^2$	0.97
10	$Y=6.8938x + 0.000442 \chi^2$	0.95
11	$Y=3.7745x + 0.004540 \chi^2$	0.98
12	$Y=2.4619x + 0.006067 \chi^2$	0.96
13	$Y=10.7427x - 0.00108 \chi^2$	0.97
14	$Y=1.5005x + 0.002640 \chi^2$	0.95

Donde X; es la precipitación media de la estación meteorológica
Y= Erosividad del suelo.

Para nuestra área de estudio se consideraron 39 estaciones correspondieron a las regiones 1, 5, 8 y 9, para las cuales se buscaron los datos de precipitación medias anuales en el SMN. Los datos fueron optimizados mediante el cálculo de datos faltantes para las estaciones que fueron previamente seleccionadas

cuando se tenían más del 80% de los datos de precipitación registrados, con el método de la Razón Normal Paulhus y Kolher (1952) y la generación de las isolíneas a partir del método de Radial Basis Functions.

2.2.1. Método de la razón normal

Para resolver el problema de generación de datos faltantes en la precipitación, cabe citar el trabajo de Paulhus y Kohler (1952), en el cual usan el método de la razón-normal. Este procedimiento estima cantidades de lluvia con base en tres estaciones cercanas y uniformemente espaciadas con respecto a la estación en estudio.

Expresión del método de la Razón Normal:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \left(\frac{N_x}{N_3} \right) P_3 \right] \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P_x : Precipitación estimada en la estación objetivo en el mes/año dado.

P_1, P_2, P_3 : Precipitación en la estación 1,2, o 3, respectivamente para el mes/año dado.

N_x : Precipitación media de estimada en la estación objetivo en el mes/año dado.

N_1, N_2, N_3 : Precipitación media en la estación 1, 2, o 3, respectivamente para el mes/año dado.

Este método juega con la variabilidad registrada en otras estaciones y con la razón proporcional entre ellas, y al tener tres estaciones se suaviza la influencia que podría tener un error en una de ellas.

Cuadro 2 Lista de estaciones meteorológicas, su ubicación, la precipitación anual promedio y la zona a la que corresponde de acuerdo a Cortes 1991.

ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	PPT ANUAL (mm)	GRUPO
13006	CIUDAD SAHAGUN	2186268.67	543939.3	408.5	1
13008	EL MANANTIAL	2195068.13	506660.27	545.52	5
13024	POTRERITO	2167380.97	537722.89	599.09	8
13027	SAN JERONIMO	2191122.59	554022.09	643.17	1
13030	SAN RAFAEL MAZATEPEC	2196640.41	567441.68	714.59	1
13033	SINGUILUCAN	2207651.4	550948.75	601.44	1
13079	PRESA EL GIRON	2208784.77	549550.45	438.82	1
13085	PRESA TEZOYO	2181161.69	562959.63	652.33	1
13091	TIZAYUCA (DGE)	2191993.69	504770.63	558.77	5
13098	HUASCA	2234776.33	544108.09	869.89	1
13100	OMITLAN	2230640.4	536949.22	1048.67	1
13112	MINERAL DEL CHICO	2235265.63	528146.96	1164.1	1
13116	EL ZEMBO	2229187.13	546241.38	944.49	1
13129	SAN AGUSTIN ZAPOTLAN	2197427.68	529516.58	527.4	1
13131	SANTIAGO TLAJOMULCO	2209792.79	508630.77	577.82	5
13132	EL TEPOZAN	2190715.18	576861.53	917.95	1
13133	SAN PEDRO TLAQUILPAN	2205321.68	525753.63	577.16	1
13138	EMILIANO ZAPATA	2173735.52	547173.46	531.52	5
15055	MAQUIXCO	2187606.19	517574.25	580.29	5
15065	OTUMBA	2178301.87	525327.2	510.35	5
15090	SAN JERONIMO XONOCAHUACAN	2183909.7	505296.65	588.6	5
15099	SAN MATEO ACUITLAPILCO	2185292.72	495402.17	595.31	5
15101	SAN MIGUEL TLAIXPAN	2158315.21	519672.34	550.7	8
15135	XOCHIHUACAN	2169894.13	534047.73	646.74	8
15274	NOPALA	2204595.86	498750.06	479.68	5
21130	LOS REYES (CLFC)	2189832.67	578902.05	1712.24	1
21140	CHIGNAHUAPAN	2194004.54	601282.41	691.14	9
21162	BENITO JUAREZ	2165843.46	560042.03	586.5	8
29004	CUAMANTZINGO	2158498.61	576679.8	641.43	8
29006	CUAULA	2167255.9	536703.6	645.39	8
29010	HUEYOTLIPAN	2153179.28	568714.02	746.26	8
29019	SAN CALPULALAPAN	2162265.26	545309.67	687.74	8
29024	SANCTORUM	2155408.16	555412.85	720.9	8
29025	SAN MARCOS	2166921.77	538597.79	657.45	8
29032	TLAXCO	2166623.07	591707.32	713.29	8
29034	ZOQUIAPAN	2165611.31	554740.46	593.74	8
29035	CALPULALPAN	2165739.78	545737.89	675.22	8
29047	ESPAÑITA	2151582.67	560643.63	1116.04	8
29052	EL ROSARIO	2173518.06	580838.29	648.12	8

Fuente: SMN, 2016.

2.3 Calculo del factor erodabilidad del suelo (K)

El termino erodabilidad del suelo, se usa generalmente para indicar la susceptibilidad de un suelo particular a ser erosionado. Existen propiedades de los mismos suelos, como la distribución del tamaño de particular primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, uniones electroquímicas, contenido inicial de humedad y procesos de humedecimiento y secado, entre otros que tienen influencia en la disposición del suelo a ser erodado (Figueroa, 1991).

El factor de erodabilidad fue obtenido directamente a partir de la ecuación 4 (Foster et al; 1981, citado por Blanco et al, 2008) la cual proviene del monograma elaborado por Wischmeier et al 1971.

$$K = \frac{2.8 \times 10^{-5} \times M^{1.14} \times (12-a) + 0.43 \times (b-2) + 0.33 \times (c-3)}{100} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

En donde:

$$M = (\%limo + \%arena\ muy\ fina) \times (100 - \%arcilla)$$

a= % del contenido materia orgánica en el suelo

b= código de la estructura del suelo

1=granular muy fino

2=granular fino

3= granular medio o grueso

4= estructura en bloques, lamiar o masiva

c= relación de la permeabilidad neta de perfil de suelo al estado de conductividad hidráulica saturada

1=rápida (150 mm h⁻¹)

2=moderada rápida (50-150 mm h⁻¹)

3=moderada (12-50 mm h⁻¹)

4=lenta a moderada (5-15 mm h⁻¹)

5=lenta (1-5 mm h⁻¹)

6=muy lento (< 1 mm h⁻¹)

2.4 Calculo del factor Ls

El factor LS, asocia los factores de longitud y porcentaje de la pendiente. La longitud de la pendiente (Factor L) se define como la distancia desde el punto de origen del escurrimiento superficial, al punto donde el grado de la pendiente decrece lo suficiente para que la depositación empiece, o el escurrimiento entre en un canal bien definido, el cual puede ser parte de una red de drenaje natural o un canal construido.

Se define como:

$$LS = \left(\frac{\text{length}}{22.1} \right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{s}{100} \right) \dots\dots\dots \text{Ecuación 6}$$

$$m = 0.6[1 - \exp(-35.835 \times s)] \dots\dots\dots \text{Ecuación 7}$$

s: pendiente del terreno en %

2.5 Calculo del factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).

Este factor indica el efecto del manejo en la labranza, tipo de cultivos, rotación de cultivos, distribución estacional y nivel de rendimiento de cultivo (producción potencial de material orgánico). Los valores de C fluctúan entre 0.0 y 1.0, siendo la unidad la condición extrema que favorece la erosión (sin cobertura y con barbecho continuo), y el valor de cero, para terrenos totalmente protegidos por cobertura vegetal (Cuadro 3).

Cuadro 3 Valores del factor C de algunos cultivos y labranza.

Vegetación	Descripción	Valor C
Grano maíz	Arado de arado, sin residuos, arado durante:	
	Otoño	0.40
	Primavera	0.36.
	Labranza con rastrojo	0,24
	Labranza mínima,> 50% cubierta de residuos de arado en primavera	0,20
	Labranza mínima	0.14
	Sin labranza con 100% de cubierta de residuos	0.05
Laboreo sin residuos	arado sin residuos durante:	
	Otoño	0.50
	primavera	0.45
	Labranza con rastrojo	0.30
	Labranza mínima	0.17
	Sin labranza con 100% de cubierta de residuos	0.10
Cereales	Labranza en otoño	0.35
	Labranza de primavera	0.32
	Labranza con rastrojo	0.21
	Labranza mínima	0.12
	Sin labranza con 100% de cubierta de residuos	0.08
Rotación Maíz-soya	Arado, sin residuos, labrando en otoño	0.50
	Arado con cincel,>50% de cubierta de residuos, con labranza en primavera	0.23
	Sin labranza con 100% de cubierta de residuos	0.05
Rotación Maíz-soya	Arado, sin residuos, labrando en otoño	0.20
	Arado con cincel,>50% de cubierta de residuos, con labranza en primavera	0.14
	Sin labranza con 100% de cubierta de residuos	0.05
Heno y pasto	Soporte denso de pasto	0.02
Bosque	> 90% a 100% de cubierta del suelo	0.001
Árboles cortos y manejados sin sotobosque	Al menos el 75% de cubierta del dosel y sin la cubierta del suelo	0.35
Vegetación (árboles frutales)	Al menos el 75% de la cobertura del dosel con alrededor del 30% de la cubierta del suelo	0.08

Fuente: Blanco et al, 2008

2.6 Calculo del factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P)

El factor P se refiere a las prácticas que se usan para controlar la erosión, es la relación entre la pérdida del suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente. Este factor fundamentalmente se relaciona con el conocimiento o inspección de la zona de estudio o en su defecto por información auxiliar de trabajos realizados con anterioridad, de esta manera se puede conocer que practicas se llevan a cabo en cada tipo de uso de suelo (cuadro 4 y 5).

Cuadro 4 Valores de P, para el contorno y el cultivo en surcos (Wishmeier y Smith, 1978)

Pendiente del suelo (%)	contorno		Surcado al contorno				
	Valor de P	Longitud máxima de pendiente (m)	Valor de P			Ancho (m)	Longitud máxima de pendiente (m)
			A	B	C		
1-2	0.60	122	0.30	0.45	0.60	40	243
3-5	0.50	91	0.25	0.38	0.50	30	182
6-8	0.50	61	0.25	0.38	0.50	40	122
9-12	0.60	36	0.30	0.45	0.60	24	74
13-16	0.70	24	0.35	0.52	0.70	24	49
17-20	0.80	18	0.40	0.60	0.80	18	36
20-25	0.90	15	0.45	0.68	0.90	15	30

Fuente: Blanco et al, 2008

Cuadro 5 Valores de P, para prácticas combinadas (Wishmeier y Smith, (1978) y USDA-ARS (1997)).

Pendiente del suelo (%)	Factor de Contorno	Factor del surco de cultivo	Factor de terraza		
			Intervalo de terraza (m)	Salida cerrada	Salida abierta
1-2	0.60	122	0.30	0.45	0.60
3-8	0.50	61	0.25	0.38	0.50
9-12	0.60	36	0.30	0.45	0.60
13-16	0.70	24	0.35	0.52	0.70
17-20	0.80	18	0.40	0.60	0.80
20-25	0.90	15	0.45	0.68	0.90

Fuente: Blanco et al, 2008

3. ARTÍCULO CIENTÍFICO

COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES MORFOPEDOLÓGICO Y CUENCA EN
LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA CON USLE.

COMPARACIÓN DE LOS ENFOQUES MORFOPEDOLÓGICO Y CUENCA EN LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA CON USLE.

COMPARISON OF MORPHOPEDOLOGIC AND BASIN APPROACHES IN THE ESTIMATION OF WATER EROSION WITH USLE

RESUMEN

La implementación de métodos para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, ha sido limitada básicamente al uso de la USLE y sus modificaciones RUSLE 1 y 2 a nivel de cuencas. La cuenca por sus parámetros morfológicos (relieve, longitud de pendiente y su gradiente), su tipo de uso, es muy heterogénea para la determinación de los factores de la USLE.

Es por ello que se necesita que las áreas tengan unas condiciones relativamente homogéneas de clima, suelo, relieve y vegetación. Un método para lograr la homogeneidad de la unidad de tierra dentro de la cuenca es el enfoque morfopedológico, que consiste en dividir la cuenca en unidades simples en cuanto a factores de desgaste de suelos.

Los cálculos se realizaron en las subcuencas del Río Tezontepe y Lago Tochac-Tecoculco, pertenecientes a la cuenca Río Moctezuma, de acuerdo a los enfoques morfopedológico y de cuenca, dentro de estas unidades se estimaron los factores de erosividad, de erodabilidad del suelo, topográfico del terreno, de manejo del cultivo, de prácticas mecánicas. De acuerdo con los resultados la erosión actual con el enfoque de cuenca fue muy bajo en la mayor parte del área, el 83.3% de la superficie total con una erosión nula, y el resto con erosión ligera, según la FAO; mientras que en el enfoque morfopedológico los valores de la erosión fueron congruentes con la realidad sobre el terreno con un 53.5% de erosión ligera y un 18.7% de erosión moderada. Con respecto a la erosión potencial los valores de la pérdida de suelo variaron de moderada (22.3%) a Alta (71.8%), en tanto que el enfoque morfopedológico la erosión fue de alta a muy alta en el 99.4% del área.

En forma general podemos concluir que los resultados obtenidos con el enfoque morfopedológico son congruentes con la realidad, así como para las condiciones por las cuales la ecuación de USLE fue elaborada.

Palabras clave: unidad morfopedológica, erosión actual, erosión potencial.

ABSTRACT

The implementation of methods to estimate soil loss due to water erosion has been limited basically to the use of USLE and its RUSLE 1 and 2 modifications at basin level. The basin, due to its morphological parameters (relief, slope length and gradient) and its type of use, is very heterogeneous for the determination of USLE factors.

That is why the areas need to have relatively homogeneous climate, soil, relief and vegetation conditions. One method to achieve homogeneity of the soil unit within the basin is the morphopedological approach, which consists of dividing the basin into simple units in terms of soil wear factors.

The calculations were made according to the morphopedological and basin approaches. In these units erosivity factors, soil erodibility, soil topography, crop management and mechanical practices were estimated.

According to the results the current erosion with the basin approach was very low in most of the area. According to the FAO, 83.3% of the total area showed no erosion and the rest had slight erosion. Using the morphopedological approach it was found that erosion values were congruent with reality on the ground, presenting 53.5% light erosion and 18.7% moderate erosion. With respect to potential erosion, the soil-loss values ranged from moderate (22.3%) to high (71.8%), while with the morphopedological approach, erosion was from high to very high in 99.4% of the area.

In general, we can conclude that the results obtained with the morphopedological approach are congruent with reality, as well as for the conditions under which the USLE equation was developed.

Keywords: morphopedological unit, current erosion, potential erosion.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua.

Autor: Rosa Martha Medina Hernández

Director de tesis: Lamine Diakite D.

3.1 Introducción

La erosión hídrica afecta en forma significativa a nivel global, especialmente en áreas con intensidad de precipitación alta y es la que se manifiesta mayormente en zonas agrícolas. Es un proceso natural que afecta a todos los terrenos que se encuentran expuestos a la acción de la lluvia, viento o glaciación, en una escala geológica, conlleva a la pérdida de suelo y a la morfogénesis (Alcañiz, 2008, Nearing et al 2004).

Se han propuesto diferentes métodos para estimar la pérdida del suelo, pero la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978, citado por Blanco et al, 2008) en Estados Unidos, fue creada especialmente para predecir la pérdida de suelo de las áreas agrícolas, bajo características específicas, y es en la actualidad el método de estimación de la pérdida de suelo junto con sus modificaciones (RUSLE 1 y 2) el más aceptado a nivel mundial.

Para la aplicación del modelo de Wischmeier se requiere de una colaboración multidisciplinaria entre factores del suelo, los cultivos, factores hidrológicos, meteorológicos y otros como lo señala Blanco y Lal (2008). Cerca del 70% de la erosión total es causada por la erosión provocada por las gotas de agua y esa capacidad de la lluvia de erosionar el suelo es conocida como erosividad de la lluvia y es función de la suma de la energía cinética de todas las gotas de agua que caen durante un evento extremo. Una misma intensidad de lluvia puede producir erosiones diferentes de acuerdo a las características del suelo sobre el cual impacta. Así es como se reconoce la importancia de las características propias del suelo que determinan su erodabilidad, la relación con su textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad. El relieve tiene un efecto directo sobre la erosión y ese efecto es directamente proporcional a los parámetros de relieve tales como longitud y gradiente de la pendiente, por lo que su acción e intensidad varían según sea la parte alta, media o baja de una ladera. Finalmente la erosión también varía según el tipo de vegetación que protege el suelo, las

prácticas de manejo de los cultivos y de protección de los suelos (González, 1991).

El objetivo de este trabajo es congruente con la idea de que la USLE se aplica en áreas que tengan condiciones relativamente homogéneas de clima, suelo, relieve y vegetación, lo que se resume en el concepto de unidades morfopedológicas de Tricart y Killian, 1982.

La diferencia de este trabajo con algunos realizados además de las unidades morfopedológicas, es la obtención del factor LS, el cual se mide dentro de cada unidad morfopedológica, a diferencia del enfoque de cuenca que deriva de los parámetros de cuenca y de forma de la cuenca misma.

El presente estudio comparativo se realizó en las Subcuencas del Río Tezontepe y del Lago Tochac-Tecoculco, pertenecientes a la cuenca Río Moctezuma y Región hidrológica número 26, Pánuco.

3.2 Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a dos subcuencas de la cuenca Río Moctezuma, ubicada en la Región hidrológica número 26, llamada Pánuco. Las subcuencas utilizadas corresponden a las del Río Tezontepe y Lago Tochac-Tecoculco, que abarcan partes de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Puebla, cubriendo una superficie de 3,965.85 km² (Figura1).

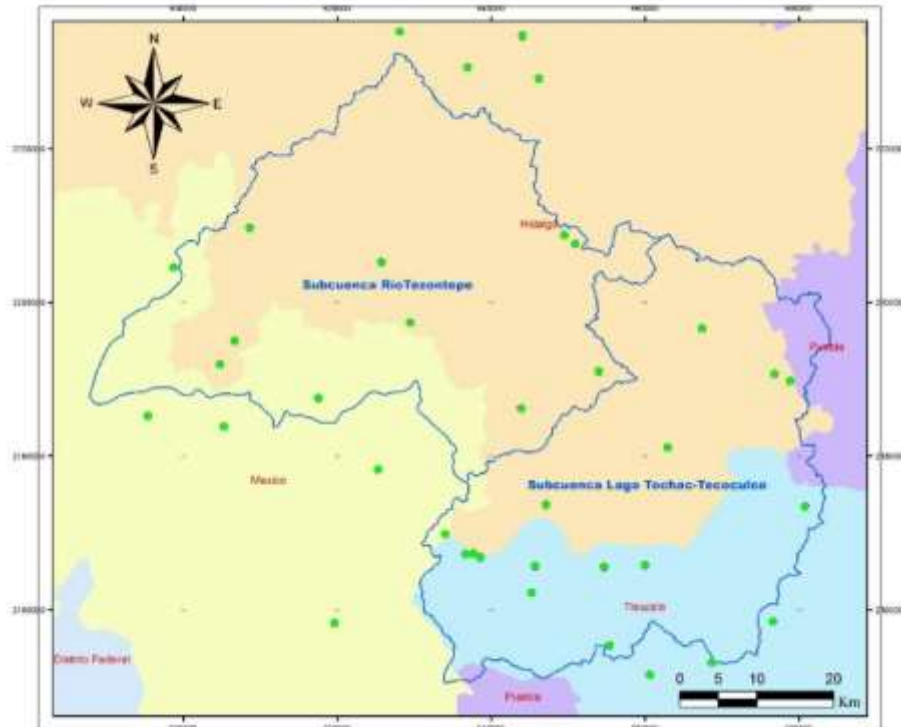


Figura 1. Área de estudio.

De acuerdo con la Carta Geológica Minera del Servicio Geológico Mexicano, el área de estudio incluye la siguiente formación geológica Andesita-Basalto (36.76%), Aluvión (26%), Riolita-Toba riolitica (18%) y Toba Andesítica-Andesita, Andesita Dacita, Lacustre, Lahar toba andesitica y Riolita toba dacita (19.24%), Figura 2.

Los **climas** que dominan en el área de estudio son variados y comprenden desde templado subhúmedo en la parte de la sierra con precipitación de 500-1000 mm y temperatura de 18 °C, semicálido húmedo, en la entrada al valle con precipitación de 2000 mm y temperatura de 20 °C, y cálido subhúmedo en la confluencia del Río Moctezuma con el Río Tempoal con precipitación de 1500 mm y temperatura de 25 °C.

De acuerdo con la carta edafológica de INEGI, los tipos de suelo dominante del área de estudio lo conforman el Phaeozem (Epipedúrico, Endopedúrico y Epileptico) con un 76% del total de la superficie; este es un suelo con un horizonte

superficial Mólico de color pardo a gris, el contenido promedio de materia orgánica de la capa superficial oscila alrededor del 5%; la relación Carbono Nitrógeno de la materia orgánica es de 10-12, el pH se encuentran entre 6 y 7, la capacidad de intercambio catiónico es de hasta 25 – 30 cmol (+) por kg de suelo seco. También se encuentra en el área de estudio el Leptosol con un 10% y el resto (14%) lo conforman el Andosol, Cambisol, Durisol y Luvisol.

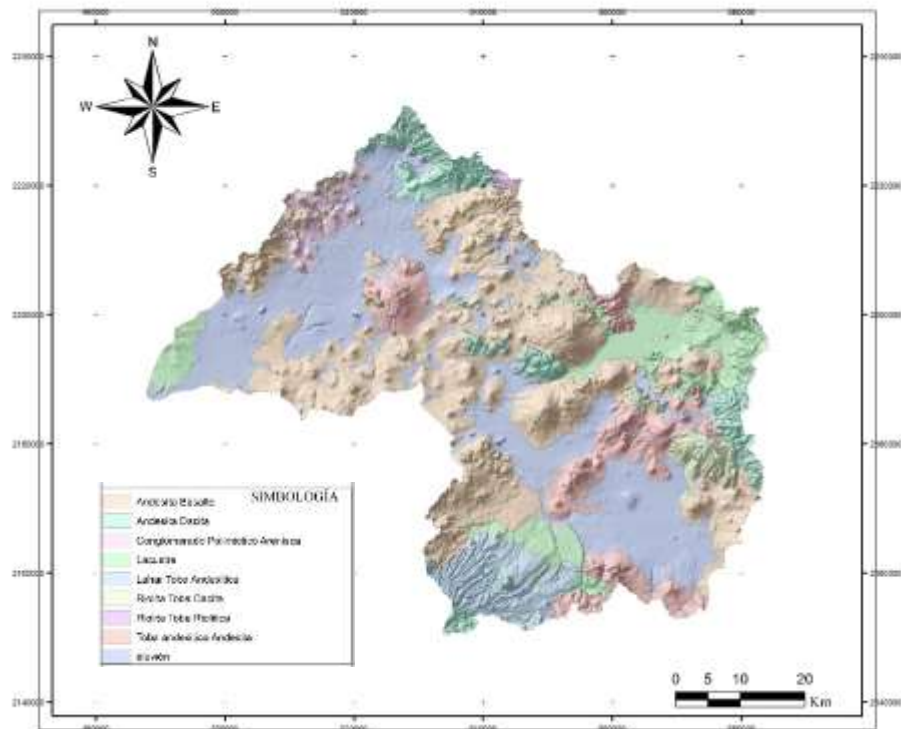


Figura 2 Mapa de geología presente en el área de estudio.

La clasificación supervisada de Landsat-8 con fecha de 21 de enero y 06 de febrero de 2016, mostro las siguientes tipos de uso y vegetación: área agrícola (67.5%), bosque (14.6%), área de desarrollo (8.7%), zona con afloramiento rocosa (4.6%) y el resto lo conforman matorral, pastizal, Cuerpo de agua y tular.

3.3 Material cartográfico

Se utilizaron imágenes de satélite multiespectrales Landsat 8 (Row-Path 026046 y 026047) con fecha del 21 de enero y 06 de febrero de 2016, las cuales se obtuvieron con 0% de nubosidad, con resolución de 30 m para las bandas multiespectrales (USGS, 2016), estas imágenes fueron obtenidas en del Global Visualization Viewer (Glovis) del USGS. Esta imagen tiene una resolución espacial de 30x30 metros y una resolución radiométrica de 16 bits con 11 bandas espectrales. También se utilizaron, un modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 15x15 m, cartas vectoriales de: topografía, uso de suelo y vegetación (INEGI 2013) y Geología (SGM, 1997 y 2002) a escala 1:250,000, y datos de perfiles de suelo (INEGI, 2004). Los Datos de precipitación mensual para el periodo de 1970-2010 de 39 fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Mexicano SMN, 2016.

3.4 Software para procesamiento digital

Los datos espaciales fueron procesados en el laboratorio de Centro de Percepción Remota y Análisis Espacial, de la Universidad Autónoma Chapingo el cual cuenta con los siguientes software's actualizados de: ENVI, ERDAS, ArcGIS, ArcPad y Office.

3.5 Metodología

El diagrama de flujo (Figura 3), muestra la metodología a seguir para el cálculo de la pérdida de suelo de acuerdo con USLE usando los dos enfoques, el enfoque morfopedológico y enfoque de cuencas. En el enfoque morfopedológico se subdivide la cuenca de acuerdo con el relieve obtenido con el DEM, la geología, los grupos hidrológicos de suelo que permite estimar la infiltración, y se calculan los factores de USLE para cada unidad morfopedológica. En el enfoque de cuenca se subdivide la cuenca en microcuencas para disminuir la heterogeneidad y se calcula la pérdida de suelo para cada microcuenca.

En ambos métodos se convirtieron los factores de la ecuación en raster y mediante el álgebra de matrices se calcula la pérdida de suelos en Mg ton^{-1} .

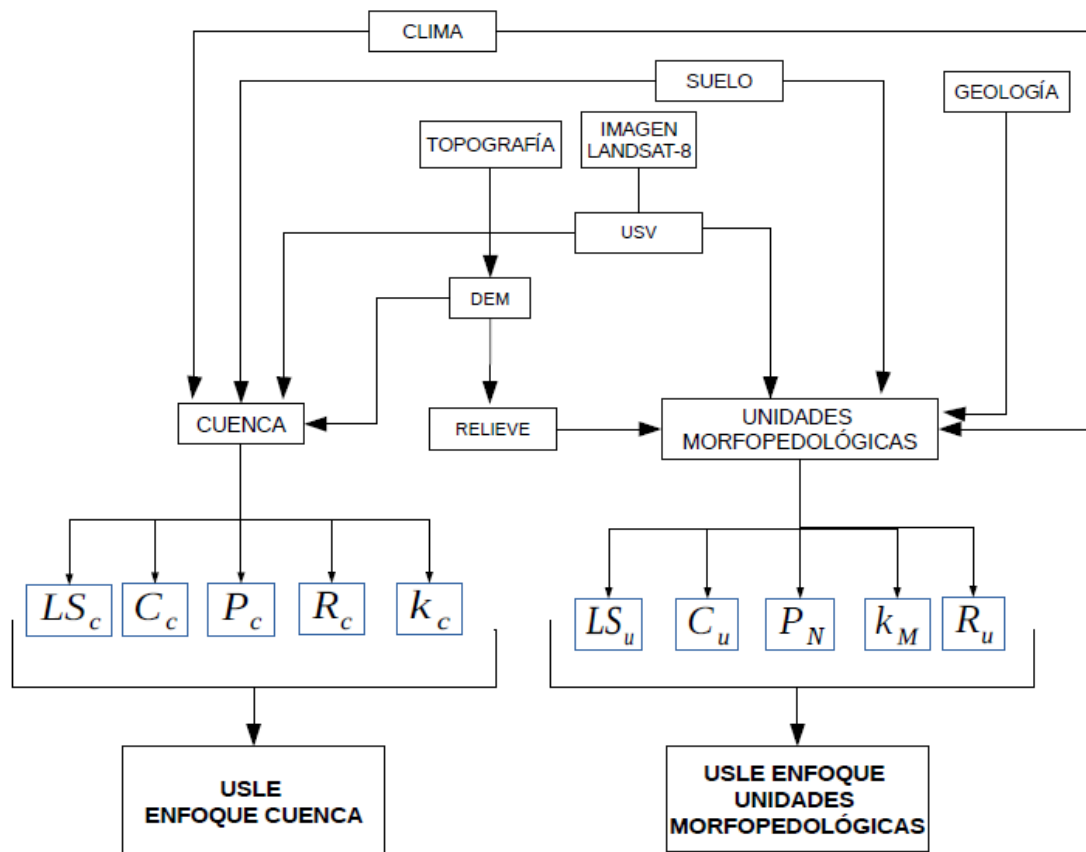


Figura 3 Metodología para la obtención de la Erosión de acuerdo al enfoque Cuenca y Morfopedológico.

Estimación de la Erosión Actual (A) y Erosión Potencial (EP).

Se realizaron los cálculos de cada factor de acuerdo a la subdivisión del enfoque de cuenca y morfopedológico, del área de estudio.

El promedio anual de pérdida de suelos se calcula como sigue, ya sea el cálculo de erosión potencial y erosión actual, para los enfoques:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \dots\dots\dots\text{Ecuación 8}$$

$$EP = R \times K \times LS \dots\dots\dots\text{Ecuación 9}$$

Donde:

A; es el promedio anual de pérdida de suelo actual ($Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$).

EP; es el promedio anual de pérdida de suelo potencial ($Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$).

R; es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ ha^{-1}\ mm\ hr^{-1}$).

K; es el factor de erodabilidad del suelo ($Mg\ ha^{-1}\ hr\ MJ\ mm\ ha^{-1}$).

L; es el factor adimensional de la longitud de la pendiente.

S; es el factor adimensional del grado de la pendiente.

C; es el factor adimensional de cobertura o manejo.

P; es el factor adimensional de prácticas de conservación.

Se realizaron los cálculos de cada factor de acuerdo a la subdivisión del enfoque de cuenca y morfopedológico, del área de estudio.

A continuación se describe el procedimiento para la obtención de cada uno de los factores:

Calculo del Factor Erosividad (R)

Para nuestra área de estudio se consideraron 39 estaciones correspondieron a las regiones 1, 5, 8 y 9, para las cuales se buscaron los datos de precipitación medias anuales en el SMN. Los datos fueron optimizados mediante el cálculo de datos faltantes para las estaciones que fueron previamente seleccionadas cuando se tenían más del 80% de los datos de precipitación registrados, con el método de la Razón Normal, método introducido por Paulhus y Kolher, 1952 y la generación de las isolíneas a partir del método de Radial Basis Functions.

En el Anexo1 se observa los cálculos del factor R, para cada estación meteorológica.

Cuadro 6 Ecuaciones para cálculo de la Erosividad (R)

Grupo	Ecuación	R ²
Zona I	$Y = 1.20785(x) + 0.002276 x^2$	0.92
Zona V	$Y = 3.48801(x) - 0.000188 x^2$	0.94
Zona VIII	$Y = 1.99671(x) + 0.003270 x^2$	0.98
Zona IX	$Y = 7.04579(x) + 0.002096 x^2$	0.97

En el Anexo2 y 3 podemos observar los valores del Factor R que se tienen para el enfoque Morfopedológico y de cuencas.

Calculo del Factor Erodabilidad del suelo (K)

El factor de erodabilidad fue obtenido directamente a partir de la ecuación 10 (Foster et al; 1981, citado por Blanco et al, 2008) la cual proviene del monograma elaborado por Wischmeier et al 1971.

$$K = \frac{2.8 \times 10^{-5} \times M^{1.14} \times (12-a) + 0.43 \times (b-2) + 0.33 \times (c-3)}{100} \dots\dots\dots \text{Ecuación 10}$$

En donde:

$$M = (\%limo + \%arena\ muy\ fina) \times (100 - \%arcilla)$$

a= % del contenido materia orgánica en el suelo

b= código de la estructura del suelo

1=granular muy fino

2=granular fino

3= granular medio o grueso

4= estructura en bloques, lamiar o masiva

c= relación de la permeabilidad neta de perfil de suelo al estado de conductividad hidráulica saturada

1=rápida (150 mm h^{-1})

2=moderada rápida ($50\text{-}150\text{ mm h}^{-1}$)

3=moderada ($12\text{-}50\text{ mm h}^{-1}$)

4=lenta a moderada ($5\text{-}15\text{ mm h}^{-1}$)

5=lenta ($1\text{-}5\text{ mm h}^{-1}$)

6=muy lento ($< 1\text{ mm h}^{-1}$)

Los datos de textura, estructura, permeabilidad y materia orgánica para resolver la ecuación fueron obtenidos de los datos de los perfiles del suelo de INEGI, encontrados en el área de estudio.

En el Anexo4 y 5 se encuentran los cálculos para el factor K, en ambos enfoques.

Calculo del Factor LS

El factor LS, asocia los factores de longitud y porcentaje de la pendiente.

Se define como:

$$LS = \left(\frac{length}{22.1}\right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \dots\dots\dots Ecuación 11$$

Donde:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{s}{100}\right)\dots\dots\dots Ecuación 12$$

$$m = 0.6[1 - \exp(-35.835 \times s)] \dots\dots\dots Ecuación 13$$

s: pendiente del terreno en %

En el presente trabajo se utilizó la ecuación 11, 12 y 13, para el cálculo del factor LS, el cual fue obtenido en cada unidad morfopedológica en base al a pendiente más representativa y su gradiente. Para el caso del enfoque de cuenca, estos factores fueron determinados a partir de la longitud del cauce principal de la microcuenca y el gradiente de la misma, ambos usando el DEM y el álgebra de mapas, considerando la conversión de los valores de S de radian a decimal, multiplicando por $\pi/180$ (Engel, 2003).

Los cálculos se encuentran en los Anexos6 y 7, de acuerdo a cada enfoque.

Calculo del Factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).

El tipo de uso y vegetación fue determinado mediante la clasificación supervisada de las imágenes multiespectrales del Landsat 8, usando el programa Envi 5.3, donde se obtuvieron 8 unidades cartográficas correspondientes a diferentes de cobertura vegetal (Figura 4).

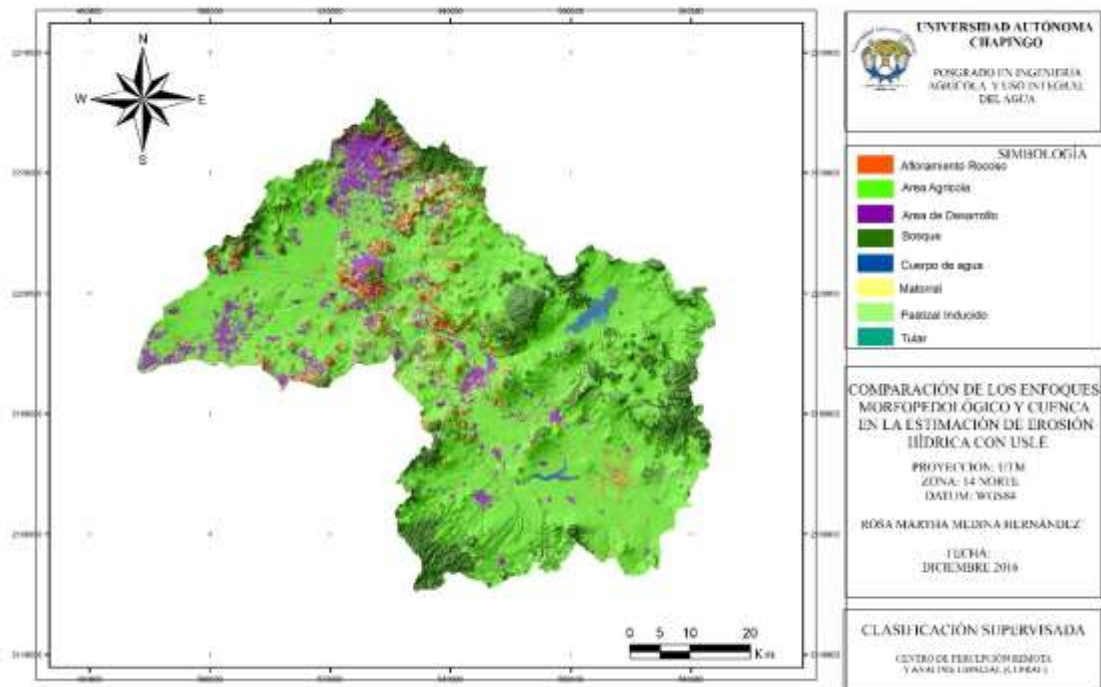


Figura 4 Unidades cartográficas del área de estudio.

Los valores C de la ecuación fueron determinados a partir del tipo de uso y manejo del suelo con apoyo del cuadro 3.

Los cálculos se encuentran en los anexos 8 y 9 para ambos enfoques.

Calculo del Factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P)

En la imagen de satélite se pueden percibir los cambios de cobertura del suelo, aunado a ello se pueden observar las huellas de las prácticas de conservación de suelos que se han realizado en la agricultura, y en algunas zonas de bosque, pastizal o matorral, para tomar el valor de P dentro de cada unidad

morfopedológica se realizó una observación minuciosa de las características de vegetación, pendiente y huellas de prácticas de conservación, dicha información varia de 0 a 1.

En los anexos 10 y 11, se presentan los cálculos para ambos enfoques.

3.6 Resultados

En los cuadros 7 y 8 se pueden observar las 56 unidades morfopedológicas y 61 microcuencas, distribuidas en dos subcuencas (del Río Tezontepe y del Lago Tochac-Tecoculco).

Cuadro 7 Características de las Unidades Morfopedológicas.

No.	Área en km ²	Porcentaje de área	Altura máxima (m)	Altura mínima (m)	Altura media (m)	Amplitud de relieve	Geología	GHS	Uso *
1	437.04	10.80%	2686	2410	2548	276	aluvión	A, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
2	570.89	14.10%	2559	2248	2403.5	311	aluvión	A, B, C, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
3	21.38	0.50%	2852	2523	2687.5	329	aluvión	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
4	10.69	0.30%	2652	2502	2577	150	aluvión	B, C, D	1, 2, 3, 4, 6
5	15.16	0.40%	2484	2352	2418	132	aluvión	B, C, D	1, 2, 3, 4, 6
6	2.64	0.10%	2414	2349	2381.5	65	aluvión	D	1, 2, 3, 4, 6
7	0.06	0.00%	2339	2334	2336.5	5	aluvión	D	2
8	23.52	0.60%	2717	2546	2631.5	171	aluvión	D	1, 2, 3, 4, 6, 7
9	1.48	0.00%	2768	2680	2724	88	aluvión	C, D	2, 4
10	991.91	24.50%	3203	2270	2736.5	933	Andesita Basalto	A, B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
11	87.75	2.20%	2996	2483	2739.5	513	Andesita Basalto	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
12	14.26	0.40%	2686	2443	2564.5	243	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
13	134.71	3.30%	3023	2450	2736.5	573	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
14	54.94	1.40%	2899	2326	2612.5	573	Andesita Basalto	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6
15	6.86	0.20%	2665	2323	2494	342	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 3, 4, 6
16	7.7	0.20%	2462	2316	2389	146	Andesita Basalto	B, C, D	1, 2, 3, 4, 6
17	0.88	0.00%	2451	2320	2385.5	131	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 4
18	40.55	1.00%	2950	2569	2759.5	381	Andesita Basalto	B, C, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
19	99.06	2.40%	2876	2501	2688.5	375	Andesita Basalto	D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
20	204.32	5.10%	3502	2560	3031	942	Lahar Toba Andesitica	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
21	6	0.10%	2821	2580	2700.5	241	Andesita Basalto	D	1, 2, 3, 4, 7
22	3.56	0.10%	2345	2265	2305	80	Andesita Basalto	A, C, D	1, 2, 3, 4, 6
23	7.25	0.20%	2423	2327	2375	96	Andesita Basalto	A, B, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
24	7.63	0.20%	3091	2566	2828.5	525	Riolita Toba Riolitica	C, D	1, 2, 3, 4, 6, 7

25	33.56	0.80%	3062	2483	2772.5	579	Toba andesitica	B, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
26	1.14	0.00%	2462	2367	2414.5	95	Andesita Basalto	D	1, 2, 3, 6
27	0.98	0.00%	2567	2446	2506.5	121	Andesita Basalto	A, D	1, 2, 3, 4
28	6.7	0.20%	2844	2501	2672.5	343	Andesita Basalto	A, D	1, 2, 4, 6
29	17.83	0.40%	2814	2419	2616.5	395	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 3, 4, 6
30	2.68	0.10%	2541	2385	2463	156	Andesita Basalto	C, D	1, 2, 4, 6
31	0.84	0.00%	2524	2444	2484	80	Andesita Basalto	A, D	1, 2, 3, 4, 6
32	0.43	0.00%	2503	2455	2479	48	Andesita Basalto	A, D	1, 2, 4
33	93.59	2.30%	2774	2319	2546.5	455	Conglomerado Polimítico Arenisca	A, B, C, D	1, 2, 3, 4, 6
34	133.48	3.30%	2999	2525	2762	474	Lacustre	B, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
35	61.9	1.50%	3388	2674	3031	714	Andesita Dacita	B, D	2, 3, 4, 7
36	15.27	0.40%	2822	2692	2757	130	Toba andesitica	B, C, D	1, 2, 4, 6, 7
37	13.98	0.30%	2970	2541	2755.5	429	Andesita Rioluta Toba Dacita	C, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
38	67.61	1.70%	3067	2489	2778	578	Rioluta Toba Dacita	D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
39	22.27	0.60%	2917	2592	2754.5	325	Toba andesitica	C, D	1, 2, 3, 4, 7
40	83.71	2.10%	2746	2501	2623.5	245	Andesita	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
41	49.59	1.20%	2361	2248	2304.5	113	Lacustre	A, D	1, 2, 3, 4, 6
42	14.74	0.40%	3803	3078	3440.5	725	Andesita Dacita	C	2, 4, 7
43	13.34	0.30%	2676	2589	2632.5	87	Lacustre	B, D	1, 2, 3, 4, 6, 7
44	111.02	2.70%	2870	2482	2676	388	Lacustre	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
45	5.67	0.10%	2971	2687	2829	284	Rioluta Toba Dacita	C, D	1, 2, 4, 7
46	4.41	0.10%	2622	2442	2532	180	Andesita Dacita	C, D	1, 2, 3, 4, 6
47	14.61	0.40%	2910	2455	2682.5	455	Andesita Dacita	A, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6
48	2.13	0.10%	2799	2622	2710.5	177	Rioluta Toba Dacita	D	1, 2, 4, 7
49	1.9	0.00%	2862	2728	2795	134	Andesita Dacita	C, D	2, 3, 4, 7
50	3.53	0.10%	3051	2770	2910.5	281	Andesita Dacita	D	2, 4, 7
51	1.3	0.00%	2503	2384	2443.5	119	Andesita Basalto	A, D	1, 2, 3, 6
52	32.28	0.80%	3263	2446	2854.5	817	Andesita Dacita	C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
53	174.68	4.30%	3074	2470	2772	604	Toba andesitica	C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
54	101.66	2.50%	3032	2522	2777	510	Andesita Toba andesitica	B, C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
55	85.81	2.10%	2945	2321	2633	624	Toba andesitica	A, B, C, D	1, 2, 3, 4, 6
56	122.09	3.00%	3045	2334	2689.5	711	Andesita Dacita	C, D	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8

* 1 Afloramiento Rocoso, 2 Área Agrícola, 3 Área de Desarrollo, 4 Bosque, 5 Cuerpo de agua, 6 Matorral, 7 Pastizal Inducido, 8 Tular.

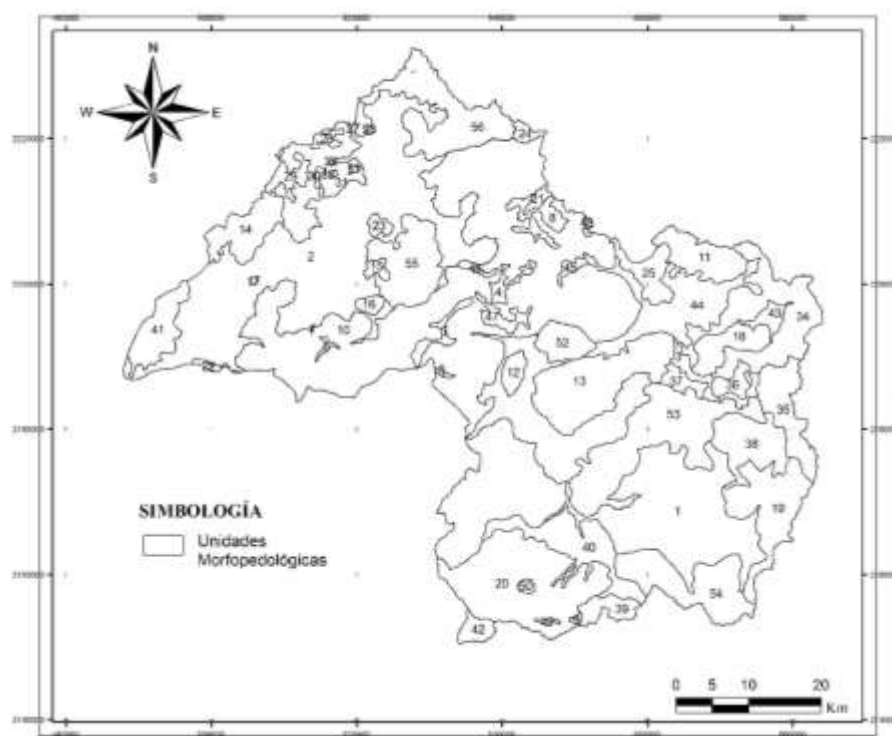


Figura 5 Subdivisión de las Unidades Morfopedológicas

Cuadro 8 Algunas características de las microcuencas.

Número	AREA (Km ²)	Cauce (m)	Pendiente media (%)	Forma *
1	41.90856	7025	14.2349	Ovalada
2	39.21568	5680	12.3239	Ovalada
3	27.07822	6122	13.0676	Redonda
4	101.09863	12981	6.9332	Oblonga
5	19.69157	4617	10.8295	Ovalada
6	66.54678	11690	8.5543	Oblonga
7	37.11054	9387	9.5877	Ovalada
8	37.76047	5497	0.4366	Ovalada
9	27.78693	9942	7.0408	Oblonga
10	30.75536	12736	4.6954	Oblonga
11	29.63823	6068	6.6908	Redonda
12	41.32171	15680	5.3189	Oblonga
13	30.52105	6930	5.2237	Ovalada
14	40.70387	6278	12.5518	Ovalada
15	32.41332	8360	7.823	Ovalada
16	54.33696	12673	8.3011	Oblonga
17	93.45396	17572	3.9381	Oblonga
18	57.84249	10823	8.5928	Oblonga
19	113.47213	12994	3.7094	Oblonga

20	110.06642	9756	12.5051	Oblonga
21	24.26462	7379	8.4022	Oblonga
22	95.19501	17870	4.723	Oblonga
23	34.61655	6795	9.1244	Oblonga
24	123.51928	16704	8.6207	Oblonga
25	51.11831	9806	6.2819	Ovalada
26	38.28161	8928	5.9364	Oblonga
27	31.91075	8240	10.4126	Oblonga
28	26.12472	3191	1.8803	Oblonga
29	117.62548	16181	6.4644	Oblonga
30	54.16382	10028	13.0634	Ovalada
31	78.52182	14153	3.3915	Oblonga
32	62.70727	9859	1.278	Ovalada
33	71.52883	10520	4.1445	Oblonga
34	67.28617	11980	7.3957	Oblonga
35	105.8705	17997	4.7452	Oblonga
36	49.96922	10950	9.4064	Oblonga
37	59.95022	11498	1.5307	Ovalada
38	49.56085	10270	6.7575	Ovalada
39	124.71758	18870	13.6513	Oblonga
40	41.84707	10475	3.4558	Oblonga
41	53.33104	12119	3.2346	Ovalada
42	65.13405	8927	10.9779	Redonda
43	108.4178	15043	3.5365	Ovalada
44	72.18276	11832	0.9466	Oblonga
45	62.69059	14479	3.1356	Oblonga
46	97.45984	11940	1.9765	Ovalada
47	23.85088	9517	7.6074	Oblonga
48	47.16253	10053	7.6992	Ovalada
49	83.12105	14007	14.1929	Oblonga
50	194.46705	15141	4.0288	Ovalada
51	65.25998	19419	4.7788	Oblonga
52	141.56706	10679	7.5662	Ovalada
53	43.38609	11738	2.9988	Oblonga
54	15.35173	4796	2.1268	Oblonga
55	59.12371	18610	7.7055	Oblonga
56	104.53675	12531	7.1183	Oblonga
57	23.15408	7360	1.6576	Oblonga
58	124.77821	26580	8.6381	Oblonga
59	35.80617	7700	3.5584	Oblonga
60	52.7018	9850	7.2487	Redonda
61	35.00463	12048	1.2948	Ovalada

* Calculada a partir del coeficiente de Gravelius de cada microcuenca.

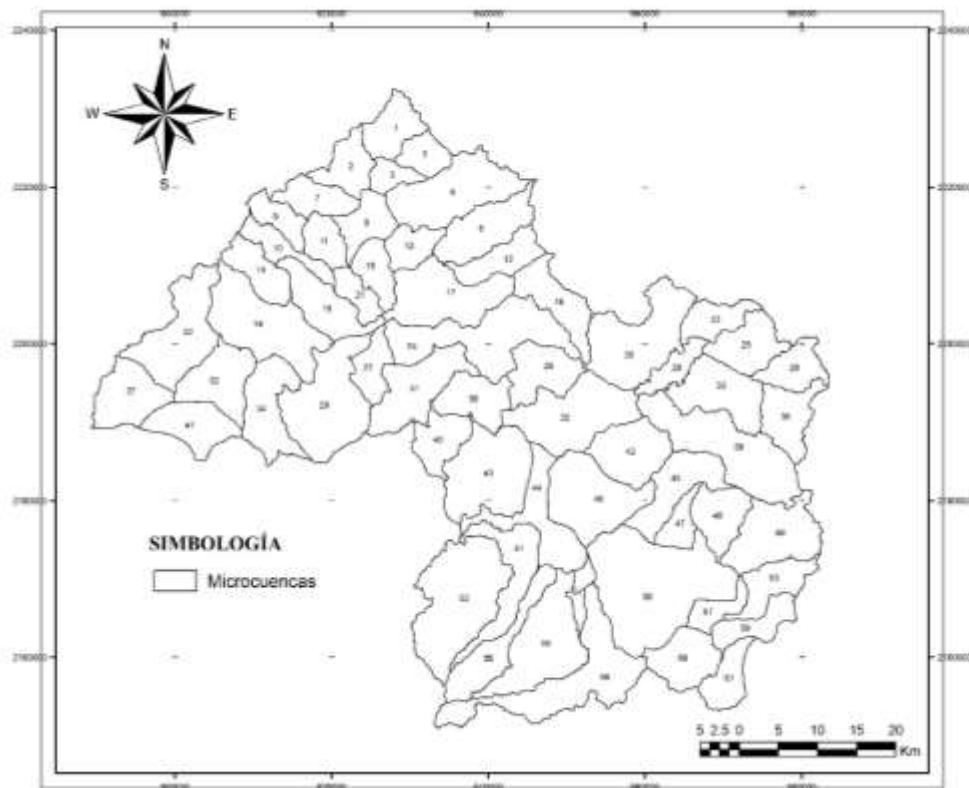


Figura 6 Subdivisión de las microcuencas.

3.6.1. Clasificación de la imagen de satélite

Los tipos de uso y vegetación fueron determinados mediante la clasificación supervisada de las imágenes multiespectrales del Landsat 8, usando el programa Envi 5.3, donde se obtuvieron 8 unidades cartográficas correspondientes a diferentes de cobertura vegetal (Figura 4).

3.6.2. Cálculo de la erosión actual y potencial con el enfoque

Morfopedológico

Se obtuvieron 56 unidades morfopedológicas (cuadro 7), para las cuales se calcularon la perdida de suelo por erosión con la Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Para ello se estimó cada uno de los factores de la ecuación. Cada factor se generó en formato raster.

La figura 6 muestra la distribución del factor Erosividad R, con valores que oscilan entre 1,351 a 3,434, donde podemos observar que los valores más bajos y se encuentran en 24 unidades: 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 25, 31, 37, 41, 45, 46, 47, 48, 52 y 55 ubicadas mayormente en la planicie aluvial y los valores más altos en las unidades con número 9, 20, 35, 39, 42, 43 y 49, ubicadas en las partes altas.

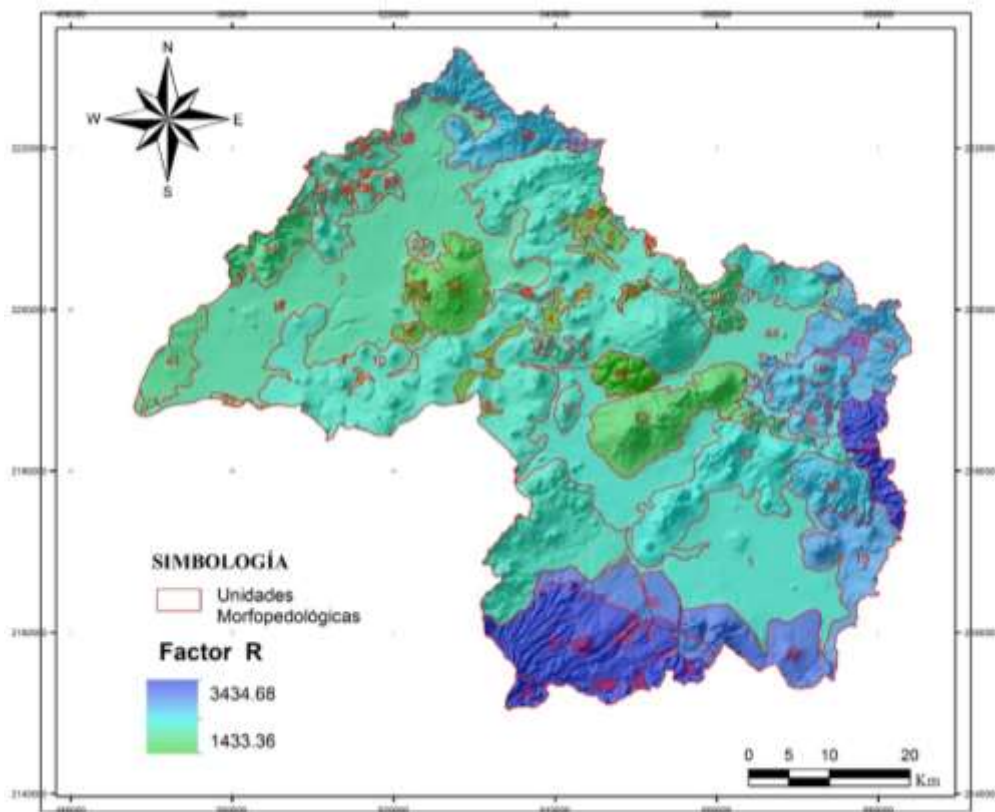


Figura 7. Factor de erosividad de la lluvia, por unidad morfoedológica.

Los valores del factor Erodabilidad del suelo K se muestran en la figura 8, con valores que fluctúan de 0.005 a 0.0354; se puede observar que el valor de K que más abunda es de 0.028 debido a que esta área presenta características comparables de textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad.

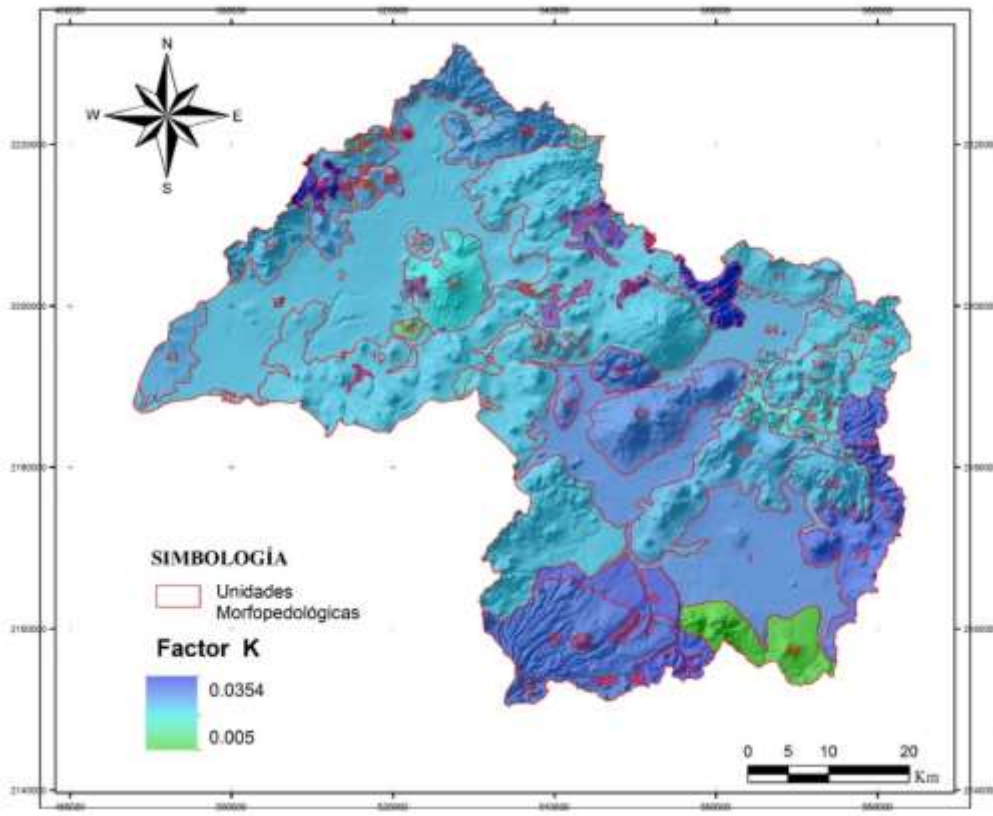


Figura 8. Factor de erodabilidad del suelo, por unidad morfoedológica.

La figura 9 muestra la distribución del factor LS que presenta valor máximo de 75.5 en las partes altas y accidentadas, y un mínimo de 0.44 en la planicie donde se encuentran los aluviones.

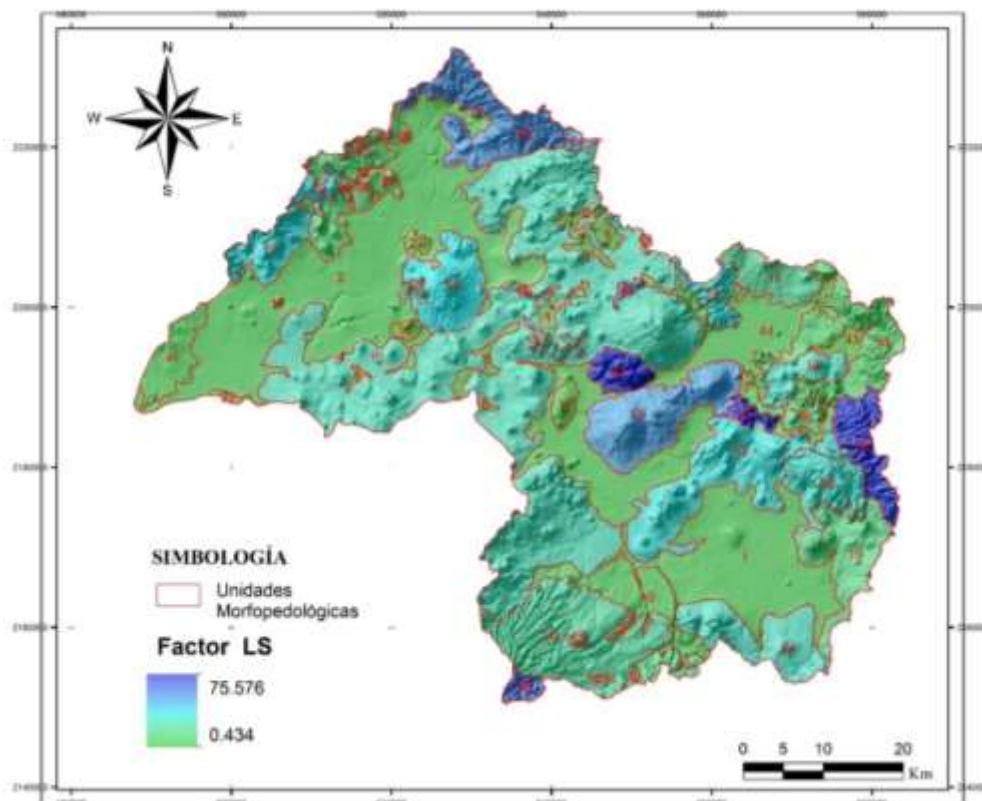


Figura 9. Factor de longitud y grado de pendiente, por unidad morfoedológica.

En la figura 10 se muestra la distribución del factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo C, cuyos valores oscilan de 0.001 a 0.14 y están muy asociados a los tipos de uso del suelo que se aparecen en la figura 10.

Los valores medios de C corresponden al área agrícola, los valores más altos se presentan en área con cobertura escasa o nula. Los valores para área de afloramiento rocoso y cuerpo de agua fueron los más bajos, 0.0001.

Los valores de prácticas de conservación P se muestran en la figura 11. El valor de P varia de 0.04 a 0.35, los valores más bajos se presentan en las unidades morfoedológicas 9, 26, 2, 31, 42, y los valores altos se observan que en las unidades 21, 37, 50, 52, 29, 30 y 48.

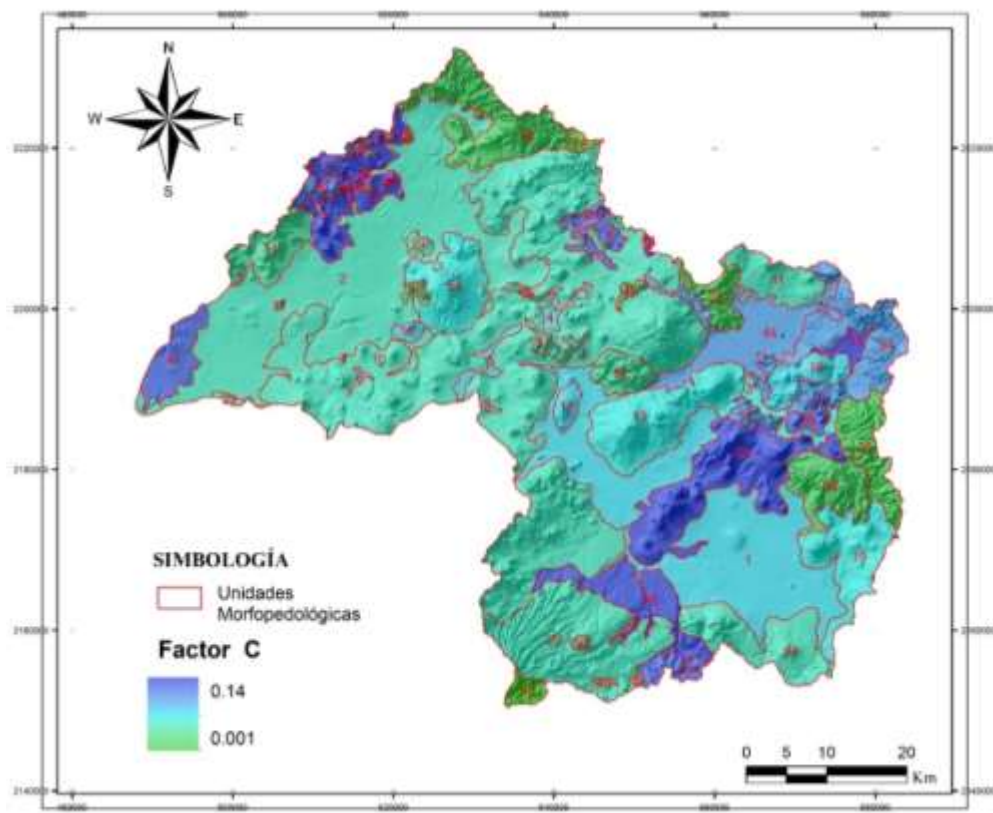


Figura 10. Factor de cobertura del suelo, por unidad morfopedológica.

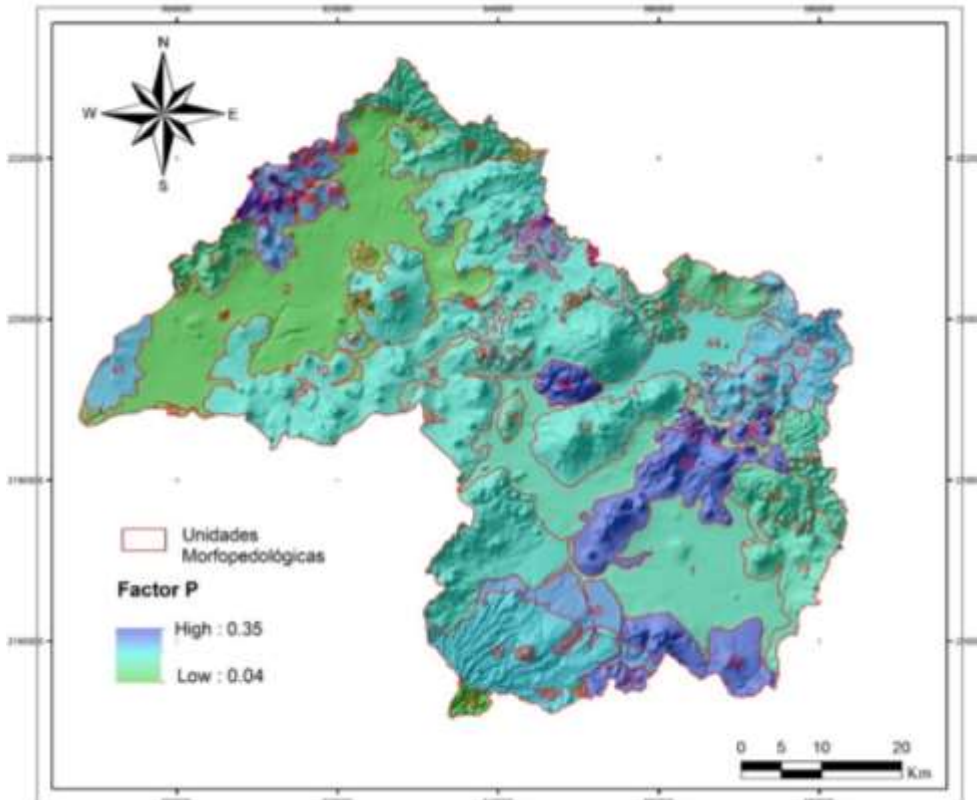


Figura 11. Factor de prácticas de conservación de suelo, por unidad morfopedológica.

El cálculo de la erosión actual y potencial del suelo de acuerdo a USLE (Mg ha^{-1}) y al procedimiento descrito anteriormente se muestra en el Anexo 13. De acuerdo con las clases de erosión de FAO (nula ($<2 \text{ ton ha}^{-1}$); ligera ($2\text{-}10 \text{ ton ha}^{-1}$); moderada ($10\text{-}50 \text{ ton ha}^{-1}$); alta ($50\text{-}200 \text{ ton ha}^{-1}$); muy alta ($>200 \text{ ton ha}^{-1}$)), se muestran las clases de erosión correspondiente al área de estudio.

Cuadro 9 Comparación de la erosión actual y potencial de acuerdo a la morfopedología.

Clases de tasa de erosión	Erosión Actual (%)	Unidades morfopedológicas	Erosión Potencial * (%)	Unidades morfopedológicas
Nula	27.4%	26, 42, 16, 2, 5, 23, 9, 31, 6, 7, 24, 15, 3, 4, 1, 17	0	
Ligera	53.5%	22, 8, 44, 54, 25, 46, 38, 43, 11, 41, 14, 47, 56, 12, 45, 19, 10, 55, 35, 34, 40	0	
Moderada	18.7%	2020, 33, 13, 27, 49, 28, 21, 51, 18, 36, 30, 48, 39, 53, 52, 29	0.6%	7, 16, 5
Alta	0.4%	37, 50	33.5%	23, 6, 8, 17, 43, 4, 22, 2, 44, 41, 3, 1, 54,
Muy alta	0.0%	0	66.0%	32, 46, 40, 31, 12, 49, 34, 33, 51, 21, 36, 9, 28, 30, 15, 11, 19, 26, 48, 27, 55, 10, 39, 14, 18, 25, 53, 38, 20, 13, 45, 29, 47, 24, 56, 37, 42, 52, 50, 35

* Para la erosión potencial de P y C toman el valor de 1, considerando que no existe ni vegetación ni prácticas de conservación de suelo.

En el cuadro anterior, se puede observar que la erosión actual ocurre como erosión ligera en la mayor del área estudiada, mientras que la erosión potencial es muy alta en la mayor extensión del área estudiada (figuras 12 y 13).

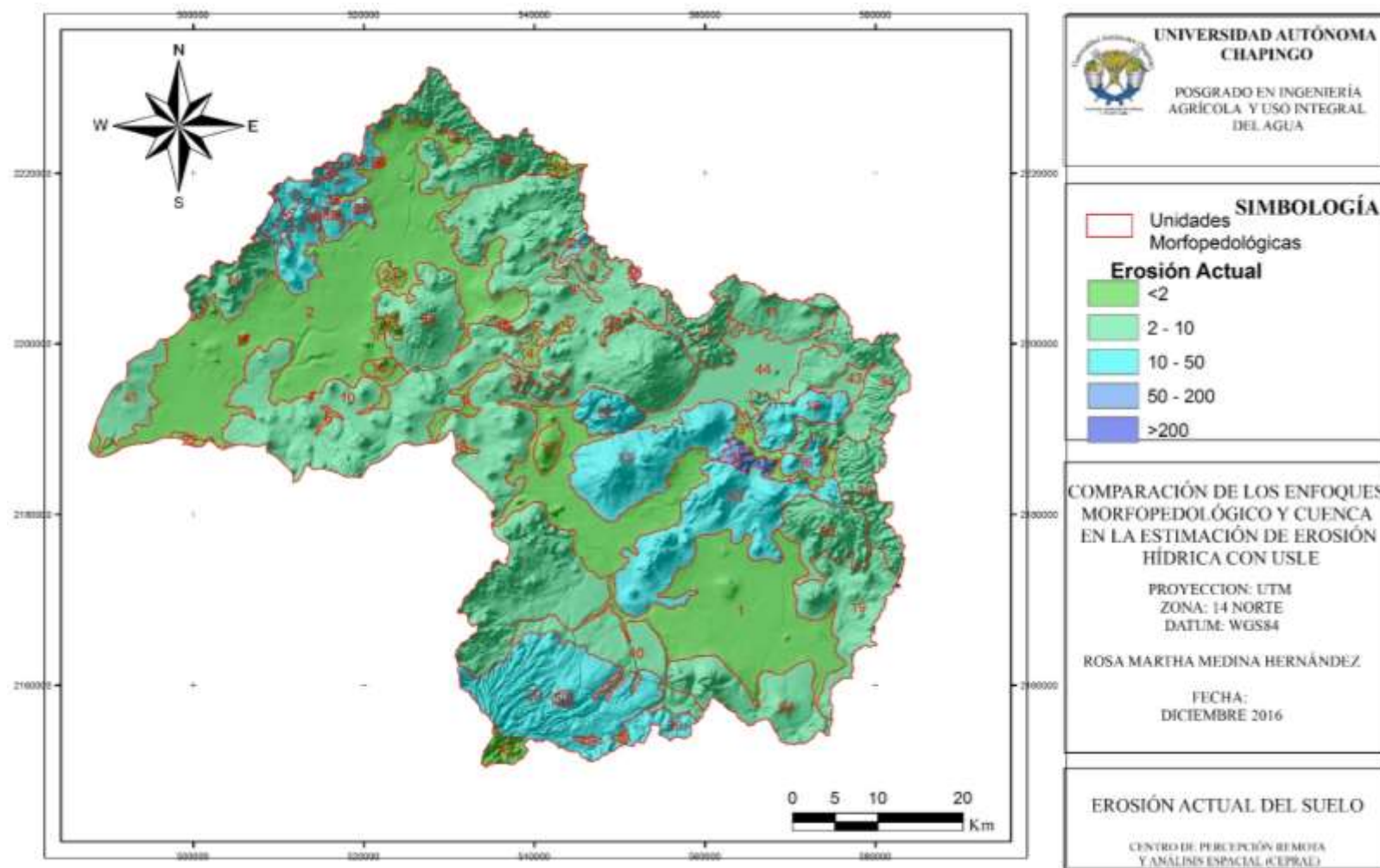


Figura 12. Erosión Actual del suelo, por unidad morfopedológica.

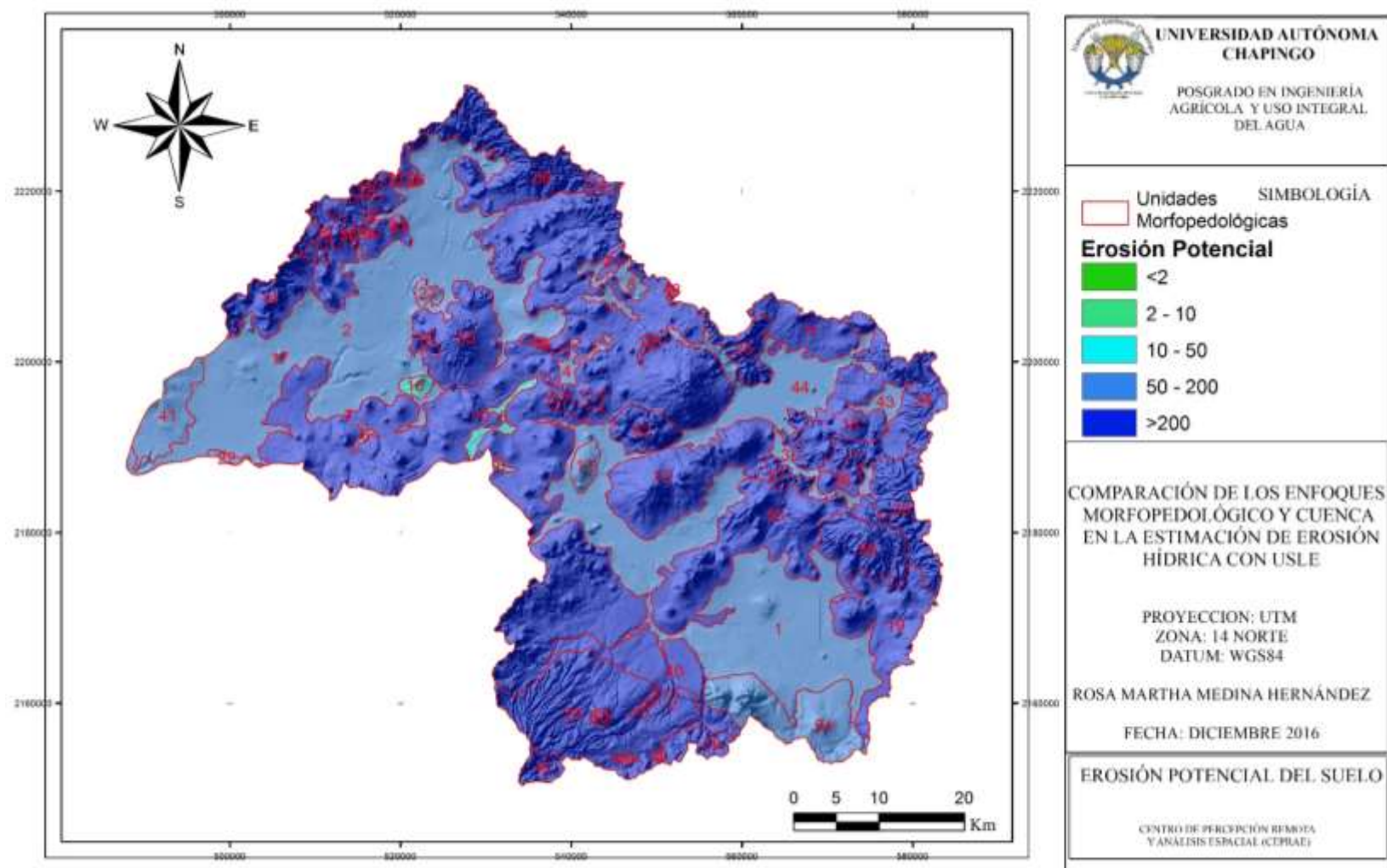


Figura 13. Erosión Potencial del suelo, por unidad morfopedológica.

3.6.3. Cálculo de la erosión actual y potencial con el enfoque de cuenca.

Con este enfoque el área de estudio fue subdividida en 61 microcuencas, a partir del DEM de 30x30 de INEGI, el cálculo de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo, así como el mapa de cada uno de ellos se presenta a continuación.

La figura 14 muestra la distribución del factor Erosividad R, con valores que oscilan entre 1,641 a 2,955, donde podemos observar que los valores más bajos y se encuentran en 20 microcuencas: 1, 2, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 27, 29, 30, 31, 32, 35, 37, 38, 40 y 43, ubicados en la zona de los aluviones y los valores más altos en las microcuencas con número 26, 36, 49, 51, 52, 53, 55, 56, 58, 59 y 60, ubicadas en las partes altas.

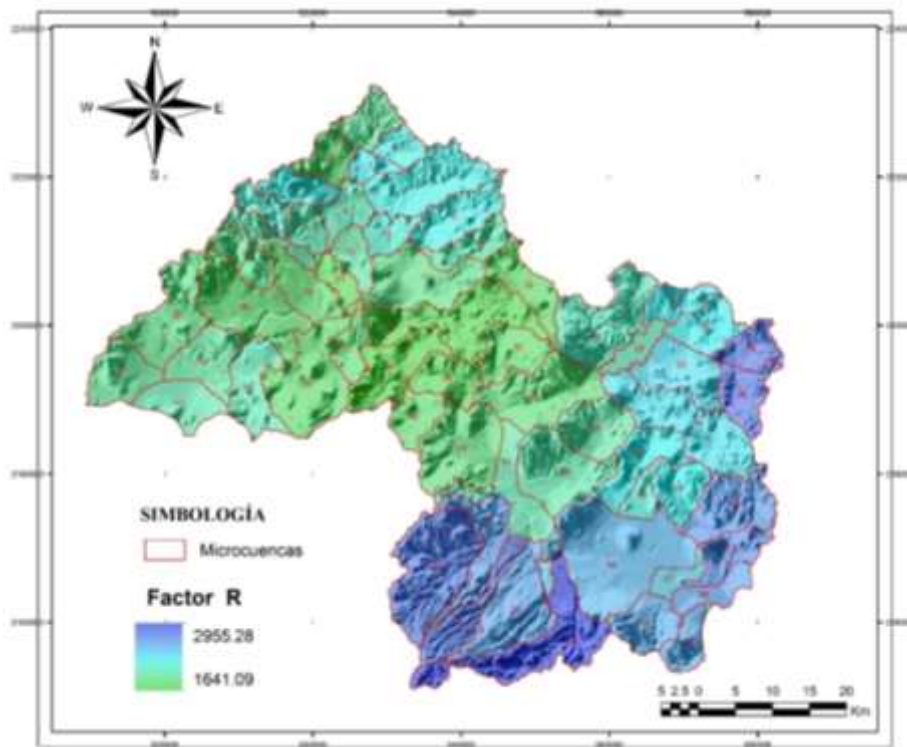


Figura 14. Factor de erosividad de la lluvia, por microcuenca.

Los valores de la erodabilidad del suelo K se muestran en la figura 15, con valores que fluctúan de 0.0231 a 0.0354; se puede apreciar que el valor de K es

que más abunda es de 0.029 debido a que esta área presenta características comparables de textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad.

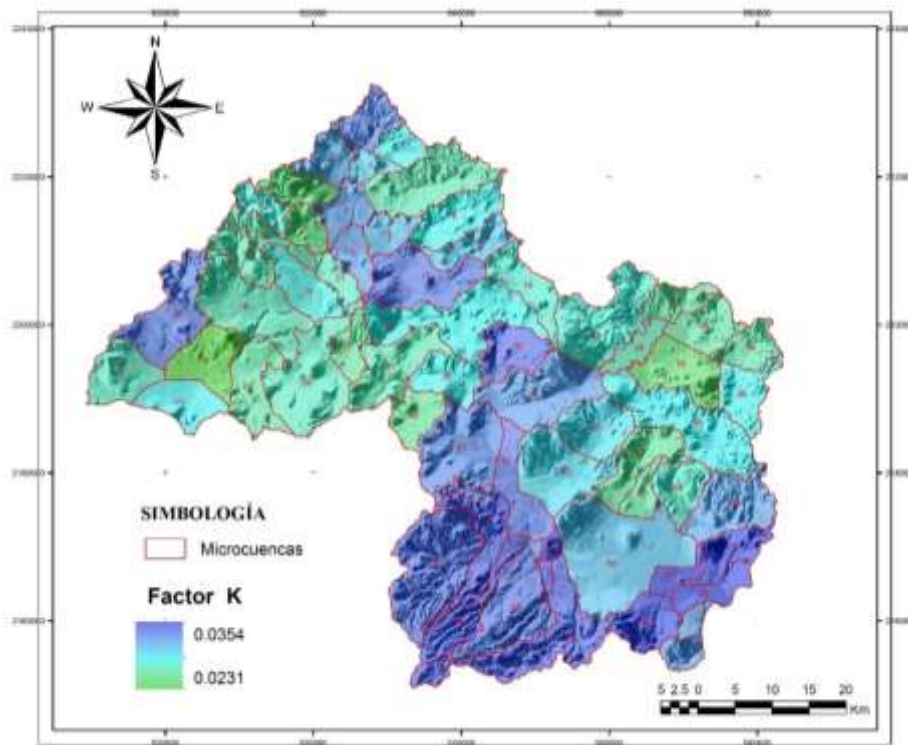


Figura 15. Factor de erodabilidad del suelo, por microcuenca.

La figura 16 muestra la distribución del factor LS que presenta valor máximo de 2.694 en las partes altas y accidentadas, y un mínimo de 0.099 en gran parte de la planicie donde se encuentran los aluviones y microcuencas con menor diferencia de elevaciones.

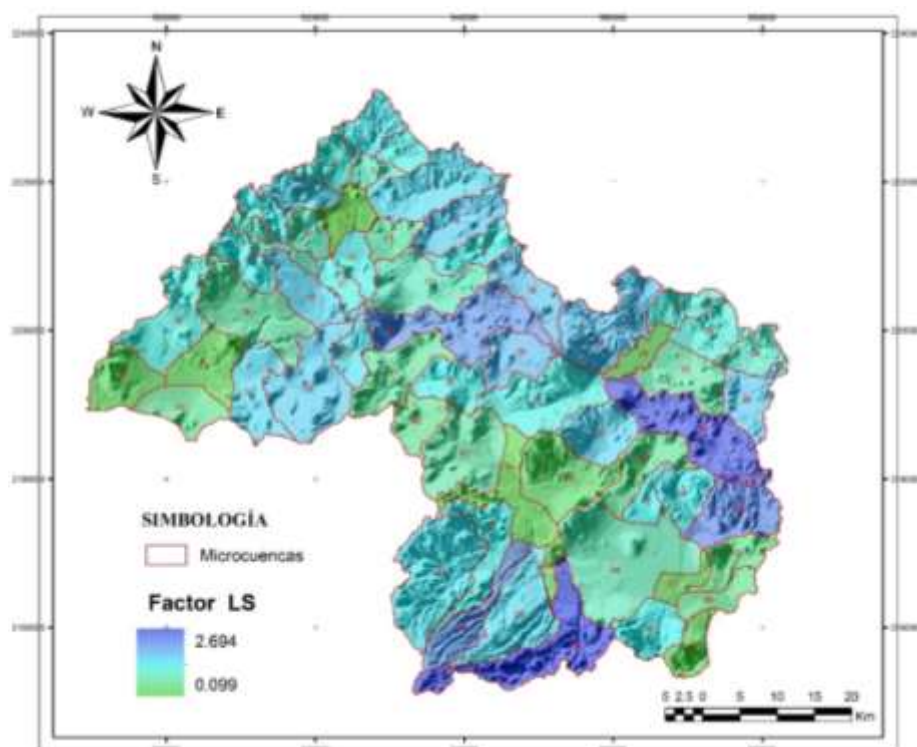


Figura 16. Factor de longitud y grado de pendiente, por microcuenca.

En la figura 17 se muestra la distribución del factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo C, cuyos valores oscilan de 0.03 a 0.11 y están muy asociados a los tipos de uso del suelo que se aparecen en la figura 5.

Los valores de prácticas de conservación P se muestran en la figura 18. El valor de P varía de 0.096 a 0.252, los valores más bajos se presentan en las microcuencas 7, 3, 4, 6, 5, 21, 34, y los valores altos se observan que en las microcuencas 26, 47, 50, 60, 61, 45, 56, 42, 8, 54 y 11.

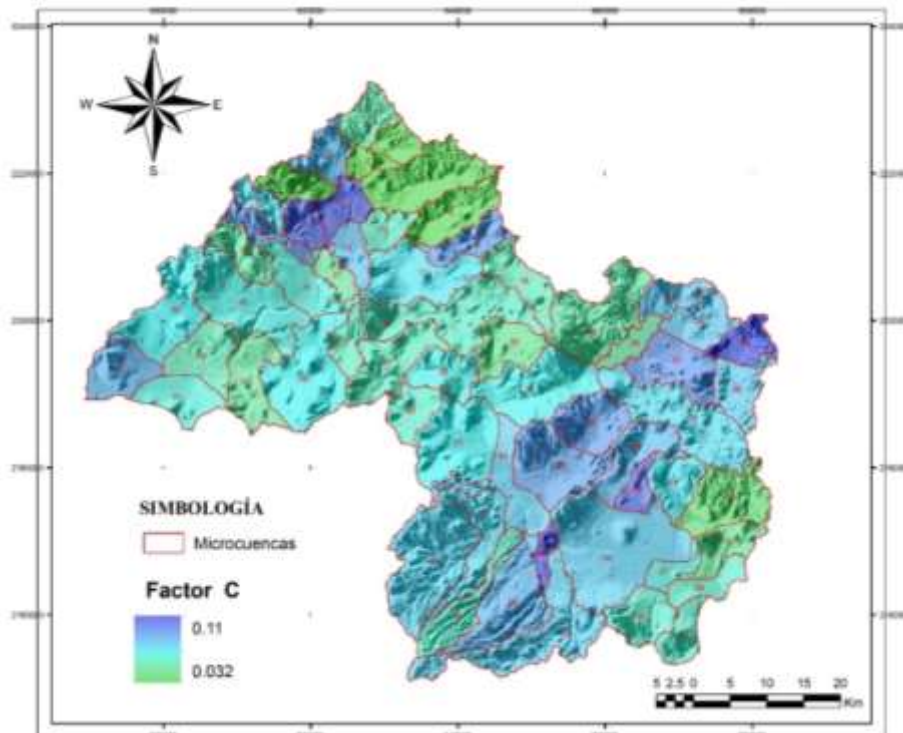


Figura 17. Factor de cobertura del suelo, por microcuencia.

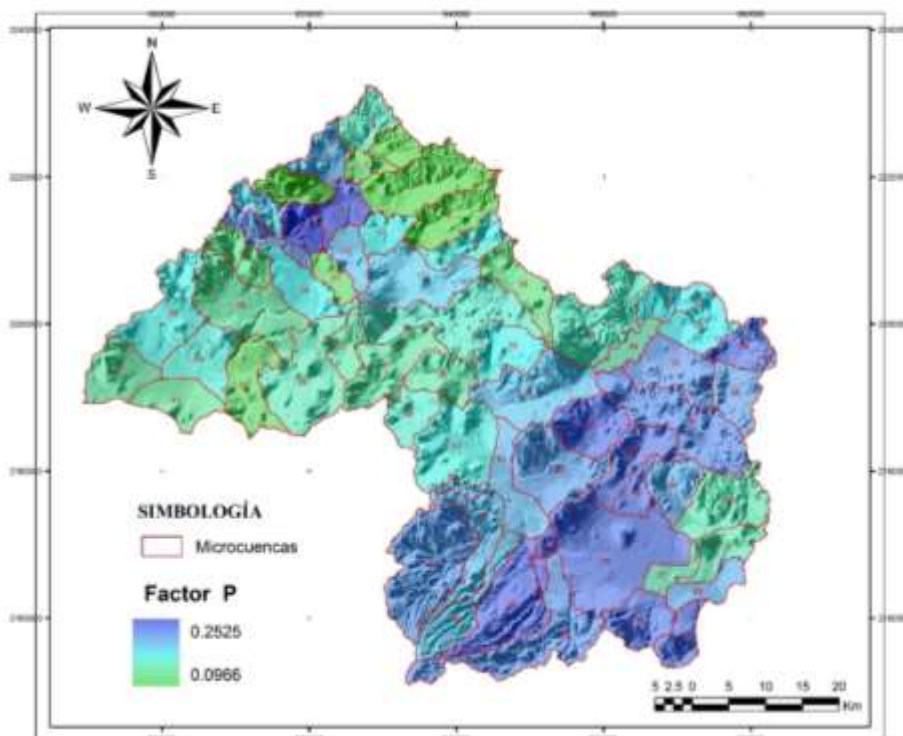


Figura 18. Factor de prácticas de conservación de suelo, por microcuencia.

El cálculo de la erosión actual y potencial del suelo de acuerdo a USLE (Mg ha^{-1}) y se presentan en el Anexo12. De acuerdo con las clases de erosión de FAO, se muestran las clases de erosión correspondiente al área de estudio, para el enfoque de cuenca.

Cuadro 10 Comparación de la erosión actual y potencial de acuerdo al enfoque de cuenca.

Clases de tasa de erosión	Erosión Actual (%)	Unidades microcuencas	Erosión Potencial * (%)	Unidades microcuencas
Nula	83.3%	32, 28, 8, 37, 44, 57, 61, 31, 5, 3, 40, 7, 21, 4, 41, 19, 6, 46, 53, 34, 14, , 43, 27, 16, 13, 38, 54, 59, 1, 45, 29, 20, 17, 30, 22, 18, 33, 24, 35, 25, 23, 10, 2, 9, 49, 12, 11, 15, 50,	0%	
Ligera	16.7%	6, 46, 53, 34, 14, 43, 27, 16, 13, 38, 54, 59, 1, 45, 29, 20, 17, 30, 22, 18, 24	3%	8, 32
Moderada	0.0%	0	22.3%	44, 28, 37, 61, 46, 57, 54, 40, 31, 19, 41, 45, 33, 43
Alta	0.0%	0	71.8%	11, 59, 53, 10, 21, 13, 17, 38, 14, 27, 2, 50, 35, 5, 25, 23, 22, 29, 18, 47, 26, 9, 12, 16, 15, 34, 3, 7, 48, 4, 1, 42, 24, 20, 30, 6, 51, 60, 56, 52, 36, 39, 49, 55
Muy alta	0.0%	0	3.2%	58

* Para la erosión potencial de P y C toman el valor de 1, considerando que no existe ni vegetación ni prácticas de conservación de suelo.

En el cuadro anterior, se puede observar que la erosión actual ocurre como erosión ligera en la mayor del área estudiada, mientras que la erosión potencial es muy alta en la mayor extensión del área estudiada (figuras 19 y 20).

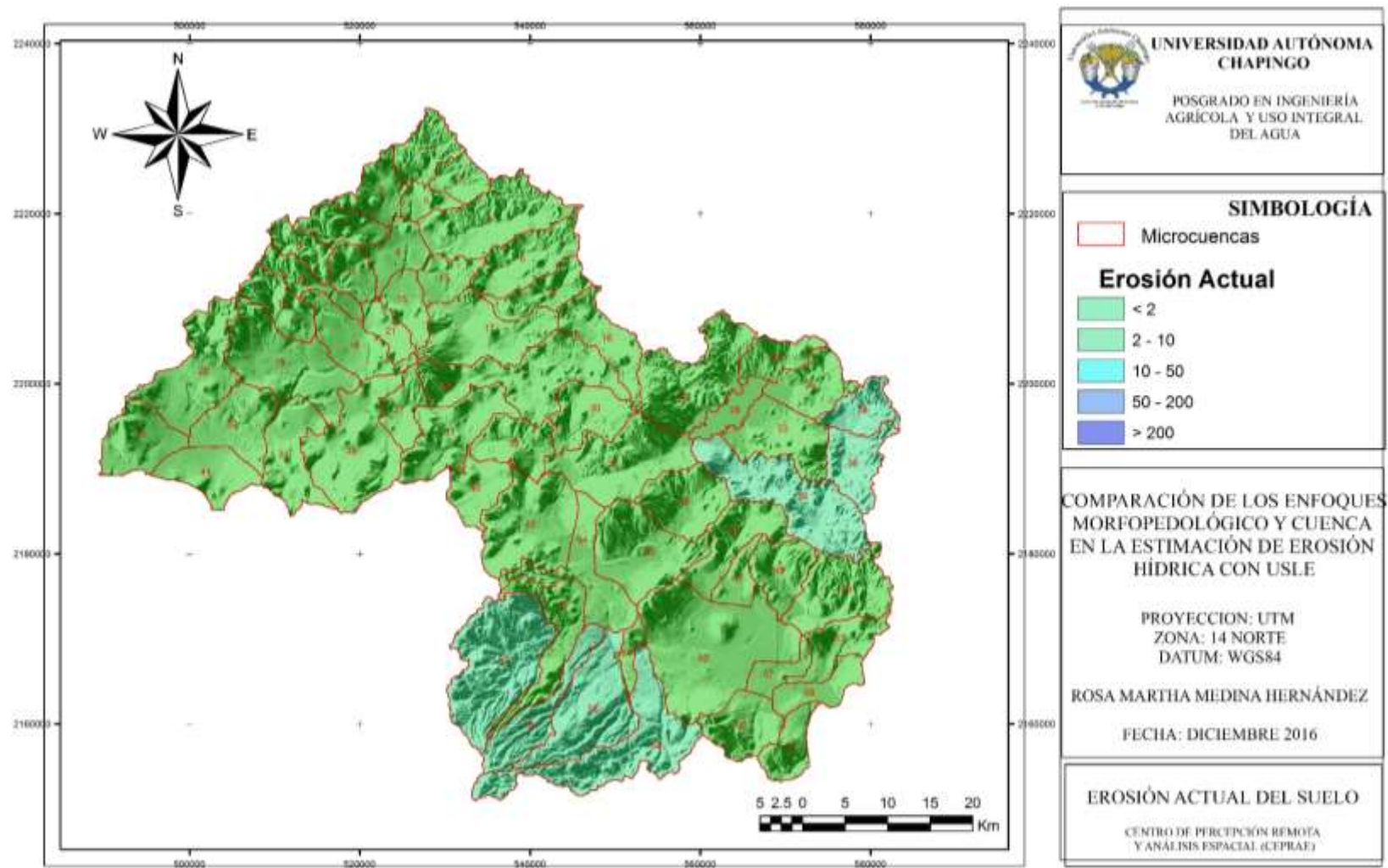


Figura 19. Erosión actual del suelo, por microcuenca.

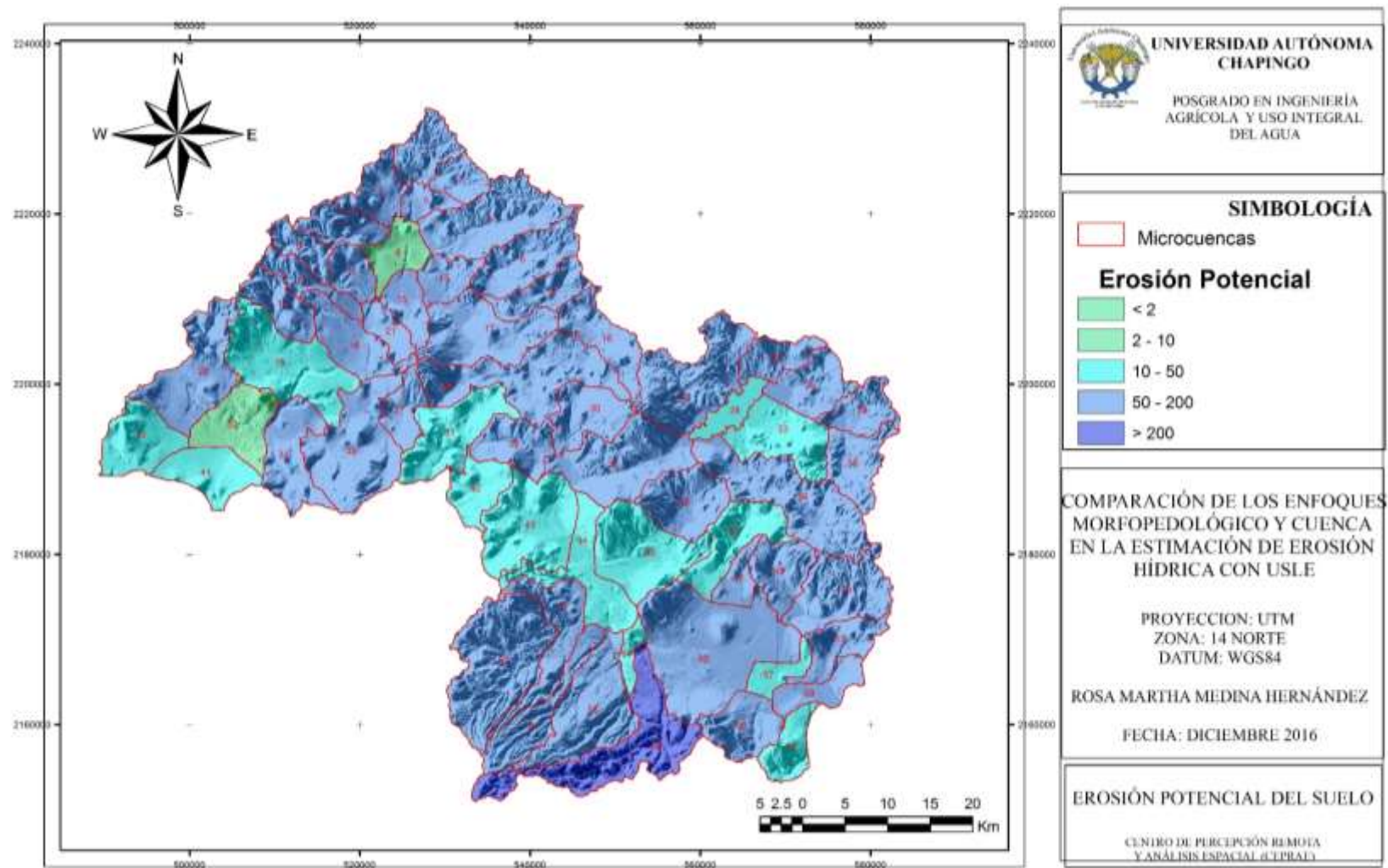


Figura 20. Erosión potencial del suelo, por microcuenca.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

De acuerdo a la clasificación de la FAO, 1980, la erosión actual calculada con el enfoque de microcuencas, el 83.3% de la superficie estudiada presenta una erosión nula ($<2 \text{ ton ha}^{-1}$), solo el 16.7% presenta una erosión ligera ($2-10 \text{ ton ha}^{-1}$). Con el enfoque morfopedológico solo el 27.4% del área estudiada presenta una erosión nula, el 53.5% una erosión ligera ($2-10 \text{ ton ha}^{-1}$), y el 18.7% de moderada ($10-50 \text{ ton ha}^{-1}$).

Los resultados obtenidos con el enfoque morfopedológico son mucho más congruentes con la realidad. La subestimación de los valores calculados de la erosión actual con el enfoque de cuencas, se debe básicamente a que la cuenca no es una unidad homogénea para la aplicación de USLE, especialmente en cuanto al factor LS. El factor L fue calculado en base a la longitud del cauce principal y S fue estimado en base a las alturas máxima y mínima que se presentan en la microcuenca y la longitud de la pendiente media de cada microcuenca.

La erosión potencial calculada con el enfoque de microcuencas arroja tasa de erosión moderada a alta en el 94% del área de estudio, solo el 3% del área presenta una erosión muy alta, y 3% una erosión ligera. En las unidades morfopedológicas la tasa de erosión de moderada a alta ocurre en el 34%, y erosión muy alta en 66% del área estudiada.

Comparando los promedios ponderados de las tasas de erosión actual y potencial en ambos enfoques, la tasa de erosión con el enfoque morfopedológico dio valores de 7.63 y $693 \text{ Mg.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, respectivamente; y con el enfoque de cuenca los valores fueron 1.1 y $88 \text{ Mg.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

El enfoque de cuenca subestimo los valores de erosión tanto actual como potencial.

Con ello podemos señalar que el cálculo de la erosión difiere de acuerdo a la subdivisión del área de estudio, por lo cual las unidades morfopedológicas

comparada a las microcuencas, es la forma óptima para el cálculo de la pérdida de suelos, ya que las unidades morfológicas son mucho más homogéneas que las microcuencas.

3.7. Literatura citada

- Alcañiz, J. M. 2008. Erosión: Evaluación del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo. In: Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica. Andrés, P. y Rodríguez. R. (Eds.) Girona España.
- Blanco, H., Lal, R. 2008. Principles of soil conservation and management. Springer, USA
- CONAGUA. 2013. Estadísticas del agua en México. Edición 2013. SEMARNAT. México.
- CONAGUA. Compendio del agua, 2004, región XII. México, CONAGUA. (2004).
- CONAGUA. Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. SMARN. 2009.
- Consejo del sistema Veracruzano del Agua. 2002. Análisis integral de los recursos hidráulicos en la cuenca del río Pánuco
- Engel, B. 2003. Estimating Soil Erosion Using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) Using ArcView. Department of Agricultural and Biological Engineering. Department Report. Purdue University.
- FAO, 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- Figueroa S., Amante O., Cortes T., Pimentel L., Osuna C., Rodríguez O., Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados, México.
- Flores López, H. E., Martínez Menes, M., Oropeza Mota, J., Mejía Saens, E., & Carrillo González, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo. Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2, pp. 233-244.
- Ibañez Asencio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (s.f.). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- INEGI. 2007. Carta Topográfica, E14-2 y F14-11. México.
- INEGI. 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, E14-2 y F14-11. México.
- Maderey R.L.E, Jiménez R.A. Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global.
- Oyarzun Ortega, C. E. (1993). Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío. Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile, 45-54.
- Paulhus, J. L., & Kohler, M. A. 1952. Interpolation of missing precipitation records. Mon. Weather Rev, 80(8), 129-133.
- Sánchez, J. G. (s.f.). Manual de Ingeniería de Ríos. México: UNAM.
- Santacruz de León, G. (2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso del suelo en la cuenca del Río Cahoacan, Chiapas, México. Aqua-LAC - Vol. 3 - Nº.1, 45-54.
- Schwab Glenn O., Ingeniería de conservación de suelos y agua, Editorial LIMUSA, México, 1990.

- SEMARNAT y CP. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México. 2003.
- SGM. 1997. Carta geológica minera Pachuca F14-11. México.
- SGM. 2002. Carta geológica minera Cd. De México E14-02. México.
- SMN. 2016. Normales climatológicas con datos mensuales. México.
- Tricart, J., Killian, J." La ecogeografía y la ordenación del medio natural. Anagrama, Barcelona, 1982, 288 pp. (trad. J. Jordá, C. Nieto, N. Pérez de Lara).
- Ururtia, C. B. (s.f.). Aplicación de la Ecuación universal de la pérdida de suelo en la provincia de Buenos Aires. Buenos Aires: Castelar.
- USGS. 2016. Imágenes Landsat-8 multiespectrales. EU.

4. ANEXOS

Anexo 1 Factor Erosividad (R), de acuerdo a la estación meteorológica

No.	ESTACION	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	Ppt anual (mm)	GRUPO	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)
1	13006	CIUDAD SAHAGUN	2186268.67	543939.3	408.50	1	873.21
2	13008	EL MANANTIAL	2195068.13	506660.27	545.52	5	1846.82
3	13024	POTRERITO	2167380.97	537722.89	599.09	8	2369.83
4	13027	SAN JERONIMO	2191122.59	554022.09	643.17	1	1718.34
5	13030	SAN RAFAEL MAZATEPEC	2196640.41	567441.68	714.59	1	2025.34
6	13033	SINGUILUCAN	2207651.4	550948.75	601.44	1	1549.74
7	13079	PRESA EL GIRON	2208784.77	549550.45	438.82	1	968.31
8	13085	PRESA TEZOYO	2181161.69	562959.63	652.33	1	1756.45
9	13091	TIZAYUCA (DGE)	2191993.69	504770.63	558.76	5	1890.28
10	13098	HUASCA	2234776.33	544108.09	869.89	1	2772.96
11	13100	OMITLAN	2230640.4	536949.22	1048.67	1	3769.57
12	13112	MINERAL DEL CHICO	2235265.63	528146.96	1164.10	1	4490.31
13	13116	EL ZEMBO	2229187.13	546241.38	944.49	1	3171.11
14	13129	SAN AGUSTIN ZAPOTLAN	2197427.68	529516.58	527.40	1	1270.08
15	13131	SANTIAGO TLAJOMULCO	2209792.79	508630.77	577.82	5	1952.68
16	13132	EL TEPOZAN	2190715.18	576861.53	917.95	1	3026.56
17	13133	SAN PEDRO TLAQUILPAN	2205321.68	525753.63	577.16	1	1455.30
18	13138	EMILIANO ZAPATA	2173735.52	547173.46	531.52	5	1800.84
19	15055	MAQUIXCO	2187606.19	517574.25	580.29	5	1960.74
20	15065	OTUMBA	2178301.87	525327.2	510.35	5	1731.13
21	15090	SAN JERONIMO XONOCAHUACAN	2183909.7	505296.65	588.61	5	1987.93
22	15099	SAN MATEO ACUITLAPILCO	2185292.72	495402.17	595.31	5	2009.84
23	15101	SAN MIGUEL TLAIXPAN	2158315.21	519672.34	550.70	8	2091.26
24	15135	XOCHIHUACAN	2169894.13	534047.73	646.74	8	2659.08
25	15274	NOPALA	2204595.86	498750.06	479.68	5	1629.86
26	21130	LOS REYES (CLFC)	2189832.67	578902.05	1712.24	1	8740.82
27	21140	CHIGNAHUAPAN	2194004.54	601282.41	691.14	9	3868.42
28	21162	BENITO JUAREZ	2165843.46	560042.03	586.50	8	2295.91
29	29004	CUAMANTZINGO	2158498.61	576679.8	641.43	8	2626.12
30	29006	CUAULA	2167255.9	536703.6	645.39	8	2650.71
31	29010	HUEYOTLIPAN	2153179.28	568714.02	746.26	8	3311.16
32	29019	SAN ANTONIO CALPULALAPAN	2162265.26	545309.67	687.74	8	2919.89
33	29024	SANCTORUM	2155408.16	555412.85	720.90	8	3138.84
34	29025	SAN MARCOS	2166921.77	538597.79	657.45	8	2726.18
35	29032	TLAXCO	2166623.07	591707.32	713.29	8	3087.94
36	29034	ZOQUIAPAN	2165611.31	554740.46	593.74	8	2338.28
37	29035	CALPULALPAN	2165739.78	545737.89	675.22	8	2839.09
38	29047	ESPAÑITA	2151582.67	560643.63	1116.04	8	6301.30
39	29052	EL ROSARIO	2173518.06	580838.29	648.12	8	2667.68

Anexo 2. Factor Erosividad (R), de acuerdo al enfoque morfopedológico

Unidad Morfopedológica	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)	Unidad Morfopedológica	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)	Unidad Morfopedológica	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)
1	2190.96	20	3140.26	39	3238.40
2	2009.01	21	1515.16	40	2865.17
3	2358.90	22	1979.11	41	1884.89
4	1433.36	23	1652.91	42	3140.26
5	1433.36	24	2644.46	43	2907.87
6	1884.89	25	1884.89	44	2123.57
7	1790.66	26	2305.32	45	1652.91
8	1652.91	27	2167.57	46	1515.16
9	3434.68	28	2167.57	47	1433.36
10	2145.17	29	2073.34	48	1652.91
11	2245.25	30	2073.34	49	3434.68
12	1351.56	31	1979.11	50	2845.85
13	1659.12	32	2073.34	51	2073.34
14	1884.89	33	2095.10	52	1433.36
15	1515.16	34	2574.06	53	2245.25
16	1515.16	35	3140.26	54	2907.87
17	1790.66	36	2485.50	55	1552.46
18	2485.50	37	1979.11	56	2485.50
19	2644.46	38	2485.50		

Anexo 3. Factor Erosividad (R), de acuerdo al enfoque cuenca.

Microcuenca	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)	Microcuenca	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)	Microcuenca	R (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹)
1	1957.43	21	1682.39	41	2044.43
2	1830.56	22	1892.36	42	2018.61
3	2247.25	23	2314.29	43	1836.7
4	2247.25	24	1674.29	44	2060.13
5	2321.03	25	2314.29	45	2290.87
6	2247.25	26	2740.97	46	2031.78
7	2266.21	27	1805.45	47	2218.1
8	2083.67	28	2084.57	48	2307.24
9	2161.62	29	1773.22	49	2615.29
10	2045.98	30	1771.15	50	2497.14
11	2062.7	31	1641.09	51	2585.39
12	2039.14	32	1981.61	52	2716.87
13	2205.01	33	2370.65	53	2658.56
14	1902.21	34	2077.09	54	2433.79
15	2015.59	35	1817.29	55	2721.28
16	1738.13	36	2776.92	56	2572.11
17	1893.64	37	1946.95	57	2417.71
18	1774.94	38	1710.88	58	2955.28
19	1792.93	39	2353.68	59	2581.1
20	2099.72	40	1789.26	60	2549.42
				61	2549.42

Anexo 4 Factor Erodabilidad del suelo (K), de acuerdo al enfoque morfopedológico.

No.	Limo (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Perm.	Materia Orgánica	M	a	b	c	Factor K (Mg ha ⁻¹ hr MJ mm ha ⁻¹)
1	27.891	35.054	34.328	4.750	1.861	2557.340	1.8609	2.8125	4.7500	0.0310
2	27.907	35.079	34.278	4.000	1.860	2560.550	1.8600	2.8148	4.0000	0.0286
3	26.833	33.429	37.500	4.333	1.922	2355.070	1.9218	2.6667	4.3333	0.0270
4	29.250	37.143	30.250	4.400	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.4000	0.0334
5	27.800	34.914	34.600	3.600	1.866	2540.000	1.8662	2.8000	3.6000	0.0270
6	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
7	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
8	29.250	37.143	30.250	4.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.6667	0.0343
9	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
10	27.602	34.610	35.193	4.197	1.878	2502.170	1.8775	2.7727	4.1970	0.0285
11	27.075	33.800	36.775	4.600	1.908	2401.300	1.9079	2.7000	4.6000	0.0285
12	29.250	37.143	30.250	4.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.6667	0.0343
13	27.800	34.914	34.600	4.933	1.866	2540.000	1.8662	2.8000	4.9333	0.0314
14	28.042	35.286	33.875	4.000	1.852	2586.230	1.8523	2.8333	4.0000	0.0290
15	29.250	37.143	30.250	3.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.6667	0.0310
16	25.625	31.571	41.125	4.000	1.991	2123.900	1.9914	2.5000	4.0000	0.0228
17	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
18	27.075	33.800	36.775	4.600	1.908	2401.300	1.9079	2.7000	4.6000	0.0285
19	28.344	35.750	32.969	5.000	1.835	2644.020	1.8349	2.8750	5.0000	0.0330
20	29.250	37.143	30.250	4.111	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.1111	0.0325
21	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
22	29.250	37.143	30.250	3.333	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.3333	0.0299
23	29.250	37.143	30.250	4.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.0000	0.0321
24	26.350	32.686	38.950	4.600	1.950	2262.600	1.9496	2.6000	4.6000	0.0266
25	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
26	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
27	21.625	38.571	48.125	3.500	1.495	1850.700	1.4948	3.0000	3.5000	0.0216
28	24.750	35.486	41.750	4.400	1.751	2153.320	1.7510	2.8000	4.4000	0.0262
29	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
30	27.438	34.357	35.688	5.000	1.887	2470.650	1.8870	2.7500	5.0000	0.0307
31	22.000	26.000	52.000	5.000	2.200	1430.400	2.2000	2.0000	5.0000	0.0175
32	25.625	31.571	41.125	5.000	1.991	2123.900	1.9914	2.5000	5.0000	0.0261
33	26.938	35.232	36.563	4.625	1.825	2436.500	1.8250	2.8125	4.6250	0.0295
34	27.438	34.357	35.688	4.250	1.887	2470.650	1.8870	2.7500	4.2500	0.0282
35	29.250	37.143	30.250	4.400	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.4000	0.0334
36	27.438	34.357	35.688	4.000	1.887	2470.650	1.8870	2.7500	4.0000	0.0274
37	26.350	32.686	38.950	4.800	1.950	2262.600	1.9496	2.6000	4.8000	0.0273
38	26.833	33.429	37.500	5.000	1.922	2355.070	1.9218	2.6667	5.0000	0.0292
39	29.250	37.143	30.250	4.750	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.7500	0.0346
40	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
41	29.250	37.143	30.250	3.250	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.2500	0.0296
42	29.250	37.143	30.250	4.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.0000	0.0321
43	27.800	34.914	34.600	3.800	1.866	2540.000	1.8662	2.8000	3.8000	0.0277
44	27.236	34.048	36.292	4.778	1.899	2432.120	1.8986	2.7222	4.7778	0.0295
45	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
46	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
47	29.250	37.143	30.250	3.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.6667	0.0310
48	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
49	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338

50	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
51	25.625	31.571	41.125	5.000	1.991	2123.900	1.9914	2.5000	5.0000	0.0261
52	28.042	35.286	33.875	4.833	1.852	2586.230	1.8523	2.8333	4.8333	0.0317
53	26.984	33.661	37.047	4.938	1.913	2383.960	1.9131	2.6875	4.9375	0.0294
54	29.250	37.143	30.250	4.556	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5556	0.0050
55	27.317	34.172	36.050	4.000	1.894	2447.530	1.8940	2.7333	4.0000	0.0271
56	28.283	35.657	33.150	4.133	1.838	2632.470	1.8383	2.8667	4.1333	0.0300

Anexo 5 Factor Erodabilidad del suelo (K), de acuerdo al enfoque de cuenca.

No.	Limo (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	Perm.	Materia Orgánica	M	a	b	c	Factor K (Mg ha ⁻¹ hr MJ mm ha ⁻¹)
1	29.250	37.143	30.250	4.250	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.2500	0.0329
2	27.344	37.500	34.719	4.625	1.711	2519.450	1.7107	3.0000	4.6250	0.0314
3	28.214	35.551	33.357	4.000	1.842	2591.050	1.8423	2.8571	4.0000	0.0291
4	27.438	34.357	35.688	4.000	1.887	2427.450	1.8870	2.7500	4.0000	0.0270
5	29.250	37.143	30.250	3.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.5000	0.0305
6	27.438	34.357	35.688	4.625	1.887	2427.450	1.8870	2.7500	4.6250	0.0291
7	24.750	35.486	41.750	4.400	1.751	2061.800	1.7510	2.8000	4.4000	0.0253
8	28.042	35.286	33.875	5.000	1.852	2554.240	1.8523	2.8333	5.0000	0.0320
9	26.833	33.429	37.500	5.000	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	5.0000	0.0287
10	26.833	33.429	37.500	4.500	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	4.5000	0.0270
11	26.143	32.367	39.571	4.571	1.962	2166.550	1.9615	2.5714	4.5714	0.0255
12	27.800	34.914	34.600	4.800	1.866	2503.140	1.8662	2.8000	4.8000	0.0306
13	29.250	37.143	30.250	3.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.6667	0.0310
14	27.800	34.914	34.600	3.800	1.866	2503.140	1.8662	2.8000	3.8000	0.0273
15	29.250	37.143	30.250	4.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.0000	0.0321
16	27.179	33.959	36.464	4.571	1.902	2374.100	1.9019	2.7143	4.5714	0.0282
17	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
18	28.042	35.286	33.875	4.080	1.852	2554.240	1.8523	2.8333	4.0833	0.0289
19	27.696	34.755	34.911	3.929	1.872	2481.390	1.8721	2.7857	3.9286	0.0275
20	26.833	33.429	37.500	4.917	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	4.9167	0.0284
21	28.344	35.750	32.969	3.500	1.835	2618.830	1.8349	2.8750	3.5000	0.0278
22	29.250	37.143	30.250	4.330	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.3333	0.0332
23	26.833	33.429	37.500	4.330	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	4.3333	0.0265
24	28.214	35.551	33.357	4.000	1.842	2591.050	1.8423	2.8571	4.0000	0.0291
25	26.531	32.964	38.406	4.625	1.939	2243.280	1.9392	2.6250	4.6250	0.0267
26	26.833	33.429	37.500	4.500	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	4.5000	0.0270
27	27.273	34.104	36.182	3.900	1.897	2393.430	1.8965	2.7273	3.9091	0.0263
28	26.350	32.686	38.950	5.000	1.950	2207.310	1.9496	2.6000	5.0000	0.0274
29	27.524	34.490	35.429	4.095	1.882	2445.370	1.8821	2.7619	4.0952	0.0275
30	29.250	37.143	30.250	4.625	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.6250	0.0342
31	27.639	34.667	35.083	3.888	1.875	2469.360	1.8754	2.7778	3.8889	0.0272
32	27.639	34.667	35.083	3.888	1.875	2469.360	1.8754	2.7778	2.6667	0.0231
33	25.955	32.078	40.136	4.455	1.972	2129.820	1.9724	2.5455	4.4546	0.0246
34	27.577	34.572	35.269	3.769	1.879	2456.430	1.8790	2.7692	3.7692	0.0266
35	28.283	35.657	33.150	4.867	1.838	2605.840	1.8383	2.8667	4.8667	0.0322
36	28.344	35.750	32.969	3.875	1.835	2618.830	1.8349	2.8750	3.8750	0.0291
37	29.250	37.143	30.250	2.667	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	2.6667	0.0277
38	28.344	35.750	32.969	3.875	1.835	2618.830	1.8349	2.8750	3.8750	0.0291
39	27.639	34.667	35.083	4.550	1.875	2469.360	1.8754	2.7778	4.5556	0.0294

40	27.800	34.914	34.600	3.440	1.866	2503.140	1.8662	2.8000	3.4000	0.0260
41	29.250	37.143	30.250	3.200	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	3.2000	0.0295
42	27.438	34.357	35.688	4.875	1.887	2427.450	1.8870	2.7500	4.8750	0.0299
43	28.646	36.214	32.063	4.750	1.817	2684.220	1.8175	2.9167	4.7500	0.0328
44	28.692	36.286	31.923	4.923	1.815	2694.350	1.8148	2.9231	4.9231	0.0335
45	26.143	32.367	39.571	4.857	1.962	2166.550	1.9615	2.5714	4.8571	0.0264
46	27.438	34.357	35.688	4.917	1.887	2427.450	1.8870	2.7500	4.9167	0.0300
47	26.350	32.686	38.950	4.800	1.950	2207.310	1.9496	2.6000	4.8000	0.0268
48	26.833	33.429	37.500	4.833	1.922	2303.870	1.9218	2.6667	4.8333	0.0281
49	28.042	35.286	33.875	5.000	1.852	2554.240	1.8523	2.8333	5.0000	0.0320
50	27.639	34.667	35.083	5.000	1.875	2469.360	1.8754	2.7770	5.0000	0.0308
51	29.250	37.143	30.250	4.777	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.7778	0.0347
52	29.250	37.143	30.250	4.545	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5454	0.0339
53	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
54	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
55	29.250	37.143	30.250	4.800	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.8000	0.0347
56	29.250	37.143	30.250	4.500	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.5000	0.0338
57	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
58	29.250	37.143	30.250	4.750	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.7500	0.0346
59	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
60	29.250	37.143	30.250	5.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	5.0000	0.0354
61	29.250	37.143	30.250	4.000	1.783	2817.400	1.7827	3.0000	4.0000	0.0321

Anexo 6 Factor LS, para el enfoque morfopedológico.

No.	Longitud (m)	Pendiente (%)	m	Factor LS (adim.)
1	3193	1.2500	0.6000	2.6110
2	4085	1.1200	0.6000	2.8451
3	641	4.1000	0.6000	2.7247
4	629	4.1000	0.6000	2.6946
5	665	1.5400	0.6000	1.1608
6	329	2.3200	0.6000	1.0401
7	175	1.1400	0.6000	0.4339
8	814	1.7100	0.6000	1.4097
9	424	7.1900	0.6000	4.2837
10	3090	6.7700	0.6000	13.0025
11	1759	6.9148	0.6000	9.5398
12	1232	6.7600	0.6000	7.4734
13	2385	11.1589	0.6000	22.7962
14	1977	9.6700	0.6000	16.4387
15	638	12.3900	0.6000	12.1305
16	1183	0.2142	0.5997	0.8159
17	381	3.4100	0.6000	1.6346
18	1837	8.8900	0.6000	13.9139
19	1724	5.7400	0.6000	7.3835
20	3506	5.4100	0.6000	10.4908
21	1157	8.2700	0.6000	9.5050
22	657	3.5273	0.6000	2.3473
23	738	1.4400	0.6000	1.1823

24	1127	14.2100	0.6000	21.1535
25	1412	10.6500	0.6000	15.5072
26	578	9.8948	0.6000	8.1319
27	517	15.0200	0.6000	14.4789
28	780	9.9200	0.6000	9.7707
29	989	13.0800	0.6000	17.1722
30	881	8.8200	0.6000	8.8537
31	428	12.1254	0.6000	9.2323
32	376	8.6000	0.6000	5.1239
33	1299	5.6000	0.6000	6.0380
34	1629	4.2900	0.6000	5.0196
35	1572	16.8500	0.6000	33.9249
36	1342	6.3100	0.6000	7.1798
37	1070	19.4000	0.6000	33.8822
38	2379	8.3000	0.6000	14.7271
39	1060	7.2800	0.6000	7.5504
40	2114	2.4000	0.6000	3.2699
41	2240	2.0800	0.6000	3.0032
42	1505	15.2300	0.6000	28.0961
43	1805	0.7800	0.6000	1.4662
44	1950	1.9900	0.6000	2.6676
45	641	18.2400	0.6000	22.5270
46	392	9.0200	0.6000	5.6276
47	815	20.1300	0.6000	30.5690
48	567	12.5000	0.6000	11.4552
49	904	3.8100	0.6000	3.0882
50	688	22.9248	0.6000	34.2103
51	410	11.0000	0.6000	7.7553
52	1578	27.4100	0.6000	75.5760
53	2141	9.1000	0.6000	15.7777
54	1792	8.8700	0.6000	13.6639
55	2213	9.4700	0.6000	17.0559
56	1719	13.1400	0.6000	24.0952

Anexo 7 Factor LS, para el enfoque de cuenca.

No.	Longitud (m)	Pendiente (%)	m	Factor LS (adim.)
1	7025	0.1423	0.5963	1.4703
2	5680	0.1232	0.5928	1.2568
3	6122	0.1307	0.5944	1.3315
4	12981	0.0693	0.5500	1.5513
5	4617	0.1083	0.5876	1.0745
6	11690	0.0855	0.5720	1.6744
7	9387	0.0959	0.5807	1.5578
8	5497	0.0044	0.0869	0.0991
9	9942	0.0704	0.5519	1.3545
10	12736	0.0470	0.4885	1.0672
11	6068	0.0669	0.5454	0.9969
12	15680	0.0532	0.5108	1.3525

13	6930	0.0522	0.5077	0.8768
14	6278	0.1255	0.5933	1.3394
15	8360	0.0782	0.5636	1.3162
16	12673	0.0830	0.5694	1.7244
17	17572	0.0394	0.4537	1.0090
18	10823	0.0859	0.5724	1.6059
19	12994	0.0371	0.4412	0.8182
20	9756	0.1251	0.5932	1.7382
21	7379	0.0840	0.5705	1.2753
22	17870	0.0472	0.4896	1.2677
23	6795	0.0912	0.5772	1.2649
24	16704	0.0862	0.5727	2.0625
25	9806	0.0628	0.5368	1.2329
26	8928	0.0594	0.5285	1.1191
27	8240	0.1041	0.5856	1.4904
28	3191	0.0188	0.2941	0.2318
29	16181	0.0646	0.5408	1.6538
30	10028	0.1306	0.5944	1.7853
31	14153	0.0339	0.4220	0.7591
32	9859	0.0128	0.2205	0.2160
33	10520	0.0414	0.4641	0.8476
34	11980	0.0740	0.5576	1.5541
35	17997	0.0475	0.4904	1.2790
36	10950	0.0941	0.5794	1.6894
37	11498	0.0153	0.2533	0.2687
38	10270	0.0676	0.5467	1.3383
39	18870	0.1365	0.5955	2.6266
40	10475	0.0346	0.4261	0.6839
41	12119	0.0323	0.4117	0.6704
42	8927	0.1098	0.5883	1.5900
43	15043	0.0354	0.4310	0.8217
44	11832	0.0095	0.1726	0.1717
45	14479	0.0314	0.4049	0.6930
46	11940	0.0198	0.3045	0.3624
47	9517	0.0761	0.5607	1.3919
48	10053	0.0770	0.5620	1.4461
49	14007	0.1419	0.5963	2.2175
50	15141	0.0403	0.4584	0.9698
51	19419	0.0478	0.4918	1.3386
52	10679	0.0757	0.5601	1.4796
53	11738	0.0300	0.3951	0.6021
54	4796	0.0213	0.3200	0.2955
55	18610	0.0771	0.5621	2.0453
56	12531	0.0712	0.5532	1.5513
57	7360	0.0166	0.2687	0.2599
58	26580	0.0864	0.5728	2.6943
59	7700	0.0356	0.4324	0.6200
60	9850	0.0725	0.5553	1.3749
61	12048	0.0129	0.2227	0.2287

Anexo 8 Cálculo del Factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).para el enfoque Morfopedológico.

Unidad Morfopedológica	Factor C (adim.)	Unidad Morfopedológica	Factor C (adim.)	Unidad Morfopedológica	Factor C (adim.)
1	0.070	20	0.050	39	0.110
2	0.050	21	0.100	40	0.120
3	0.060	22	0.090	41	0.110
4	0.070	23	0.060	42	0.001
5	0.070	24	0.010	43	0.130
6	0.070	25	0.020	44	0.090
7	0.140	26	0.002	45	0.030
8	0.110	27	0.070	46	0.050
9	0.030	28	0.090	47	0.048
10	0.050	29	0.100	48	0.120
11	0.050	30	0.110	49	0.120
12	0.090	31	0.045	50	0.070
13	0.060	32	0.110	51	0.120
14	0.040	33	0.120	52	0.040
15	0.030	34	0.090	53	0.120
16	0.070	35	0.014	54	0.050
17	0.070	36	0.110	55	0.060
18	0.070	37	0.090	56	0.020
19	0.060	38	0.020		

Anexo 9 Cálculo del Factor de manejo de cultivo y cobertura del suelo (C).para el enfoque de cuenca.

Microcuenca	Factor C (adim.)	Microcuenca	Factor C (adim.)	Microcuenca	Factor C (adim.)
1	0.0525	21	0.05	41	0.063333
2	0.0775	22	0.0675	42	0.085
3	0.035	23	0.076667	43	0.0675
4	0.035	24	0.0585	44	0.075
5	0.0325	25	0.076667	45	0.078333
6	0.035	26	0.11	46	0.083333
7	0.036667	27	0.0575	47	0.095
8	0.098	28	0.053333	48	0.07
9	0.072	29	0.067143	49	0.041
10	0.085	30	0.0476	50	0.075
11	0.095	31	0.057	51	0.0725
12	0.08375	32	0.056667	52	0.073333
13	0.058583	33	0.087143	53	0.048
14	0.053333	34	0.05	54	0.103333
15	0.0775	35	0.066667	55	0.060167
16	0.056667	36	0.076	56	0.08
17	0.07	37	0.08	57	0.065
18	0.064	38	0.0656	58	0.074556
19	0.065	39	0.0724	59	0.06
20	0.0525	40	0.06	60	0.06
				61	0.06

Anexo 10 Factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P), para el enfoque morfoedológico.

Unidad Morfoedológica	Factor P (adim.)	Unidad Morfoedológica	Factor P (adim.)	Unidad Morfoedológica	Factor P (adim.)
1	0.15	20	0.21	39	0.31
2	0.05	21	0.32	40	0.26
3	0.15	22	0.18	41	0.23
4	0.18	23	0.15	42	0.05
5	0.15	24	0.07	43	0.23
6	0.18	25	0.15	44	0.18
7	0.23	26	0.04	45	0.15
8	0.26	27	0.27	46	0.21
9	0.04	28	0.27	47	0.07
10	0.17	29	0.35	48	0.35
11	0.12	30	0.35	49	0.31

12	0.18	31	0.05	50	0.32
13	0.17	32	0.31	51	0.31
14	0.12	33	0.26	52	0.32
15	0.07	34	0.23	53	0.31
16	0.18	35	0.15	54	0.31
17	0.27	36	0.31	55	0.17
18	0.23	37	0.32	56	0.15
19	0.15	38	0.15		

Anexo 11 Factor de prácticas de manejo y conservación de suelos (P), para el enfoque de cuenca.

Microcuenca	Factor P (adim.)	Microcuenca	Factor P (adim.)	Microcuenca	Factor P (adim.)
1	0.1525	21	0.11	41	0.133333
2	0.2	22	0.1675	42	0.2375
3	0.1	23	0.176667	43	0.1675
4	0.1	24	0.1575	44	0.2
5	0.11	25	0.176667	45	0.231667
6	0.1	26	0.23	46	0.21
7	0.096667	27	0.1425	47	0.23
8	0.24	28	0.15	48	0.203333
9	0.188	29	0.15	49	0.15
10	0.212	30	0.172	50	0.23
11	0.2525	31	0.14	51	0.1975
12	0.1675	32	0.163333	52	0.213333
13	0.173333	33	0.214286	53	0.15
14	0.13	34	0.11	54	0.24
15	0.195	35	0.195	55	0.193333
16	0.123333	36	0.21	56	0.236667
17	0.19	37	0.14	57	0.15
18	0.172	38	0.144	58	0.216667
19	0.1375	39	0.22	59	0.203333
20	0.155	40	0.16	60	0.23
				61	0.23

Anexo 12 Erosión Actual y Potencial, de acuerdo al enfoque Morfopedológico

No.	Erosión Actual (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Erosión Potencial (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	No.	Erosión Actual (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Erosión Potencial (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	1.8649	177.6110	29	44.1241	1260.6900
2	0.4089	163.5650	30	21.7040	563.7400
3	1.5603	173.3700	31	0.7176	318.9210
4	1.6268	129.1150	32	9.4719	277.7700
5	0.4720	44.9568	33	11.6586	373.6740
6	0.8747	69.4207	34	7.5518	364.8230
7	0.8859	27.5127	35	7.4787	3561.2700
8	2.2864	79.9437	36	16.6799	489.1470
9	0.5960	496.6930	37	52.7141	1830.3500
10	6.7527	794.4360	38	3.2037	1067.8900
11	3.6584	609.7330	39	28.8356	845.6180
12	5.6140	346.5440	40	9.8680	316.2830
13	12.1210	1188.3300	41	4.2440	167.7470
14	4.3075	897.3850	42	0.1416	2832.9300
15	1.1969	569.9310	43	3.5287	118.0150
16	0.3559	28.2452	44	2.7039	166.9060
17	1.8676	98.8124	45	5.6566	1257.0100
18	15.8498	984.4600	46	3.1702	301.9220
19	5.8066	645.1760	47	4.5652	1358.6900
20	11.2336	1069.8600	48	28.1587	670.4450
21	15.5577	486.1800	49	13.3206	358.0800
22	2.2509	138.9410	50	77.2197	3447.3100
23	0.5647	62.7476	51	15.6397	420.4220
24	1.0430	1489.9800	52	43.9712	3435.2500
25	3.1049	1034.9800	53	38.6780	1039.7300
26	0.0398	663.7920	54	3.0793	198.6640
27	12.7869	676.5550	55	7.3197	717.6180
28	13.4611	553.9540	56	5.3948	1798.2500

Anexo 13 Erosión Actual y Potencial, de acuerdo al enfoque de cuenca.

No.	Erosión Actual (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Erosión Potencial (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	No.	Erosión Actual (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Erosión Potencial (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	0.7588	94.7819	32	0.0917	9.9040
2	1.1194	72.2187	33	0.9242	49.4918
3	0.3051	87.1693	34	0.4725	85.9016
4	0.3294	94.1093	35	0.9726	74.8135
5	0.2716	75.9633	36	2.1776	136.4000
6	0.3827	109.3000	37	0.1623	14.4945
7	0.3164	89.2545	38	0.6291	66.5922
8	0.1552	6.5997	39	2.8925	181.6000
9	1.1369	83.9883	40	0.3054	31.8171
10	1.0637	59.0300	41	0.3410	40.3869
11	1.2574	52.4177	42	1.9361	95.9063
12	1.1847	84.4549	43	0.5602	49.5499
13	0.6088	59.9540	44	0.1779	11.8600
14	0.4826	69.6128	45	0.7616	41.9653
15	1.2873	85.1808	46	0.3868	22.1033
16	0.5904	84.4756	47	1.8061	82.6577
17	0.8578	64.4998	48	1.3362	93.8777
18	0.9076	82.4512	49	1.1396	185.3000
19	0.3601	40.2895	50	1.2882	74.6781
20	0.8438	103.7000	51	1.7183	120.0000
21	0.3286	59.7474	52	2.1324	136.3000
22	0.9007	79.6667	53	0.4081	56.6781
23	1.0501	77.5318	54	0.6315	25.4631
24	0.9269	100.6000	55	2.2497	193.4000
25	1.0304	76.0762	56	2.5504	134.7000
26	2.0981	82.9277	57	0.2169	22.2475
27	0.5788	70.6360	58	4.4483	275.4000
28	0.1060	13.2557	59	0.6913	56.6638
29	0.8135	80.7717	60	1.7128	124.1000
30	0.8846	108.0000	61	0.2583	18.7182
31	0.2701	33.8532			

Anexo 14 Erosión Actual y Actual Ponderada, de acuerdo al enfoque de unidades morfológicas.

No.	Unidad Morfológica	Área (km ²)	Erosión Actual	Erosión actual Ponderada
1	26	1.140	0.0398	0.0454
2	42	14.740	0.1416	2.0879
3	16	7.700	0.3559	2.7403
4	2	570.890	0.4089	233.4438
5	5	15.160	0.4720	7.1562
6	23	7.250	0.5647	4.0943
7	9	1.480	0.5960	0.8821
8	31	0.840	0.7176	0.6028
9	6	2.640	0.8747	2.3092
10	7	0.060	0.8859	0.0532
11	24	7.630	1.0430	7.9580
12	15	6.860	1.1969	8.2104
13	3	21.380	1.5603	33.3599
14	4	10.690	1.6268	17.3909
15	1	437.040	1.8649	815.0403
16	17	0.880	1.8676	1.6435
17	22	3.560	2.2509	8.0130
18	8	23.520	2.2864	53.7759
19	44	111.020	2.7039	300.1848
20	54	101.660	3.0793	313.0416
21	25	33.560	3.1049	104.2015
22	46	4.410	3.1702	13.9805
23	38	67.610	3.2037	216.5995
24	43	13.340	3.5287	47.0722
25	11	87.750	3.6584	321.0246
26	41	49.590	4.2440	210.4600
27	14	54.940	4.3075	236.6513
28	47	14.610	4.5652	66.6977
29	56	122.090	5.3948	658.6450
30	12	14.260	5.6140	80.0558
31	45	5.670	5.6566	32.0727
32	19	99.060	5.8066	575.1998
33	10	991.910	6.7527	6698.0806
34	55	85.810	7.3197	628.1035
35	35	61.900	7.4787	462.9297
36	34	133.480	7.5518	1008.0183
37	32	0.430	9.4719	4.0729
38	40	83.710	9.8680	826.0528
39	20	204.320	11.2336	2295.2492

40	33	93.590	11.6586	1091.1284
41	13	134.710	12.1210	1632.8199
42	27	0.980	12.7869	12.5312
43	49	1.900	13.3206	25.3091
44	28	6.700	13.4611	90.1894
45	21	6.000	15.5577	93.3462
46	51	1.300	15.6397	20.3316
47	18	40.550	15.8498	642.7094
48	36	15.270	16.6799	254.7021
49	30	2.680	21.7040	58.1667
50	48	2.130	28.1587	59.9780
51	39	22.270	28.8356	642.1688
52	53	174.680	38.6780	6756.2730
53	52	32.280	43.9712	1419.3903
54	29	17.830	44.1241	786.7327
55	37	13.980	52.7141	736.9431
56	50	3.530	77.2197	272.5855

Anexo 15 Erosión Potencial y Potencial Ponderada, de acuerdo al enfoque de unidades morfológicas.

No.	Unidad Morfológica	Área (km ²)	Erosión Actual	Erosión actual Ponderada
1	7	0.060	27.5127	1.6508
2	16	7.700	28.2452	217.4880
3	5	15.160	44.9568	681.5451
4	23	7.250	62.7476	454.9201
5	6	2.640	69.4207	183.2706
6	8	23.520	79.9437	1880.2758
7	17	0.880	98.8124	86.9549
8	43	13.340	118.0150	1574.3201
9	4	10.690	129.1150	1380.2394
10	22	3.560	138.9410	494.6300
11	2	570.890	163.5650	93377.6229
12	44	111.020	166.9060	18529.9041
13	41	49.590	167.7470	8318.5737
14	3	21.380	173.3700	3706.6506
15	1	437.040	177.6110	77623.1114
16	54	101.660	198.6640	20196.1822
17	32	0.430	277.7700	119.4411
18	46	4.410	301.9220	1331.4760
19	40	83.710	316.2830	26476.0499

20	31	0.840	318.9210	267.8936
21	12	14.260	346.5440	4941.7174
22	49	1.900	358.0800	680.3520
23	34	133.480	364.8230	48696.5740
24	33	93.590	373.6740	34972.1497
25	51	1.300	420.4220	546.5486
26	21	6.000	486.1800	2917.0800
27	36	15.270	489.1470	7469.2747
28	9	1.480	496.6930	735.1056
29	28	6.700	553.9540	3711.4918
30	30	2.680	563.7400	1510.8232
31	15	6.860	569.9310	3909.7267
32	11	87.750	609.7330	53504.0708
33	19	99.060	645.1760	63911.1346
34	26	1.140	663.7920	756.7229
35	48	2.130	670.4450	1428.0479
36	27	0.980	676.5550	663.0239
37	55	85.810	717.6180	61578.8006
38	10	991.910	794.4360	788009.0128
39	39	22.270	845.6180	18831.9129
40	14	54.940	897.3850	49302.3319
41	18	40.550	984.4600	39919.8530
42	25	33.560	1034.9800	34733.9288
43	53	174.680	1039.7300	181620.0364
44	38	67.610	1067.8900	72200.0429
45	20	204.320	1069.8600	218593.7952
46	13	134.710	1188.3300	160079.9343
47	45	5.670	1257.0100	7127.2467
48	29	17.830	1260.6900	22478.1027
49	47	14.610	1358.6900	19850.4609
50	24	7.630	1489.9800	11368.5474
51	56	122.090	1798.2500	219548.3425
52	37	13.980	1830.3500	25588.2930
53	42	14.740	2832.9300	41757.3882
54	52	32.280	3435.2500	110889.8700
55	50	3.530	3447.3100	12169.0043
56	35	61.900	3561.2700	220442.6130

Anexo 16 Erosión Actual y Actual Ponderada, de acuerdo al enfoque de cuenca.

No.	Microcuenca	Área (km ²)	Erosión Actual	Erosión actual Ponderada
1	32	62.707	0.0917	5.7482
2	28	26.125	0.1060	2.7704
3	8	37.760	0.1552	5.8614
4	37	59.950	0.1623	9.7322
5	44	72.183	0.1779	12.8413
6	57	23.154	0.2169	5.0224
7	61	35.005	0.2583	9.0421
8	31	78.522	0.2701	21.2126
9	5	19.692	0.2716	5.3476
10	3	27.078	0.3051	8.2614
11	40	41.847	0.3054	12.7819
12	7	37.111	0.3164	11.7402
13	21	24.265	0.3286	7.9736
14	4	101.099	0.3294	33.3002
15	41	53.331	0.3410	18.1882
16	19	113.472	0.3601	40.8598
17	6	66.547	0.3827	25.4651
18	46	97.460	0.3868	37.6981
19	53	43.386	0.4081	17.7051
20	34	67.286	0.4725	31.7900
21	14	40.704	0.4826	19.6457
22	43	108.418	0.5602	60.7383
23	27	31.911	0.5788	18.4691
24	16	54.337	0.5904	32.0799
25	13	30.521	0.6088	18.5812
26	38	49.561	0.6291	31.1766
27	54	15.352	0.6315	9.6943
28	59	35.806	0.6913	24.7527
29	1	41.909	0.7588	31.8022
30	45	62.691	0.7616	47.7423
31	29	117.625	0.8135	95.6868
32	20	110.066	0.8438	92.8750
33	17	93.454	0.8578	80.1692
34	30	54.164	0.8846	47.9143
35	22	95.195	0.9007	85.7452
36	18	57.842	0.9076	52.4992
37	33	71.529	0.9242	66.1059
38	24	123.519	0.9269	114.4946
39	35	105.871	0.9726	102.9671

40	25	51.118	1.0304	52.6729
41	23	34.617	1.0501	36.3518
42	10	30.755	1.0637	32.7151
43	2	39.216	1.1194	43.8976
44	9	27.787	1.1369	31.5900
45	49	83.121	1.1396	94.7209
46	12	41.322	1.1847	48.9556
47	11	29.638	1.2574	37.2662
48	15	32.413	1.2873	41.7255
49	50	194.467	1.2882	250.5121
50	48	47.163	1.3362	63.0181
51	60	52.702	1.7128	90.2655
52	51	65.260	1.7183	112.1349
53	47	23.851	1.8061	43.0764
54	42	65.134	1.9361	126.1066
55	26	38.282	2.0981	80.3175
56	52	141.567	2.1324	301.8830
57	36	49.969	2.1776	108.8137
58	55	59.124	2.2497	133.0123
59	56	104.537	2.5504	266.6072
60	39	124.718	2.8925	360.7424
61	58	124.778	4.4483	555.0544

Anexo 17 Erosión Potencial y Potencial Ponderada, de acuerdo al enfoque de cuenca.

No.	Microcuenca	Área (km ²)	Erosión Potencial	Erosión Potencial Ponderada
1	8	37.760	6.5997	249.2092
2	32	62.707	9.9040	621.0511
3	44	72.183	11.8600	856.0899
4	28	26.125	13.2557	346.3024
5	37	59.950	14.4945	868.9480
6	61	35.005	18.7182	655.2252
7	46	97.460	22.1033	2154.1815
8	57	23.154	22.2475	515.1208
9	54	15.352	25.4631	390.9021
10	40	41.847	31.8171	1331.4532
11	31	78.522	33.8532	2658.2146
12	19	113.472	40.2895	4571.7316
13	41	53.331	40.3869	2153.8738
14	45	62.691	41.9653	2630.8264
15	33	71.529	49.4918	3540.0938
16	43	108.418	49.5499	5372.0941
17	11	29.638	52.4177	1553.5690
18	59	35.806	56.6638	2028.9134
19	53	43.386	56.6781	2459.0423
20	10	30.755	59.0300	1815.4876
21	21	24.265	59.7474	1449.7490
22	13	30.521	59.9540	1829.8578
23	17	93.454	64.4998	6027.7621
24	38	49.561	66.5922	3300.3662
25	14	40.704	69.6128	2833.5108
26	27	31.911	70.6360	2254.0463
27	2	39.216	72.2187	2832.1061
28	50	194.467	74.6781	14522.4321
29	35	105.871	74.8135	7920.5447
30	5	19.692	75.9633	1495.8373
31	25	51.118	76.0762	3888.8859
32	23	34.617	77.5318	2683.8837
33	22	95.195	79.6667	7583.8724
34	29	117.625	80.7717	9500.8146
35	18	57.842	82.4512	4769.1813
36	47	23.851	82.6577	1971.4591
37	26	38.282	82.9277	3174.6043
38	9	27.787	83.9883	2333.7759
39	12	41.322	84.4549	3489.8217

40	16	54.337	84.4756	4590.1475
41	15	32.413	85.1808	2760.9913
42	34	67.286	85.9016	5779.9872
43	3	27.078	87.1693	2360.3892
44	7	37.111	89.2545	3312.2811
45	48	47.163	93.8777	4427.5107
46	4	101.099	94.1093	9514.3199
47	1	41.909	94.7819	3972.1713
48	42	65.134	95.9063	6246.7636
49	24	123.519	100.6000	12426.0396
50	20	110.066	103.7000	11413.8878
51	30	54.164	108.0000	5849.6926
52	6	66.547	109.3000	7273.5631
53	51	65.260	120.0000	7831.1976
54	60	52.702	124.1000	6540.2934
55	56	104.537	134.7000	14081.1002
56	52	141.567	136.3000	19295.5903
57	36	49.969	136.4000	6815.8016
58	39	124.718	181.6000	22648.7125
59	49	83.121	185.3000	15402.3306
60	55	59.124	193.4000	11434.5255
61	58	124.778	275.4000	34363.9190
