



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

“ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA
EN LA CUENCA DEL RÍO ATOYAC
CON UN ENFOQUE MORFOPEDOLÓGICO”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE



MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

JOSUE PEREZ TORRES

Chapingo, México, Noviembre de 2015.



**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ATOYAC
CON UN ENFOQUE MORFOPEDOLÓGICO**

Tesis realizada por el C. Josué Pérez Torres bajo la dirección del Dr. Lamine Diakite Diakite, aprobada y aceptada por el Comité Asesor indicado, 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

DEDICATORIA

A mis padres Luciano y Rosa por todo el esfuerzo que han hecho por el bienestar de sus hijos y por el amor Incondicional que nos han brindado.

A mis hermanos, Ezequiel y Alba, que siempre han estado conmigo en los momentos difíciles.

A mis amigos que han estado en las buenas y en las malas

AGRADECIMIENTOS

Al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT) por otorgarme una beca que me permitió continuar con mis estudios.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme ser parte de tan prestigiosa institución.

Al Dr. Lamine Diakite Diakite por compartir sus conocimientos y experiencia en la realización de este trabajo y en mi formación profesional; pero sobre todo por su amistad, apertura y paciencia.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz por formar parte del presente trabajo y compartir sus conocimientos, cuyas sugerencias y correcciones enriquecieron la investigación.

Al Dr. Pablo Miguel Coras Merino por formar parte del presente trabajo y compartir sus conocimientos, cuyas sugerencias y correcciones enriquecieron la investigación.

A la Ing. Rosa Martha Medina Hernández por ayudarme en la realización de esta investigación.

A Mayra Isadora Luna Reyes en su calidad de secretaria y por su apoyo en la realización de los trámites.

A todas las personas que directa o indirectamente apoyaron en este trabajo mis más sinceros agradecimientos.

DATOS BIOGRAFICOS

Josué Pérez Torres nació el 22 de marzo de 1987 en la ciudad de Ixmiquilpan, Hidalgo, a partir del año 2001 realizo estudios en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

En el 2005 ingreso a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo; egresó en el año 2010 obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola mediante la tesis “Diseño de un equipo para determinar la conductividad eléctrica del suelo”.

En agosto de 2013 ingreso al Programa de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, en el estado de México, titulándose en diciembre de 2015.

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ATOYAC
CON UN ENFOQUE MORFOPEDOLÓGICO
ESTIMATION OF WATER EROSION IN ATOYAC RIVER WATERSHED WITH
MORPHOPEDOLOGIC APPROACH

Josué Pérez Torres ¹, Lamine Diakite Diakite ²

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es estimar la erosión hídrica mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) utilizando un enfoque morfopedológico, que consiste en subdividir el área de estudio en unidades homogéneas en base a geoformas, unidades genéticas de suelos y grupos hidrológicos de suelos y descritos en términos de coeficiente de masividad (CM), coeficiente orográfico (CO) y de forma (CF). El área de estudio comprende la cuenca alta del río Balsas en la región hidrológica #18 y se enmarca dentro de las coordenadas 97° 55' a 98° 45' longitud oeste y 18° 57' a 19°45' latitud norte. Se utilizaron dos imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8, un modelo de elevación digital con resolución de 15 m, y cartas geológicas y edafológicas para calcular los factores de la EUPS por medio del álgebra de mapas en ARCGIS. Ocho unidades morfopedológicas fueron delineadas y caracterizadas en cinco clases de erosión (nula, ligera, moderada, alta y muy alta) de acuerdo con la clasificación de la FAO, las cuales fueron agrupadas en tres medios geodinámicos basados en el balance morfogénesis -pedogénesis: estable (22.2%), peneestable (49.6 %) e inestable (28.2 %). La matriz de correlación entre la erosión potencial, actual, CM, CO y pendiente, mostró una buena correlación entre el coeficiente de masividad y la erosión potencial (0.86) y baja correlación (0.28) con la erosión actual debido a las prácticas de conservación de suelo y reforestación

Palabras clave: EUPS, erosión hídrica, morfopedológico.

ABSTRACT

The objective of this research is to compute water erosion through the Universal Soil Loss Equation (USLE) using a morphopedologic approach, consisting of subdividing the study area in homogeneous units based on landforms, genetic units of soils and hydrologic soil groups described in terms of massiveness coefficient (MC), orographic coefficient (OC) and shape (SC). The study area is located within the Balsas River basin in hydrological region #18 and within the coordinates 97 ° 55 ' - 98 ° 45' west longitude and 18 ° 57' - 19 ° 45' north latitude. Two Landsat 8 satellite multispectral images, a digital elevation model with 15-meter resolution, geologic and soil maps were used to compute each of USLE factors by performing map algebra on them in ARCGIS. The above approach allowed marking off and characterizing eight morphopedologic units in which five erosion rates (No erosion, Mild, Moderate, Strong and Extreme) were established according to FAO classification, enabling the classification of the study area's current geodynamic balance as stable (22.2%), quasi stable (49.6%) and unstable (28.2%). Correlation matrix among potential erosion, current erosion, MC, OC and slope factors showed a strong correlation (0.86) between massiveness coefficient and potential erosion but a weak correlation (0.28) with current erosion due to soil conservation practices and reforestation.

Keywords: USLE, water erosion, morphopedologic.

¹ Pasante de Maestría, ² Director de tesis

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GENERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
4.1 MATERIALES.....	8
4.1.1 ÁREA DE ESTUDIO	8
4.1.2 MATERIAL CARTOGRÁFICO.....	9
4.1.3 PROGRAMAS DE CÓMPUTO.....	9
4.2 MÉTODOS.....	10
4.2.1 DELINEACIÓN DE UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS	10
4.2.2. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO EUPS	12
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS	25
5.2 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO	27
5.2.1 FACTORES DE LA EUPS	27
5.2.2 TASA DE EROSIÓN POTENCIAL	33
5.2.3 TASA DE EROSIÓN ACTUAL	33
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
7. BIBLIOGRAFIA	40

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de grupos hidrológicos de suelo.	11
Cuadro 2. Ecuaciones de Cortes para diferentes regiones de isoerosividad.....	13
Cuadro 3. Datos de precipitación total anual de estaciones meteorológicas.	14
Cuadro 4. Polinomios locales para interpolación de la precipitación anual por ZMP.	15
Cuadro 5. Unidades de suelo.	16
Cuadro 6. Valores del factor K de acuerdo a la unidad de suelo.	16
Cuadro 7. Valores de C para bosques.	21
Cuadro 8. Valores de C para cultivos.	22
Cuadro 9. Valores de P para surcos y fajas al contorno.	23
Cuadro 10. Valores de P para prácticas conservación.	24
Cuadro 11. Características paramétricas de las unidades morfopedológicas	26
Cuadro 12. Características analíticas de las unidades morfopedológicas	26
Cuadro 13. Superficie erosionada por clase de erosión y unidad morfopedológica en por ciento.	36
Cuadro 14. Matriz de correlación.	36
Cuadro 15. Matrices de correlación para cada unidad morfopedológica.	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.	8
Figura 2. Características geomorfológicas de las unidades morfopedológicas.	25
Figura 3. Valores de C en función del uso de suelo y vegetación.	27
Figura 4. Factor de erosividad de la lluvia R.	28
Figura 5. Factor de erodabilidad del suelo K.	29
Figura 6. Factor topográfico LS.	30
Figura 7. Factor de cobertura C.	31
Figura 8. Factor de prácticas de conservación.	32
Figura 9. Erosión potencial.	34
Figura 10. Erosión actual.	35
Figura 11. Superficie afectada por clase de erosión.	38

1. INTRODUCCIÓN

La erosión es un proceso natural e inducido por el hombre que conlleva la pérdida de suelo en un determinado lugar y que afecta a los terrenos que se encuentran expuestos a la acción de los agentes modeladores del paisaje. La erosión hídrica es aquella donde la remoción de los materiales del suelo es debido a la acción del agua. Este proceso puede convertirse en un grave problema, pues tiene impactos de tipo socioeconómico y ambiental como lo demostraron Guerrero *et al.* (2013) y Duran *et al.* (2014).

Para estimar la cantidad de suelo erosionado se han creado distintos modelos, entre ellos, destacan por su fácil aplicación, la ecuación universal de pérdida de suelo EUPS (Wischmeier y Smith, 1978), y su versión modificada (Renard *et al.*, 1997). Las investigaciones realizadas sobre la erosión hídrica mediante USLE y sus diferentes modalidades indican que los factores adimensionales en la ecuación son los que tienen más impacto sobre la erosión hídrica.

Gaspari *et al.* (2009) estimaron la distribución espacial, temporal y el impacto económico de la pérdida de suelo y encontraron que las medidas de conservación aplicadas en sitios con actividad agrícola presentan una disminución de pérdida de suelo de aproximadamente 75% respecto a los lugares sin prácticas de conservación. Mejía *et al.* (2010) establecieron que la pendiente del relieve y la cubierta vegetal son los factores que más influyen la erosión hídrica, así mismo estimaron una pérdida de suelo de 500 a 1500 $^1\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ debido principalmente al factor topográfico, con pendientes superiores a 40%.

¹ Un Megagramo (Mg) es igual a una tonelada

Vázquez y Tapia (2011) encontraron que la erosión hídrica es del orden de $45 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pendientes de 18% a 40%, y en aquellas laderas con zanjas de infiltración, la erosión hídrica disminuía a $24.44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que representa una disminución del 80% de acuerdo con el análisis de varianza que realizaron. Rivera *et al.* (2012) realizaron un estudio con el modelo SWAT que estima la pérdida de suelo mediante las EUPS modificada, y encontraron que el modelo se puede aplicar a subcuencas, sin embargo, se debe tener cuidado con el factor LS, pues el modelo SWAT estima incorrectamente la longitud de una pendiente mayor a 25%.

Pérez *et al.* (2012) estimaron el impacto del huracán Stan en la erosión hídrica en las cuencas costeras de Chiapas y llegaron a la conclusión de que la configuración topográfica, fisiográfica y en especial mejores condiciones de cobertura vegetal ayudan a mitigar el efecto de eventos extremos de precipitación. Huerta y Loli (2014) estudiaron la incidencia de las precipitaciones en la erosión hídrica, y encontraron que los valores de pérdida de suelo están entre 7.29 a $33.40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pendientes entre 15% a 35%.

Los investigadores antes mencionados han estudiado la erosión hídrica con el enfoque de cuencas, este enfoque considera un área de estudio con variaciones en los parámetros de la EUPS, especialmente en lo que se refiere al factor topográfico, esto se acentúa si el área de estudio presenta un paisaje complejo que presenta pendientes irregulares que de acuerdo con Foster y Wischmeier (1974) es aquella en la cual el factor K o el factor S, o ambos, varían a lo largo de la ladera; por esta razón, el enfoque de cuencas puede llevar a estimaciones imprecisas de la erosión hídrica.

Por la razón mencionada la presente investigación evalúa la erosión hídrica a través de un enfoque morfopedológico; este enfoque subdivide el área de estudio en unidades homogéneas en base a geoformas, unidades genéticas de suelos y grupos hidrológicos de suelo (GHS), estas unidades morfopedológicas (UMP) se describen en términos de coeficiente de masividad (CM), coeficiente orográfico (CO), y se supone que se correlacionan con la erosión resultante.

El área de estudio considerado para comprobar esta hipótesis corresponde al valle de Puebla-Tlaxcala, los valles de Atlixco y Matamoros, que es densamente poblada y caracterizada por una intensa actividad agrícola (50 % de la superficie estudiada) que aunado al desarrollo industrial, urbanización y la presión demográfica tienen un impacto considerable en el espacio geográfico por lo que este es muy susceptible a la erosión de los suelos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Estimar la pérdida de suelo por acción del agua en la Cuenca del Rio Atoyac a partir del enfoque morfopedológico, para identificar las zonas de mayor riesgo de erosión hídrica y obtener una visión global de su distribución espacial.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Delinear y caracterizar el área de estudio en unidades morfopedológicas.
- Estimar la erosión potencial y actual en cada unidad morfopedológica usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.
- Analizar la correlación entre la pérdida de suelo en cada unidad morfopedológica y los parámetros de geoforma (coeficiente de masividad y coeficiente orográfico).

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La necesidad de mejorar la producción agrícola para soportar el crecimiento demográfico ha llevado a muchos países en vías de desarrollo a iniciar programas de manejo de suelos (Zinck, 2012). Dentro de los programas de manejo de suelo se debe considerar la degradación del mismo, pues esta afecta principalmente la fertilidad del suelo por pérdida de nutrientes en los horizontes superficiales (FAO, 2015).

Para llevar a cabo esta tarea es necesario obtener información integrada de los recursos naturales, de tal manera que permita predecir el potencial de uso de la tierra en grandes superficies, a un costo bajo y tiempo corto. Existen varios enfoques para los estudios integrados.

Enfoque genético. Es un método de análisis lógico, jerárquico y universal que permite llegar a unidades terrestres distintas a través de subdivisiones de la tierra en base a factores ambientales causales o factores genéticos tales como: geomorfología, geología y clima. Las limitantes de este método consisten en la excesiva extensión de las unidades terrestres, y aún dentro de ellas existe una complejidad ambiental muy amplia y los límites son a menudo difusos.

Enfoque paisajista o morfológico. Ha sido llamado por Beckett y Webster (1962) como una clasificación fisiográfica y se basa en las características del paisaje. Este enfoque involucra el reconocimiento de la tierra en base a características superficiales de

sus componentes con un solo rango de variación, limitado a aquellos atributos importantes para el uso de la tierra. Sin embargo, las divisiones unitarias de la tierra son más convencionales que absolutas y pueden o no ser la base de la unidad cartográfica.

El enfoque morfológico es funcional gracias a los conceptos de reconocibilidad y reproducibilidad propuestos por Beckett y Webster (1965). La reconocibilidad es definida por la probabilidad de que un componente, definido en una localidad, va a tener los mismos atributos en donde quiera que ocurra.

Enfoque paramétrico. Se define como la subdivisión y clasificación de tierras en base a valores de atributos selectos, sin embargo, existe el problema de la elección de atributos y la delimitación de las clases. Los atributos deben ser adecuados y cuantificables para la operación considerada además los parámetros elegidos deben establecer las unidades terrestres a nivel de componentes terrestres y a nivel de patrón terrestre.

Enfoque morfopedológico. También llamado geodinámico relaciona la geomorfología y pedología, fue propuesto por Tricart y Killian (1965), con el objeto de llegar rápidamente a un diagnostico global de la complejidad del medio y de los principales problemas de manejo y uso de los recursos. El principio básico de la delimitación de unidades morfopedologicas se encuentra en el balance morfogénesis-pedogénesis que ocurren sobre un mismo medio y que están influenciados por los mismos factores tales como: clima, vegetación, materiales litológicos, hombre y espacio de tiempo (Rossignol, 1987). Del balance morfogénesis-pedogénesis se derivan el nivel de estabilidad geodinámica del medio y consideraciones importantes sobre la fragilidad de las unidades de mapeo y las limitaciones de uso de los suelos (Zinck, 2012).

La delineación de unidades morfopedológicas considera variables como geoformas, tipo de material parental, vegetación, régimen hidrológico y uso del suelo, pues presentan cierto grado de similaridad estructural, morfológica, pedogenética, tipo de uso y cobertura vegetal.

La integración de mapas morfopedológicos no es solamente conceptual, sino también de procedimiento cartográfico. El mapa distingue elementos estables y elementos dinámicos, el marco geológico que es relativamente estable en el tiempo, incluyendo la litología y las disposiciones estructurales, figura como fondo de carta, superpuestas a este fondo se encuentran las unidades geomorfológicas dominantes y las clases de suelos (Zinck, 2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES

4.1.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Atoyac que se extiende sobre los estados de México, Puebla y Tlaxcala, entre La Malinche y la Sierra Nevada compuesta por el monte Tláloc y los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Esta región pertenece a la cuenca alta de la región hidrográfica 18 Balsas, la totalidad de la cuenca está dentro de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac perteneciente a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, su ubicación se muestra en la figura 1.



Figura 1. Localización del área de estudio.

La zona de estudio presenta altitudes que van desde los 2038 msnm en su parte más baja hasta 5200 msnm en su parte más alta con una pendiente media de 10.5 % y una máxima de 386 %. El cauce principal es el río Atoyac, nombre con el que se conoce el Río Balsas por su paso en los estados de Puebla y Tlaxcala. Este río nace del deshielo de los glaciares de la Sierra Nevada, penetra el estado de Tlaxcala, de donde regresa al territorio poblano, para regar el valle de Puebla-Tlaxcala, cruzando la ciudad de Puebla de Zaragoza. Al sur del municipio de Puebla es embalsado por la Presa Manuel Ávila Camacho, conocida como presa de Valsequillo, prosigue su curso hacia el suroeste, atravesando los valles de Atlixco y Matamoros. El principal afluente del río Atoyac es el pequeño río Zahuapan, que nace en la Sierra de Tlaxco, al norte del estado de Tlaxcala y continúa por la laguna Atlangatepec, en el estado de Puebla se une al río Atoyac.

4.1.2 MATERIAL CARTOGRÁFICO

Se utilizaron dos imágenes multiespectrales Landsat 8 proporcionado por the U.S. Geological Survey (U.S.G.S.), con row-path 025047 y 026047 de fecha febrero de 2014. También se utilizaron: un modelo de elevación digital con resolución de 15x15 m, cartas vectoriales (topográfico, uso de suelo y vegetación) a escala 1:250000 proporcionados por INEGI, y tres cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano, a escala 1:250000. Datos de precipitación total anual de 35 estaciones proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional.

4.1.3 PROGRAMAS DE CÓMPUTO

Para el tratamiento, procesamiento y presentación de los datos se utilizaron los siguientes programas: ArcGIS 10.1, ENVI 5.0, Office 2013.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 DELINEACIÓN DE UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS

La delineación de unidades morfopedológicas requiere la superposición de cartas con información de geoformas, unidades genéticas de suelo y grupos hidrológicos de suelo (GHS). Primero se realizó una delineación de unidades morfológicas, después se digitalizaron tres cartas geológicas y posteriormente con el uso de una carta edafológica se generó un mapa de grupos hidrológicos de suelo, finalmente estos mapas se superpusieron y se generaron las unidades morfopedológicas. Una unidad morfopedológica tiene constante a lo largo de su extensión los factores LS y K de la EUPS, además, presenta en general un solo tipo de uso de suelo y vegetación en condiciones poco perturbadas y por lo tanto puede ser considerado como una unidad de manejo.

El proceso para delinear las unidades morfológicas es el siguiente:

1. Corrección del DEM, eliminación de picos y relleno de sumideros.
2. Cálculo de la matriz negativa del DEM.
3. Cálculo de la dirección de flujo con el algoritmo de Jenson y Domingue (1988).
4. Determinación de geoformas con la herramienta Basin de ArcGIS 10.1 (Layer 1).
5. Reclasificación altimétrica del DEM con el método de desviación estándar (Layer 2).
6. Obtención y reclasificación del mapa de pendientes mediante el método de desviación estándar (Layer 3).
7. Corrección de los Layers 2 y 3 por generalización espacial mediante filtros de mayoría para eliminar píxeles aislados cuyo tamaño es menor que la unidad mínima cartografiable.
8. Conversión de ráster a vector de los Layers 1, 2 y 3.

9. Superposición de los mapas obtenidos (Layer 1, Layer 2 y Layer 3).
10. Generalización espacial del producto final (geoformas) para eliminar las unidades menores a la unidad mínima cartografiable.

Para fines de análisis geoestadístico se utilizaron dos parámetros que permiten caracterizar la geoforma de las unidades morfopedológicas en relación con la erosión de los suelos, estos parámetros son: el coeficiente de masividad (CM) y el coeficiente orográfico (CO), que se calculan utilizando las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$CM = h * A^{-1} \quad (1)$$

$$CO = h * CM \quad (2)$$

Donde: h es la altura media del área de estudio, A es la superficie del área de estudio.

Los grupos hidrológicos de suelo se clasificaron en base al cuadro 1

Cuadro 1. Clasificación de grupos hidrológicos de suelo.

GHS	Descripción
A	Menor escorrentía, altas permeabilidades aun saturadas, profundo de consistencia suelta; arena o grava. Textura: Arenoso, Arenoso-Limoso, Franco, Franco-Limoso, Franco-Arenoso con ≥ 35 % de fragmentos gruesos. Familia esquelética, textura media.
B	Moderadamente permeable en estado saturado. Arenosos menos profundos. Textura: franco-arenosos a areno-migajoso, profundidad media, franco profundo.
C	Poca permeabilidad en estado saturado, presenta un estrato impermeable. Textura: franco-arcilloso o arcillosa, franco, migajón limoso, franco arcillo-arenoso, franco arcillo limoso. También arcilla-esquelética (≥ 35 % de fragmentos gruesos).
D	Mayor escorrentía, muy impermeable, muy arcilloso y profundo (arcilla expandible), capa superficial arcillosa muy impermeable a suelo con subsuelos muy impermeable.
Mixto	Suelos hidromórficos con manto freático dentro de los primeros 60 cm. Cuando son drenados esos suelos pertenecerán a un grupo hidrológico mixto; (A/D, B/D, y C/D) en base a su conductividad hidráulica en estado saturado y la profundidad del manto freático. La primera letra corresponde a la condición de bien drenado, la segunda corresponde a la condición de no drenado, es decir la condición actual.

Fuente: Segundo, 2009.

4.2.2. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO EUPS

Para estimar la erosión hídrica mediante la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (Ec. 3) en el ambiente de ArcGIS, es necesario calcular cada factor por separado en formato ráster y efectuar una multiplicación entre factores a través del álgebra de mapas que considera las imágenes (ráster) como matrices por lo que la EUPS se resuelve por una simple multiplicación de matrices.

$$A = R K L S C P \quad (3)$$

Donde A es el promedio anual de pérdida de suelo ($Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$), R es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ mm^{-1}\ ha^{-1}\ hr^{-1}$), 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 y P es el factor adimensional de prácticas de conservación.

La ecuación 1 fue usada para evaluar la erosión potencial como la erosión actual, la única diferencia entre ambos tipos de erosión reside en que la erosión potencial considera los factores C y P iguales a la unidad.

4.2.2.1 Factor de erosividad de la lluvia R

Este factor se define como el producto de dos características de la lluvia que implican el impacto que esta tiene en la generación del proceso erosivo, tales características son la energía cinética como factor disgregador de las partículas del suelo y que promueve la compactación de su superficie, y la intensidad máxima durante 30 minutos (EI_{30} , índice que utiliza el EUPS) como agente que determina la aparición del escurrimiento superficial cuando se supera la capacidad de infiltración; dicho de otra manera, es la capacidad potencial de la lluvia para causar erosión (León, 2001).

Para el caso de México, Cortes (1991) preparo un mapa de isoerosividad, este mapa se desarrolló con datos de 53 estaciones meteorológicas con periodos que variaron de 4 a 11 años. Los promedios anuales encontrados para el índice EI_{30} van de 800 a 16800 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, para el noreste y sureste del país respectivamente. Dado el escaso número de estaciones con pluviógrafos del país y la escala baja del plano fue conveniente regionalizar las áreas sujetas a condiciones similares de lluvia. De esta manera Cortes formo 14 regiones diferentes para la república, con referencia a la erosividad de la lluvia. Además se generaron mediante análisis de regresión ecuaciones que permiten la estimación del factor R de la USLE en función de la lluvia anual para cada una de las regiones.

Cuadro 2. Ecuaciones de Cortes para diferentes regiones de isoerosividad.

Región	Ecuación	R ²
01	$Y = 1.2078x + 0.002276x^2$	0.92
02	$Y = 3.4555x + 0.006470$	0.93
03	$Y = 3.6752x - 0.001720x^2$	0.94
04	$Y = 2.8959x + 0.002983x^2$	0.92
05	$Y = 3.4880x - 0.000188x^2$	0.94
06	$Y = 6.6847x + 0.001680x^2$	0.90
07	$Y = -0.0334x + 0.006661x^2$	0.98
08	$Y = 1.9967x + 0.003270x^2$	0.98
09	$Y = 7.0458x - 0.002096x^2$	0.97
10	$Y = 6.8938x + 0.000442x^2$	0.95
11	$Y = 3.7745x + 0.004540x^2$	0.98
12	$Y = 2.4619x + 0.006067x^2$	0.96
13	$Y = 10.7427x - 0.001008x^2$	0.97
14	$Y = 1.5005x + 0.002640x^2$	0.95

Fuente: Cortes (1991), x = precipitación anual medida.

En el presente estudio se consideraron las precipitaciones anuales de 35 estaciones (Cuadro 3) localizadas dentro y en la periferia del área de estudio y que fueron agrupadas en cinco zonas morfopedológicas, ZMP, que se usaron para generar cinco

mapas ráster de precipitación media anual por interpolación polinomial local de primer orden (Cuadro 4), que sirvieron como insumo para el modelo de (Ecuación 4) propuesto por Cortes (1991) para la zona VII, con una $R^2 = 0.98$.

$$Y = 1.9967x + 0.003270x^2 \quad (4)$$

Donde Y es el índice de erosividad EI_{30} para un evento y, x es la precipitación media anual.

La ecuación 2 fue resuelta para cada zona morfopedológica mediante el álgebra de mapas.

Cuadro 3. Datos de precipitación total anual de estaciones meteorológicas.

Estación	Precipitación anual (mm)	Latitud	Longitud	Estación	Precipitación anual (mm)	Latitud	Longitud
21096	855.6	19.346389	-98.581389	29032	712.6	19.592500	-98.125556
21214	887.8	19.173889	-98.580556	29016	749.5	19.492500	-98.535278
29047	1,095.50	19.457778	-98.422222	29024	717	19.492500	-98.471944
29010	761.2	19.471944	-98.345278	29034	579.7	19.584722	-98.478056
29040	691.2	19.326667	-98.366111	29052	659.1	19.655278	-98.228889
21078	802	19.298611	-98.433889	21140	695.4	19.839444	-98.032778
29043	714.3	19.307222	-98.372778	21069	993.8	19.545000	-97.832500
29041	706.1	19.261389	-98.370556	29027	720.7	19.388611	-98.021389
21046	834.9	19.161944	-98.406389	29011	642.9	19.315833	-97.911111
21167	831.5	19.105556	-98.463611	29026	806	19.199722	-97.907500
29169	871.3	19.219444	-98.243056	21035	969.1	19.012500	-98.193056
29161	857.3	19.237778	-98.159167	21034	913.8	19.955556	-98.275278
29050	870	19.243333	-98.190833	21012	867.9	19.921667	-98.454167
29030	834.5	19.323889	-98.246667	21193	939.2	19.921944	-98.551389
29042	752.2	19.342778	-98.160556	15106	1,060.20	19.207778	-98.758333
29002	808.2	19.415556	-98.140000	15018	773	19.325000	-98.765278
29004	639.4	19.519722	-98.269167	15101	586.7	19.519444	-98.812500
29003	686.4	19.555556	-98.202778				

Fuente: SMN, 2015.

Cuadro 4. Polinomios locales para interpolación de la precipitación anual por ZMP.

ZMP	Geoforma	UMP	Ecuación
1	Planicie	IV, VI	$0.852431203191927x + 107.678865212812$
2	Cono Volcánico	V	$0.779189129217144x + 172.373901625372$
3	Llanura	I	$0.290517128797229x + 475.533142982618$
4	Meseta	III	$0.728031889534232x + 162.411030287824$
5	Sierra	II, VII, VIII	$0.169947911292497x + 676.39815321117$

x= precipitación anual medida.

4.2.2.2 Factor de erodabilidad del suelo K

Este factor indica la resistencia de un suelo a ser erosionado y transportado por el flujo superficial. La textura, la estructura, el contenido de materia orgánica, etc. son algunas propiedades que determinan la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado. Se puede calcular mediante la metodología propuesta por la FAO (1980), que utiliza la textura superficial y la unidad de suelo (Cuadro 5) al que pertenece, según la clasificación FAO/UNESCO.

En los mapas de suelo elaborados por la FAO a nivel mundial y por la dirección de estudios del territorio nacional en nuestro país, se utiliza la simbología siguiente:

$$\frac{Ah}{2}, \frac{Bh + A}{2}$$

Donde:

A= unidad de suelo, Bh + A = Asociación de unidad de suelo, h = Subunidad de suelo y

2 = Textura

Estos dos primeros términos (unidad de suelo y textura) constituyen los factores edáficos y a partir de ellos, se puede estimar un valor del factor K para un suelo dado utilizando el cuadro 6.

Cuadro 5. Unidades de suelo.

Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Acrisoles	A	Fluvisoles	J	Solonetz	S
Cambisoles	B	Kastañozem	K	Andosoles	T
Chernozem	C	Luvisoles	L	Rankers	U
Podzoluvisoles	D	Gleysem	M	Vertisoles	V
Rendzinas	E	Nitsoles	N	Planosoles	W
Ferrosoles	F	Histosoles	O	Xerosoles	X
Gleysoles	G	Podzoles	P	Yermosoles	Y
Feozem	H	Arenosoles	Q	Solonchak	Z
Litosoles	I	Regosoles	R		

Fuente: FAO (1980).

Cuadro 6. Valores del factor K de acuerdo a la unidad de suelo.

Textura				Textura				Textura			
Orden	G	M	F	Orden	G	M	F	Orden	G	M	F
A	0.026	0.04	0.013	I	0.013	0.02	0.007	Rc	0.013	0.02	0.007
Af	0.013	0.02	0.007	J	0.026	0.04	0.013	Rd	0.026	0.04	0.013
Ag	0.026	0.03	0.013	Jc	0.013	0.02	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.02	0.007	Jd	0.026	0.04	0.013	S	0.053	0.079	0.026
Ao	0.026	0.04	0.013	Ge	0.026	0.04	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Ap	0.053	0.079	0.026	Gt	0.053	0.079	0.026	Sm	0.026	0.04	0.013
B	0.026	0.04	0.013	Jp	0.053	0.079	0.026	So	0.053	0.079	0.26
Bc	0.026	0.04	0.013	K(h,K,l)	0.026	0.4	0.013	T	0.026	0.04	0.013
Bd	0.026	0.04	0.013	L	0.026	0.04	0.013	Th	0.013	0.02	0.007
Be	0.026	0.04	0.013	La	0.053	0.079	0.026	Tm	0.013	0.02	0.007

Cuadro 6. Continuación.

Bf	0.013	0.02	0.007	Lc	0.026	0.04	0.013	To	0.026	0.04	0.013
Bg	0.026	0.04	0.013	Lf	0.013	0.02	0.007	Tv	0.026	0.04	0.013
Bh	0.013	0.02	0.007	Lg	0.026	0.04	0.013	U	0.013	0.02	0.007
BK	0.026	0.04	0.013	Lk	0.026	0.04	0.013	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
Bv	0.053	0.079	0.026	Lo	0.026	0.04	0.013	W	0.053	0.079	0.026
Bx	0.053	0.079	0.026	Lp	0.053	0.079	0.026	Wd	0.053	0.079	0.026
C(g,h,k,l)	0.013	0.02	0.007	Lv	0.053	0.079	0.026	We	0.053	0.079	0.026
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	M(a,g)	0.026	0.04	0.013	Wh	0.026	0.04	0.013
E	0.013	0.02	0.007	N(d,e,b)	0.013	0.02	0.007	Wm	0.026	0.04	0.013
F(a,b,o,p,r)	0.013	0.02	0.007	O(d,e,x)	0.013	0.02	0.007	Ws	0.026	0.079	0.026
G	0.026	0.04	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.02	0.007	Pf	0.053	0.079	0.026	X(b,h,l,y)	0.053	0.079	0.026
Gd	0.026	0.04	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.04	0.013	Ph	0.026	0.04	0.013	Z	0.053	0.04	0.013
Gh	0.013	0.02	0.007	Pl	0.026	0.04	0.013	Zg	0.026	0.04	0.013
Gm	0.013	0.02	0.007	Po	0.053	0.079	0.026	Zm	0.013	0.02	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	Pp	0.053	0.079	0.026	Zo	0.26	0.04	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Q(a,c,f,l)	0.013	0.02	0.007	Zt	0.053	0.079	0.026
Gv	0.013	0.079	0.026	R	0.026	0.04	0.013				
H(c,g,h,l)	0.013	0.02	0.007	Re	0.026	0.04	0.013				

Fuente: FAO (1980).

Procedimiento para evaluar el factor K con el método de la FAO

1. Determinar la unidad de suelo o grupo de unidades de suelos asociados entre sí.
2. Determinar la textura que presenta la unidad o grupo de unidades de suelos asociados entre sí.
3. Una vez determinada la unidad de suelo y la clase de textura que le corresponde, entre en el orden de la tabla y ubique la unidad de suelo.
4. Continúe en la tabla y ubique la clase de textura al que pertenece la unidad de suelo; utilice la tabla como un cuadro de doble entrada, es decir, ubíquese en la columna titulada orden de la tabla con la unidad de suelo de que se trate, una vez

ubicado el orden del suelo, continúe horizontalmente hasta interceptar la clase de textura que corresponde. El valor del intercepto es el valor de K.

5. Para aquellos suelos que están formados con dos o más unidades de suelo, se obtiene el valor K siguiendo el mismo procedimiento del inciso 4, pero una vez obtenido el valor de K para cada unidad que forma la asociación, se procede a estimar su valor promedio de K.
6. Los valores de K obtenidos con este método varían desde 0.013 hasta 0.079. Desde un punto de vista práctico es suficiente utilizar clases de valores de K, esto es: 0.010, 0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040, 0.050, 0.060, 0.070, 0.080.

4.2.2.3 Factor topográfico LS

El efecto de la topografía sobre la erosión está dado por la longitud y el grado de inclinación de la pendiente del terreno, la longitud de la pendiente se representa por L y el grado de inclinación se representa por S, por convención estos dos factores se incluyen en un solo termino denominado factor topográfico LS. El factor L es la longitud de la proyección ortogonal desde el punto donde inicia el escurrimiento hasta el punto donde la pendiente disminuye lo suficiente para producir sedimentación o hasta el punto donde el escurrimiento encuentra a un curso bien definido. El factor S considera el efecto que el grado de inclinación del terreno tiene sobre la erosión (Foster *et al.*, 1977).

La longitud de la ladera influye en las perdidas del suelo en razón de que conforme esta aumenta, la lámina escurrida que se va acumulando hacia abajo, incrementa su fuerza y capacidad de arrastre; asimismo, en las laderas de mayor longitud es más frecuente la aparición de regueros, con los cuales las tasas de erosión aumentan considerablemente al

concentrarse las aguas en pequeños cauces, aumentando su velocidad y capacidad de transporte de las partículas del suelo (Meyer *et al*, 1975, citado por González, 1991).

Gonzales (1991) afirma que el efecto del factor S es directamente proporcional a la cantidad de escurrimiento que se genera en una ladera por unidad de superficie y determina la velocidad de las aguas y su fuerza de arrastre. Bursztynsky *et al* (1986) afirman que el efecto de la longitud de ladera no es tan grande como el efecto del ángulo de inclinación; así el factor LS se duplica cuando L se cuadruplica y S se mantiene constante, por otro lado, cuando L se mantiene constante el factor LS se triplica con una duplicación del gradiente S.

El factor LS de la USLE se desarrolló usando una unidad de evaluación denominado lote estándar. Un lote estándar tiene 22.13 m de longitud y se encuentra ubicado en una pendiente uniforme con un 9% de inclinación. Este lote estándar se utilizó como base para definir la variación de los factores L y S (Wischmeier *et al*; 1971).

El factor L se calcula a través de la ecuación 5 (Mitchell y Bubenzer, 1984):

$$L = (\lambda * 22.13^{-1})^m \quad (5)$$

En esta expresión λ es la longitud de la pendiente y se obtuvo de las unidades morfológicas delineadas, m (Foster *et al.*, 1977) es un exponente cuyo valor varía con el grado de la pendiente y se calcula con la ecuación 6:

$$m = \beta * (\beta + 1)^{-1} \quad (6)$$

β (McCool *et al.*, 1989) se calcula usando la ecuación 7:

$$\beta = ((\sin \theta * 0.0896^{-1}) * (2(\sin \theta)^{0.8} + 0.56)^{-1}) * r \quad (7)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación del terreno, en radianes; r tiene el valor de: 0.5 en terrenos forestales o pastizales, 1.0 en terrenos agrícolas y 2.0 en sitios de construcción.

Para calcular el factor S se utilizan las ecuaciones 8 y 9 (McCool *et al.*, 1989):

$$S = 10.8 * \sin \theta + 0.03 \quad \text{para } s < 9\% \quad (8)$$

$$S = 16.8 * \sin \theta - 0.5 \quad \text{para } s \geq 9\% \quad (9)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación de la pendiente, en radianes.

4.2.2.4 Factor de cobertura C

Este factor recoge la influencia que tiene la vegetación sobre las pérdidas de suelo, reduciendo la energía cinética de las gotas de lluvia al caer sobre la superficie del terreno, asimismo la velocidad del escurrimiento, efecto conocido como regulación. El factor C de la ecuación universal de pérdida de suelo es el cociente que se obtiene al dividir la pérdida de suelo obtenida en un terreno con cierto tipo de manejo entre la pérdida de suelo obtenida para el mismo terreno bajo cultivo continuo (Figueroa *et al.*; 1991). En otras palabras (Morgan, 1986) este factor representa la tasa de pérdida de suelo bajo un cultivo dado a aquella en suelo desnudo.

De acuerdo con Renard *et al.* (1997), se trata quizás del factor más importante de la USLE, dado que representa condiciones que pueden ser manejadas muy fácilmente para reducir la erosión; los valores de C pueden variar desde aquellas cercanas a cero para

suelos muy protegidos, hasta 1 en condiciones opuestas y depende de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos y prácticas de manejo de un lugar en particular. También depende del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal en el momento en que actúa el agente erosivo (Figueroa *et al*; 1991).

La influencia del cultivo en la erosión se manifiesta a través de la especie cultivada, las mezclas cuando existen, la forma y numero de labores, la productividad, la existencia de mayor o menor erosividad de la lluvia en el periodo del año en que se realizó el cultivo. Los cambios de efectividad defensiva de la cubierta vegetal son graduales, pero en la práctica conviene establecer unos periodos, dentro de los cuales sea posible considerar uniforme este efecto protector. Con fines prácticos varios autores señalan el uso de tablas para determinar el valor de C; dichos valores se muestran el cuadro 7 para bosques y el cuadro 8 para algunos cultivos.

Cuadro 7. Valores de C para bosques.

% de superficie cubierta por copas de arboles	% de cubierta en contacto con el suelo	Tipo de ordenación	
		C	NC
100 - 75	100 - 90	0.001	0.003 - 0.011
75 - 40	90 - 70	0.002 - 0.003	0.010 - 0.030
40 - 20	70 - 40	0.003 - 0.009	0.030 - 0.090

Figueroa *et al*; 1991

C= montes con control estricto de pastoreo

NC= montes sin control de pastoreo

Cuadro 8. Valores de C para cultivos.

Cultivo y practica	Factor C
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de mulch	0.001
Sabana o pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbácea sobrepasada	0.1
Maíz, sorgo o mijos; alto rendimiento sin laboreo convencional	0.20 - 0.55
Maíz, sorgo o mijos; alto rendimiento con laboreo convencional	0.50 - 0.90
Maíz, sorgo o mijos; alto rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02 - 0.10
Maíz, sorgo o mijos; alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12 - 0.20
Maíz, sorgo o mijos; bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30 - 0.45
Pradera herbácea	0.01 - 0.025
Arroz	0.10 - 0.20
Cacahuete	0.30 - 0.80
Patata, surcos según la pendiente	0.20 - 0.50
Patata, surcos transversales a la pendiente	0.10 - 0.40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.27
Caña de azúcar	0.13 - 0.40
Wischmeier y Smith, 1978; Morgan, 1997	

4.2.2.5 Factor de prácticas de conservación P

Por definición el factor P es la relación entre la pérdida de suelo con un practica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente (Figueroa *et al*; 1991).

Este factor recoge el efecto que tienen las diferentes prácticas de conservación de suelos en las pérdidas del mismo; sin embargo, de todos los factores de la EUPS, los valores correspondientes a este factor son los de menor confiabilidad; este factor representa en esencia como las condiciones de la superficie afectan las rutas del flujo y su hidráulica, sin embargo, la efectividad de prácticas tales como la siembra en contorno en la disminución de pérdidas de suelo es de difícil comprobación; así por ejemplo, la efectividad de la practica en mención de estudios de campo sobre una pendiente dada ha

variado desde un efecto nulo en la reducción de pérdidas de suelo, hasta la disminución en un 90 % de ellas (Renard *et al*, 1991).

Cuando se introduce un cultivo en un suelo con pendiente, en ocasiones se utilizan prácticas mecánicas que reducen el agua de escurrimiento y por consecuencia la cantidad de suelo que puede transportar. Las más importantes de estas prácticas son el surcado al contorno, el cultivo en fajas al contorno y sistemas de terrazas. En el caso de terrenos de agostadero se deben considerar aquellas prácticas que incrementan la rugosidad orientadas siguiendo las curvas de nivel y que produzcan almacenamiento de humedad. Se deben utilizar cauces empastados para manejar los excesos de escurrimiento en todas estas prácticas (Figuerola *et al*; 1991).

En el cuadro 9 se proporcionan valores para cultivos en surcos al contorno, cultivos en fajas y sistemas de terrazas.

Cuadro 9. Valores de P para surcos y fajas al contorno.

Pendiente del terreno %	Cultivo al contorno		Cultivo en fajas al contorno y surcos irrigados			Terrazas
	Longitud Máxima (m)	Valor de P	Valor de P	Longitud Máxima (m)	Ancho México (m)	
1 - 2	122	0.6	0.3	244	40	0.12
3 - 8	91.5 - 61	0.5	0.25	183 - 122	30	0.1
9 -12	36.6	0.6	0.3	73.2	24.4	0.12
13 - 16	24.4	0.7	0.35	48.8	24.4	0.14
17 - 20	18.3	0.8	0.4	36.6	18.3	0.16
21 - 25	15.2	0.9	0.45	30	15.2	0.18

Wischmeier y Smith (1978)

En el cuadro 10 se observan los valores de P para diferentes prácticas de conservación.

Cuadro 10. Valores de P para prácticas conservación.

Practica	Valor de P
Surcado al contorno	0.75 – 0.9
Surcos rectos	0.8 – 0.95
Franjas al contorno	0.6 – 0.8
Terrazas (2 - 7 % de pendiente)	0.5
Terrazas (7 – 13 % de pendiente)	0.6
Terrazas (Mayor de 13 %)	0.8
Terrazas de banco	0.1
Terrazas de banco en contrapendiente	0.05
Surcado lister	0.5
Ripper	0.6
Terrazas de Zing	0.1

Fuente: Figueroa *et al* (2008).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS

Ocho unidades morfopedológicas (Fig. 2) fueron delineadas con base a la metodología descrita anteriormente. La descripción paramétrica y analítica de cada una de las unidades morfopedológicas se muestran en los cuadros 11 y 12 respectivamente. Las unidades morfopedológicas se muestran en los cuadros 11 y 12 respectivamente. Las unidades morfopedológicas II y VII debe su estabilidad geodinámica exclusivamente por la presencia de la vegetación por lo cual puede ser considerada como “condicionalmente estable” mientras que la vegetación exista.

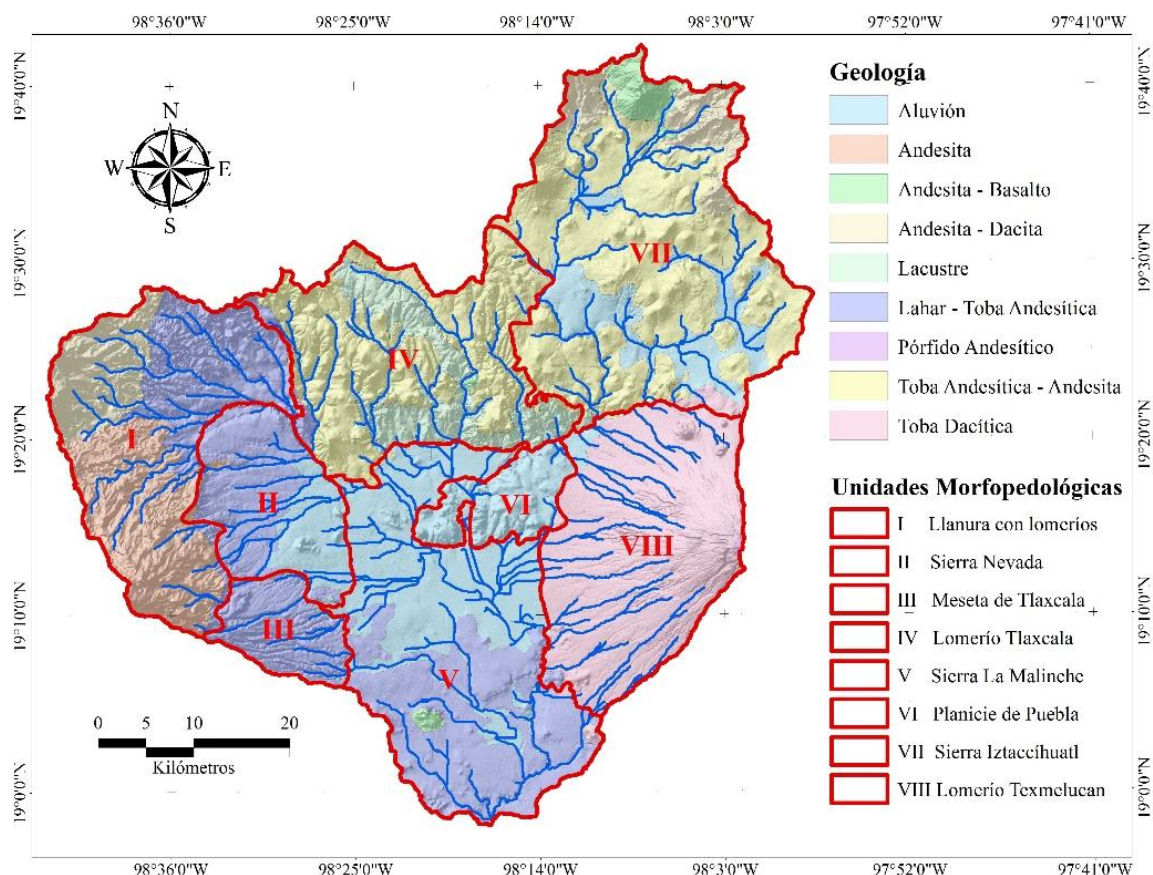


Figura 2. Características geomorfológicas de las unidades morfopedológicas.

Cuadro 11. Características paramétricas de las unidades morfopedológicas

UMP	Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	Llanura con lomeríos	837.651	23.6	2245	3504	2575	261.8	8.5	3.1	7918.2	1.8
II	Sierra Nevada	531.340	15.0	2302	5200	3085	232.5	23.5	5.8	17908.0	1.8
III	Meseta de Tlaxcala	525.229	14.8	2190	2982	2504	257.7	15.0	4.8	11939.1	2.0
IV	Lomerío Tlaxcala	108.726	3.1	2181	2362	2267	95.5	8.2	20.9	47270.4	1.7
V	Sierra La malinche	512.422	14.5	2079	4409	2559	385.9	8.2	5.0	12779.3	1.4
VI	Planicie de Puebla	675.399	19.0	2038	2442	2188	386.6	2.5	3.2	7085.1	2.1
VII	Sierra Iztaccíhuatl	115.465	3.3	2276	3140	2554	126.2	15.6	22.1	56484.2	1.4
VIII	Lomerío Texmelucan	239.575	6.8	2240	3012	2417	261.6	5.8	10.1	24389.1	1.3

UMP Unidades morfopedológicas, 1 Área en km², 2 Porcentaje de área, 3 Altura mínima, 4 Altura máxima, 5 Altura media, 6 Pendiente máxima, 7 Pendiente media, 8 Coeficiente de masividad, 9 Coeficiente orográfico, 10 Coeficiente de forma, 11 Forma.

Cuadro 12. Características analíticas de las unidades morfopedológicas

UMP	Geoforma	Geología	Drenaje	Control	GHS	Uso	Morfogénesis	EG
I	Llanura y lomeríos	1, 6, 9	Dendritico angular	Estructural y Topográfico	A, B C, D	Agricultura Matorral	Moderada (laminar, canales)	Peneestable
II	Sierra	4, 6, 8	Dendritico	Topográfico	A, B C	Bosque Páramo	Ligera (laminar)	Estable
III	Meseta	7, 10	Dendritico angular	Topográfico y Estructural	B, C	Agricultura Matorral Bosque	Fuerte (cárcavas y laminar)	Inestable
IV	Lomerío	9	Sin patrón de drenaje	Muy permeable	A, B C	Agricultura Urbano	Fuerte (cárcavas y laminar)	Inestable
V	Cono volcánico	3	Radial	Topográfico	A	Agricultura Bosque	Moderada (canales)	Peneestable
VI	Planicie	9, 8	Subparalelo angular	Topográfico y Estructural	A, B C, D	Agricultura Urbano	Ligera (laminar)	Estable
VII	Sierra	8	Paralelo pobre	Topográfico y Litológico	A	Matorral Agricultura	Ligera (laminar y cárcavas)	Estable
VIII	Lomerío	8, 9	Paralelo	Topográfico	A, B	Matorral Agricultura	Ligera (laminar)	Estable

UMP Unidad morfopedológica, GHS Grupo hidrológico de suelo, EG Estabilidad Geodinámica, 1 Toba andesítica- andesita, 2 Toba Andesítica, 3 Toba Dacítica, 4 Andecita, 5 Dacita, 6 Andesita-Dacita, 7 Toba andesítica- andesita, 8 Lahar – Toba andesítica, 9 Aluvién, 10 Lacustre.

5.2 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO

5.2.1 FACTORES DE LA EUPS

Las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 muestran la distribución espacial de los valores de los factores de la EUPS en formato ráster. El factor R tiene un valor máximo de 6111.77, el factor K tiene valores que van desde 0.013 hasta 0.079, el factor LS tiene valores que fluctúan de 0.03 hasta 180.32 y el factor C varía entre 0 hasta 1 (Fig. 3). El factor P adquiere valores diferentes de 1 solamente en la zona agrícola donde las prácticas de conservación consisten de cultivos en surcos al contorno, y en las demás zonas que carecen de prácticas de conservación el factor P es igual a la unidad.

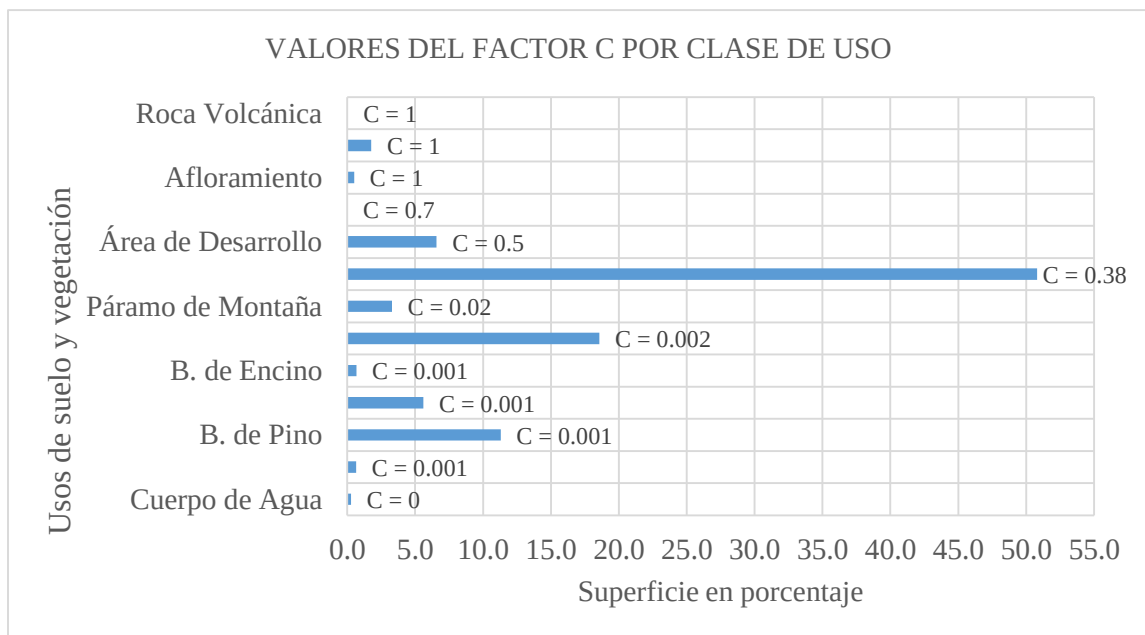


Figura 3. Valores de C en función del uso de suelo y vegetación.

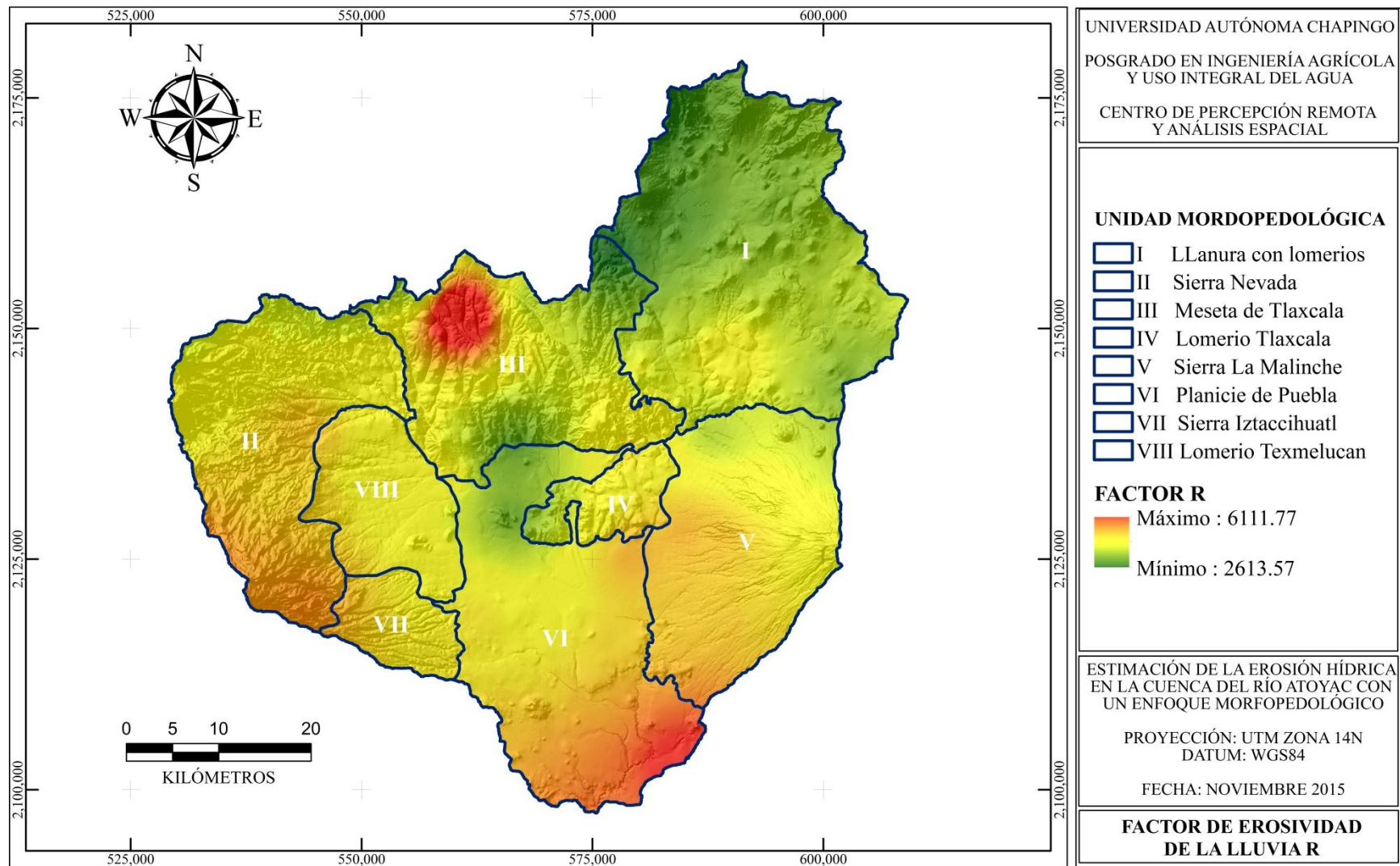


Figura 4. Factor de erosividad de la lluvia R.

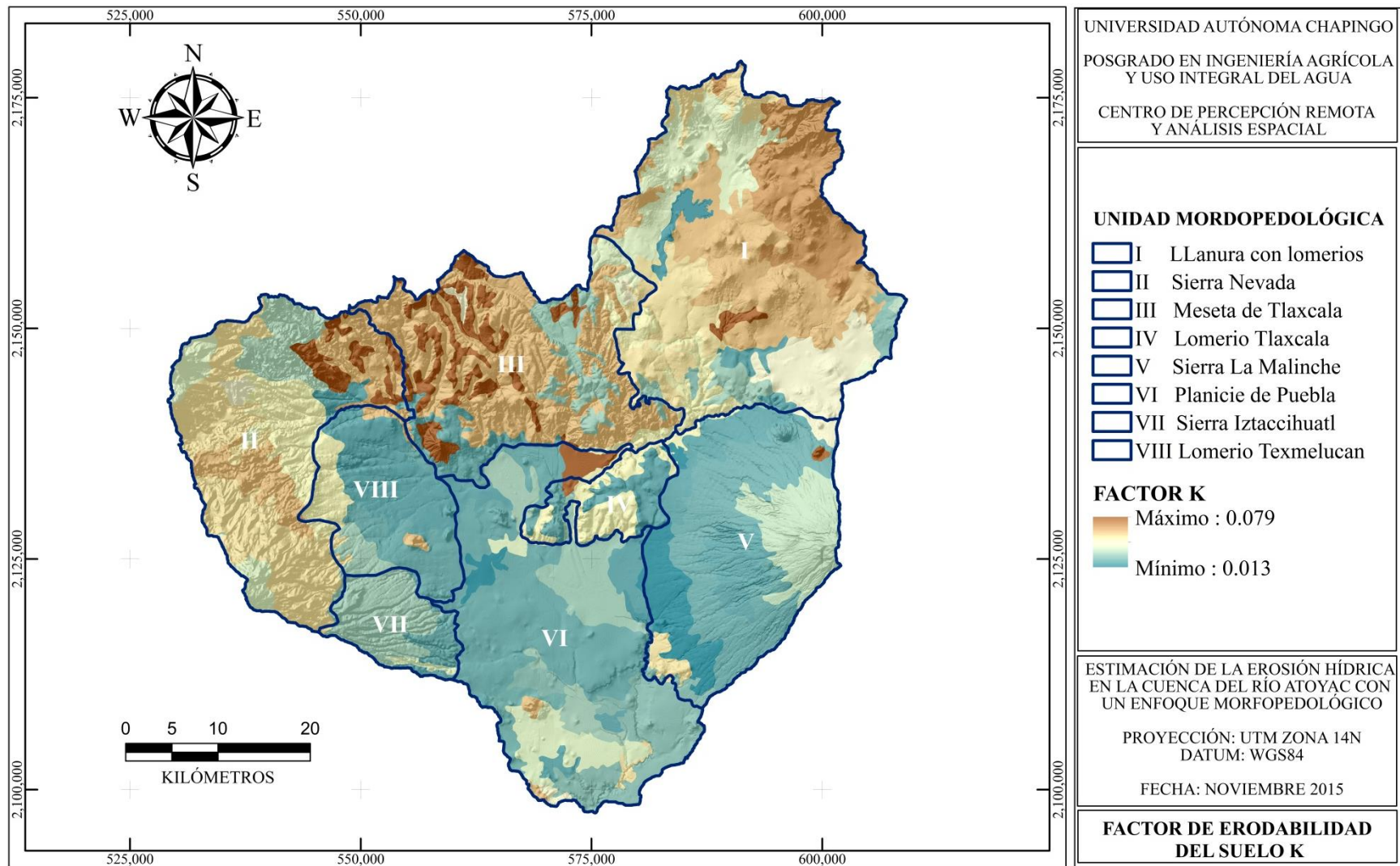


Figura 5. Factor de erodabilidad del suelo K.

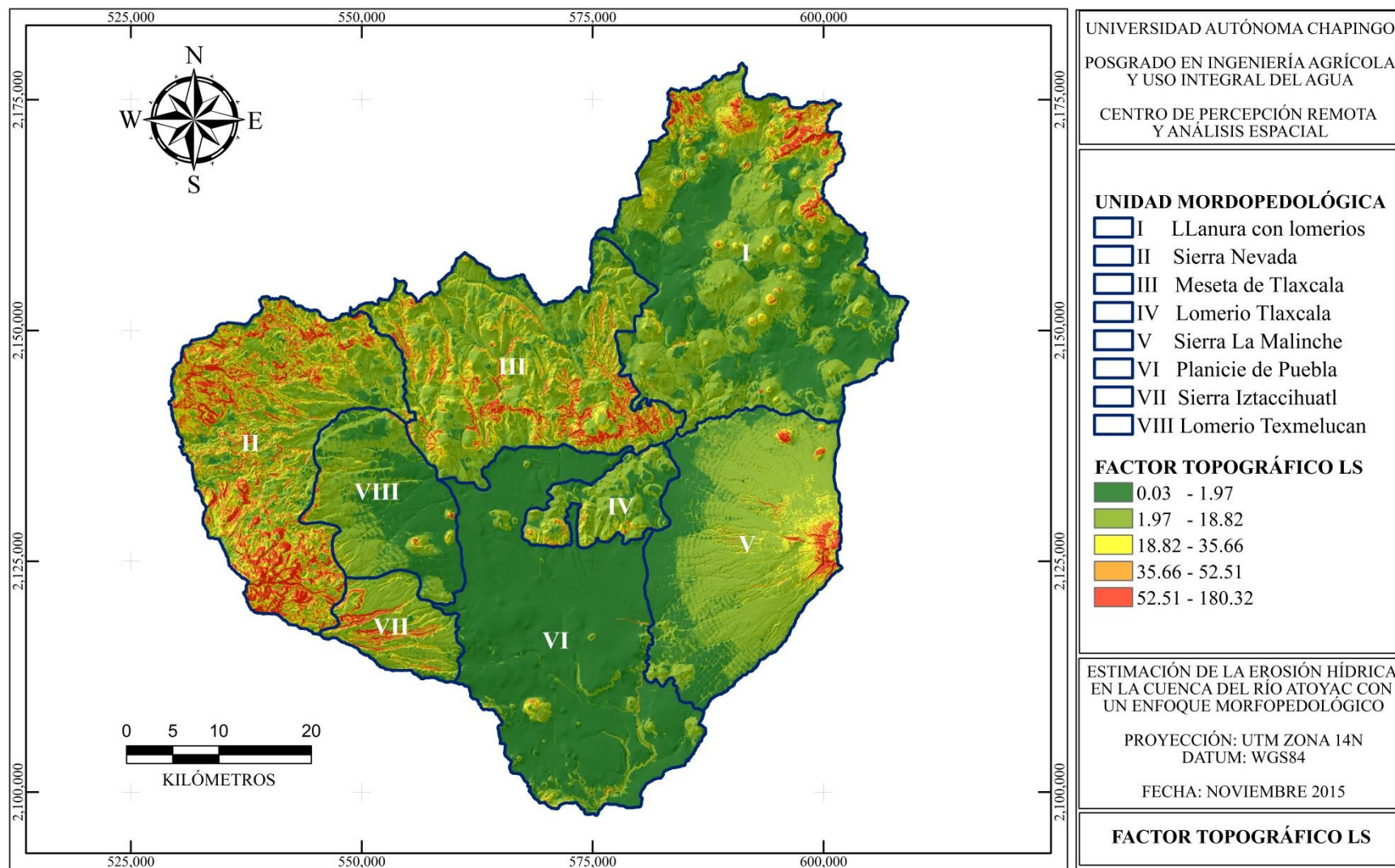


Figura 6. Factor topográfico LS.

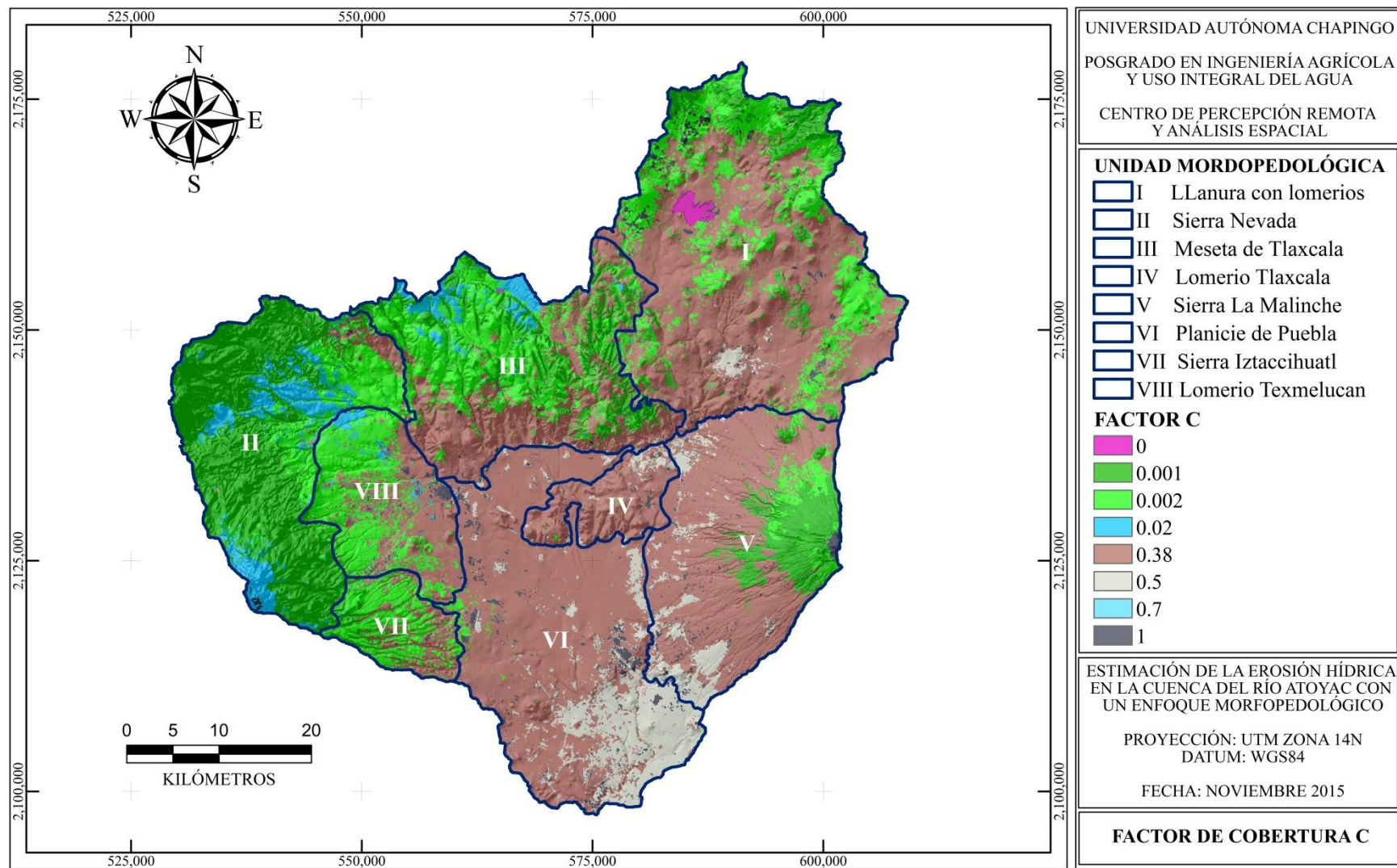


Figura 7. Factor de cobertura C.

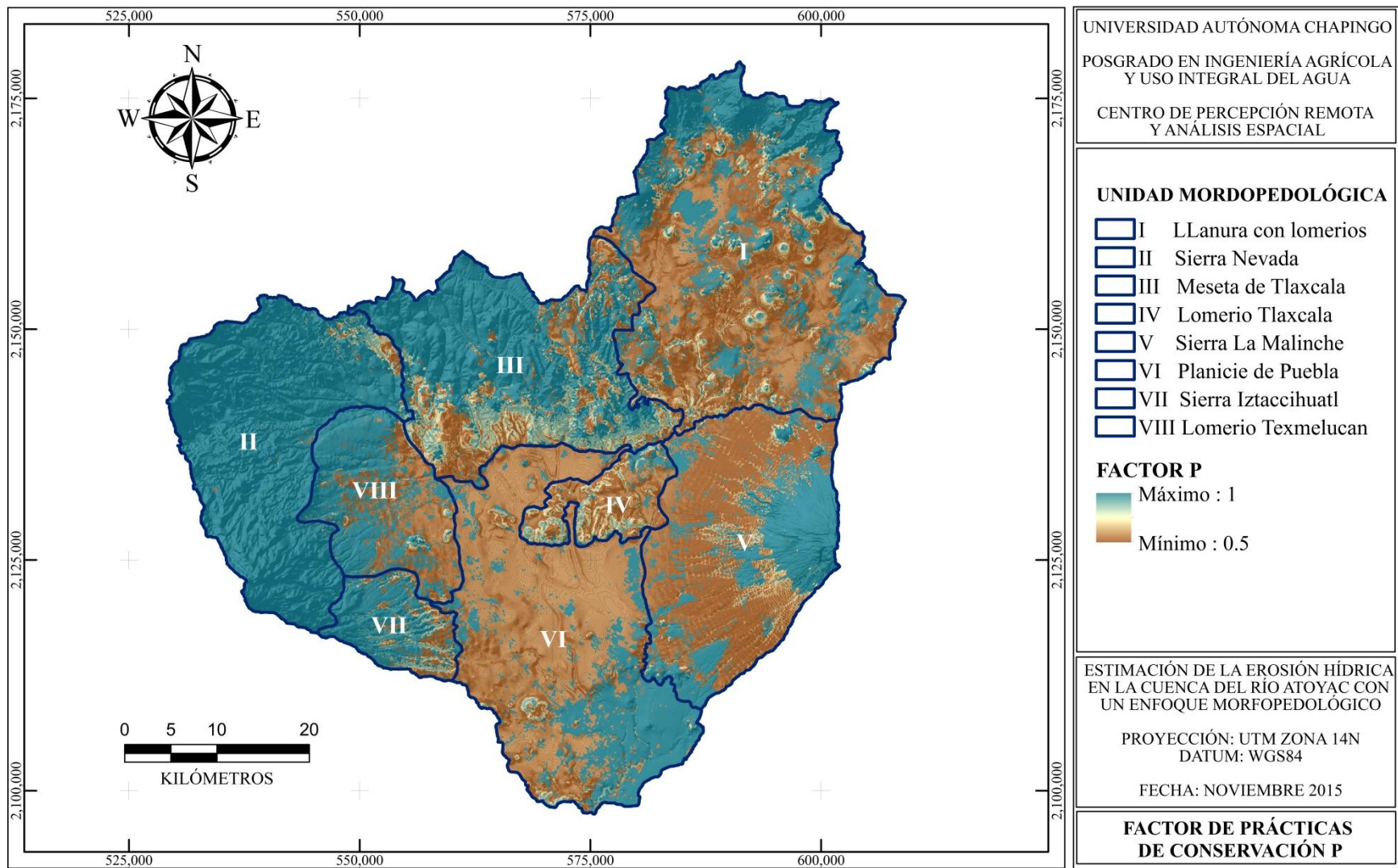


Figura 8. Factor de prácticas de conservación P.

5.2.2 TASA DE EROSIÓN POTENCIAL

Los factores que intervienen en la tasa de erosión potencial (Fig. 9) son R, K, L y S, siendo el factor LS el que tiene mayor peso en una región donde ocurre la misma intensidad de precipitación y existe un solo tipo de suelo. Para calcular la erosión potencial se considera al factor C = 1 y al factor P = 1. En la figura 9 se muestra la distribución de la erosión potencial clasificada en cinco clases y expresadas en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La máxima tasa de erosión potencial alcanza un valor de $38,306.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

5.2.3 TASA DE EROSIÓN ACTUAL

La tasa de erosión actual (Fig. 10) considera todos los factores de la EUPS y son evaluados en base a las condiciones actuales del área de estudio. La figura 10 muestra la distribución de la tasa de erosión actual en cinco clases (Nula, Ligera, Moderada, Alta y Muy Alta). La tasa máxima de erosión actual es de $28,344.00 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Las cinco clases de erosión (Fig. 9 y Fig. 10) se agrupan en tres niveles de estabilidad geodinámica: estable, peneestable, e inestable. El medio geodinámico estable muestra un erosión nula donde la pedogénesis domina sobre la morfogénesis, es decir que la formación de suelo domina sobre la erosión y cubre aproximadamente el 22.2 % del área estudiada. El medio geodinámico peneestable tiene una tasa de erosión igual o mayor a la tasa de tolerancia ($0.4 \text{ a } 1.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y corresponde a las clases de erosión ligera a moderada y cubre el 49.6 % de la superficie estudiada. El medio geodinámico inestable se presenta en áreas donde la morfogénesis (erosión) domina sobre la pedogénesis (formación de suelo) y corresponde a las clases de erosión alta a muy alta y cubre el 28.2 % del área estudiada.

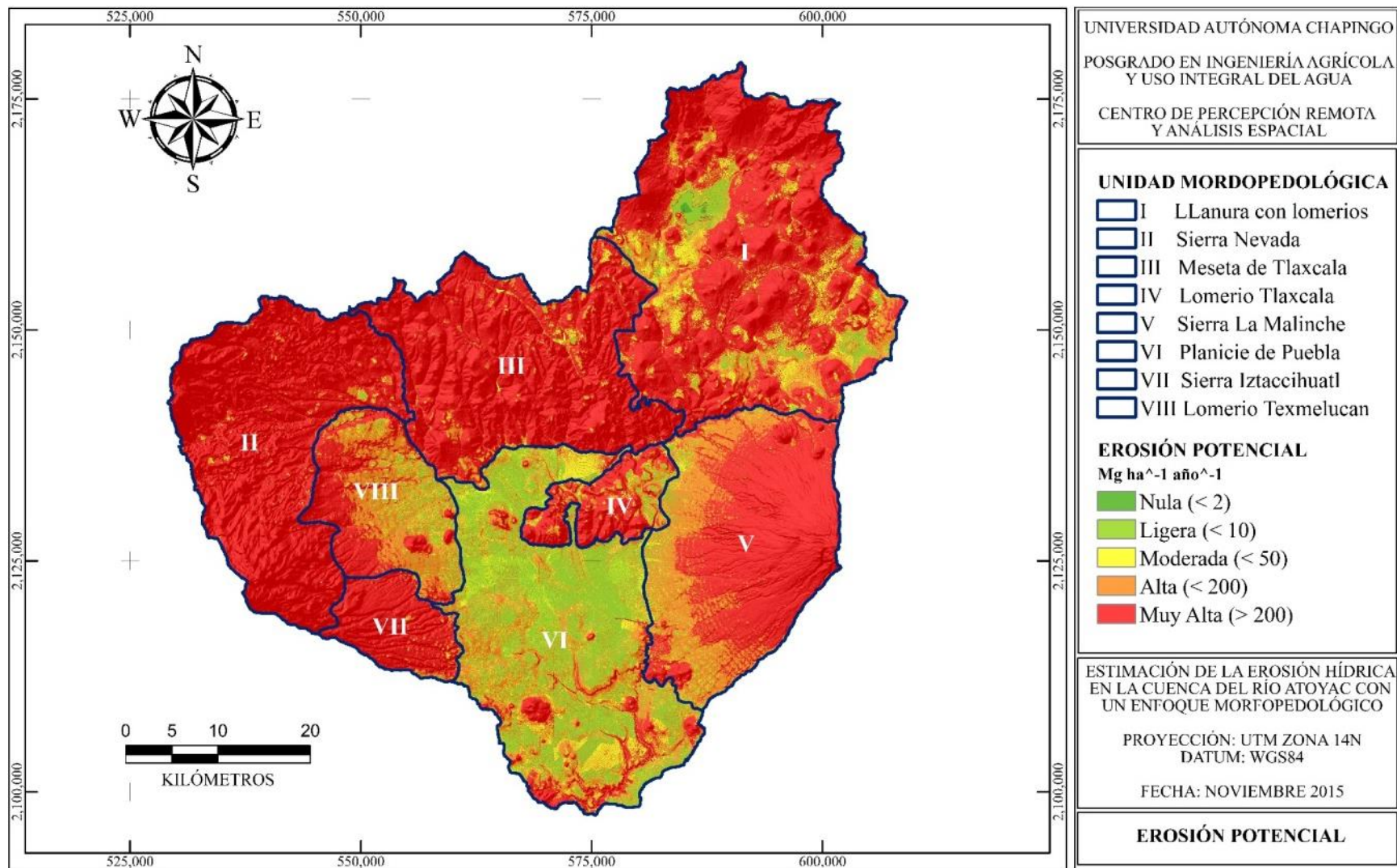


Figura 9. Erosión potencial.

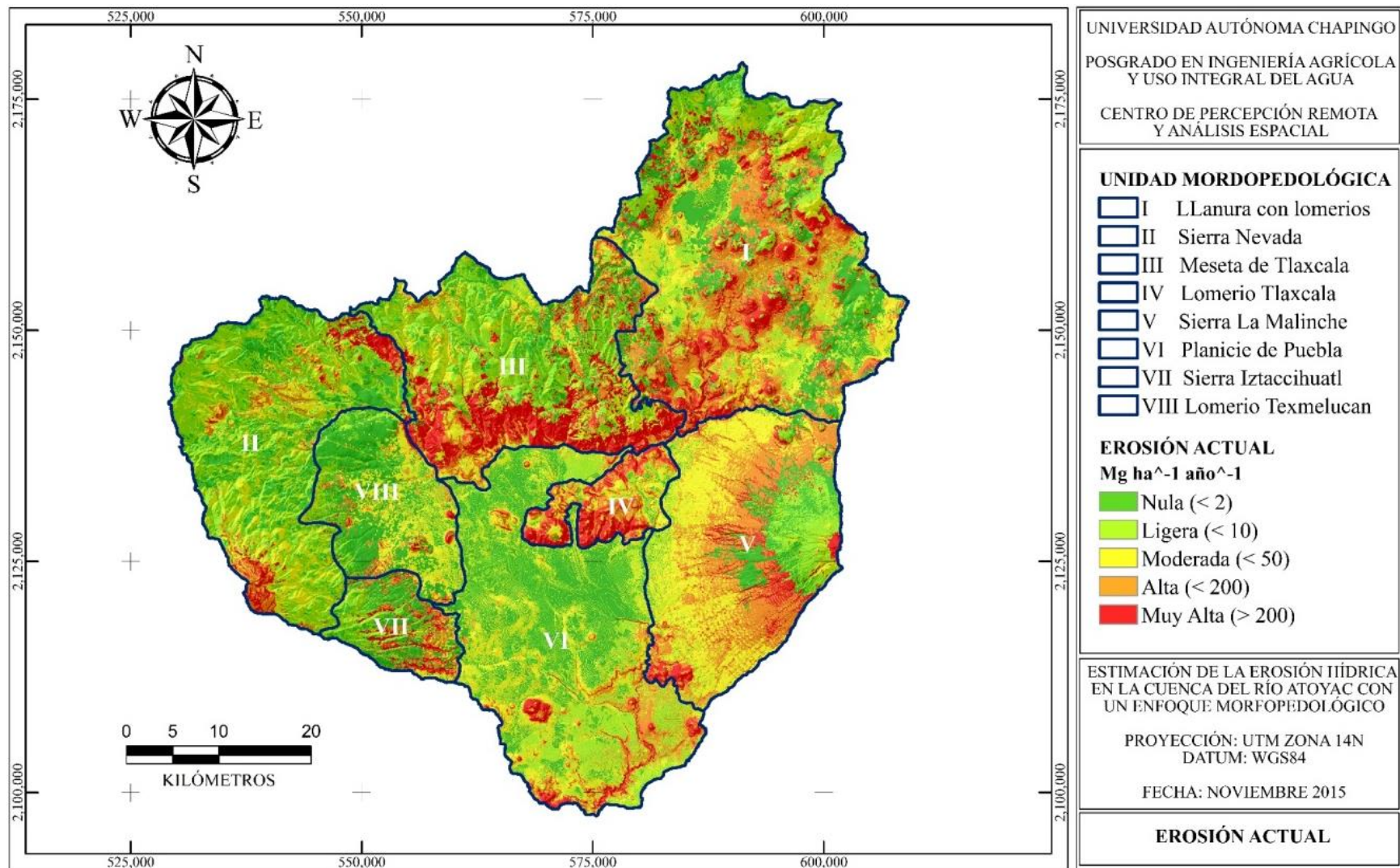


Figura 10. Erosión actual.

El cuadro 13 muestra el porcentaje de superficie erosionada por clase de erosión actual y unidad morfopedológica. Las unidades morfopedológicas IV y V son las más erosionadas ya que solo el 12 y 26 % de su superficie presentan un grado de erosión nula a ligera respectivamente. Las unidades morfopedológicas II, VII y VIII presentan erosión moderada a muy alta en menos del 40% de su superficie por lo que estas unidades morfopedológicas son las menos erosionadas.

Cuadro 13. Superficie erosionada por clase de erosión y unidad morfopedológica en porcentaje.

CLASE DE EROSIÓN	UNIDAD MORFOPEDOLOGICA							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
NULA	20.3	20.0	13.5	4.7	12.1	32.4	34.3	47.4
LIGERA	20.4	48.2	32.2	7.3	13.9	25.6	26.8	15.4
MODERADA	19.3	20.2	18.1	24.0	35.2	28.9	10.2	27.5
ALTA	25.8	6.6	12.3	31.2	29.7	9.8	13.8	6.9
MUY ALTA	14.2	5.0	23.9	32.8	9.1	3.3	14.8	2.8

La matriz de correlación (Cuadro 14) entre la erosión potencial (EP), erosión actual (EA), coeficiente de masividad y coeficiente orográfico en toda la subcuenca del río Atoyac indica una alta correlación (0.86) entre el coeficiente de masividad y la erosión potencial cuando no exista vegetación y prácticas de conservación de suelo.

Cuadro 14. Matriz de correlación.

MATRIZ DE CORRELACIÓN					
Variable	EP	EA	CM	CO	P
EP	1.00	0.31	0.86	0.44	0.86
EA		1.00	0.29	0.16	0.29
CM			1.00	0.70	1.00
CO				1.00	0.70
P					1.00

Las matrices de correlación entre la erosión actual y potencial, y los parámetros de forma de cada unidad morfopedológica (coeficiente de masividad y coeficiente orográfico) se muestran en el cuadro 15. Se observa que en todas las unidades morfopedológicas existe una buena correlación entre el coeficiente de masividad y la erosión potencial (0.83 a 0.94), excepto en la unidad morfopedológica VI que presenta una correlación moderada (0.55) debido a las prácticas agronómicas de conservación de suelos. Es importante notar que no existe una buena correlación entre las unidades morfopedológicas y la erosión actual con la excepción de la unidad morfopedológica IV debido al efecto de las prácticas y manejo de conservación de suelos tanto en áreas agrícolas como área no agrícolas.

Cuadro 15. Matrices de correlación para cada unidad morfopedológica.

MATRICES DE CORRELACIÓN									
UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA I					UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA II				
Factor	EP	EA	CM	CO	Factor	EP	EA	CM	CO
EP	1	0.2	0.91	0.8	EP	1	0.1	0.86	0.77
EA		1	0.22	0.11	EA		1	0.11	0.1
CM			1	0.88	CM			1	0.93
CO				1	CO				1
UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA III					UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA IV				
Factor	EP	EA	CM	CO	Factor	EP	EA	CM	CO
EP	1	0.31	0.86	0.44	EP	1	0.94	0.86	0.8
EA		1	0.29	0.16	EA		1	0.81	0.78
CM			1	0.7	CM			1	0.89
CO				1	CO				1

Cuadro 15. Continuación.

UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA V					UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA VI				
Factor	EP	EA	CM	CO	Factor	EP	EA	CM	CO
EP	1	0.33	0.83	0.37	EP	1	0.96	0.55	0.25
EA		1	0.33	0.17	EA		1	0.56	0.26
CM			1	0.74	CM			1	0.87
CO				1	CO				1

UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA VII					UNIDAD MORFOPEDOLÓGICA VIII				
Factor	EP	EA	CM	CO	Factor	EP	EA	CM	CO
EP	1	0.42	0.94	0.89	EP	1	0.29	0.84	0.58
EA		1	0.45	0.42	EA		1	0.37	0.33
CM			1	0.95	CM			1	0.76
CO				1	CO				1

La figura 11 muestra muy claramente que el grado de estabilidad geodinámica, es decir, el riesgo de la morfogénesis o erosión esta mayormente condicionado por la cobertura vegetal seguida por las prácticas de conservación de suelo. También se puede observar que el impacto del factor C (cobertura vegetal) y P (prácticas de conservación de suelo) representa el 53 % de la erosión en áreas con clase de erosión alta a muy alta.

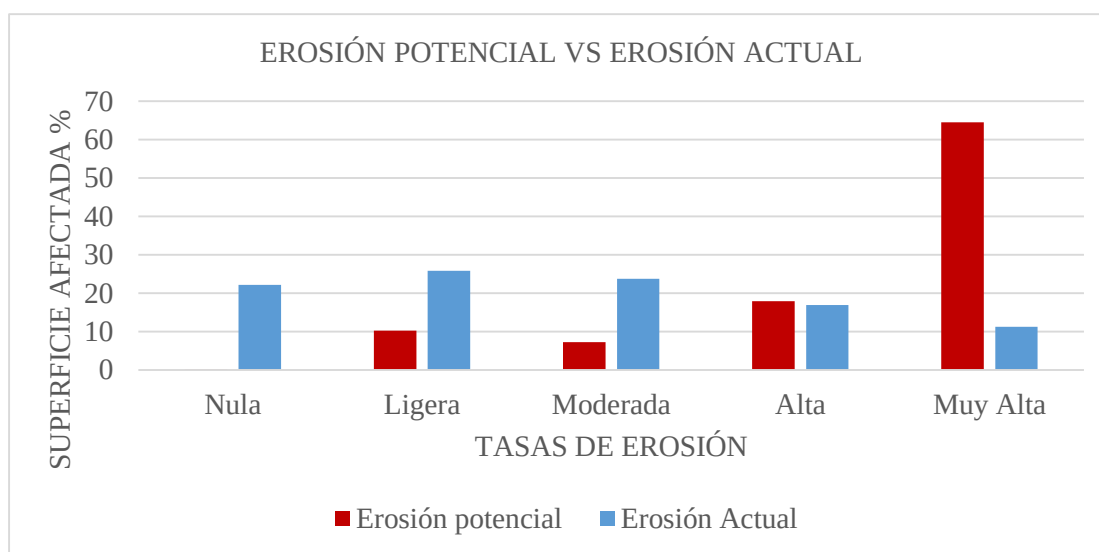


Figura 11. Superficie afectada por clase de erosión.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos permiten identificar las zonas de mayor riesgo de erosión y obtener una visión global de su distribución espacial. La mayoría del área de estudio presenta una erosión moderada a muy alta desde un 30 hasta 88 % de la superficie de cada unidad morfopedológica. La matriz de correlación entre la erosión potencial y los parámetros de forma de las unidades morfopedológicas muestra una buena correlación entre el coeficiente de masividad y la erosión potencial (0.83 a 0.94), y baja correlación (0.28) con la erosión actual debido a la correcta aplicación de las prácticas de conservación de suelo y reforestación. Los datos anteriores muestran que el método óptimo para estimar la pérdida de suelo debe ser basado en un enfoque morfopedológico, es decir que es recomendable subdividir el área de estudio (tal como cuencas o subcuencas) en unidades homogéneas desde el punto de vista morfopedológico y evaluar la pérdida de suelo en cada una de ellas utilizando la EUPS o una modificación de ella.

7. BIBLIOGRAFIA

- Beckett, P.H. T. 1965. Terrain classification and evaluation using air photography. A review of recent work at OXFORD Photogrammetry, 26(1970). Pp. 51-75.
- Bursztynsky T. A., S. J. Goldman, K Jackson. 1986. Erosion and sediment control handbook. New York: McGraw-Hill.
- Cortez T., H. G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de postgraduados, Montecillos, Mex. 168 pag.
- Duran V., H., R. Rodríguez C., R. Francia J. 2014. Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. Ecosistemas 23: 66-72.
- FAO. 1980. Metodología provisional para evaluar la degradación del suelo. FAO/PNUMA. Roma. 86p
- FAO. 2015. Erosión de suelos en América Latina.
- Figuerola S., B., A. Amante O., H. Cortes T., J. Pimentel L., E. Osuna C., J. Rodríguez O., F. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados, México.
- Figuerola, S., B., A. Amante O., H. G. Cortés T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O., F. J. y F. Morales (1991), Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Colegio de Postgraduados–CREZAS, San Luis Potosí, México.
- Foster G.R. and W.H. Wischmeier. (1974). Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Trans, ASAE 17:305-309

- Foster, G. R., L.D. Meyer, C. A. Onstad. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Trans. ASAE. 20: (4): 683-687.
- Gaspari F., J., I. Delgado M., A. Denegri G. 2009. Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. Terra Latinoamericana 27: 43-51.
- Guerrero P., A., M. Hoyos C., E. Reyes V., L. Sánchez T., Y. S. Cruz V., R. Santillán A. 2013. Impacto ambiental generado por erosión costera en la zona litoral de Buenos Aires Norte, distrito de Víctor Larco Herrera, La Libertad, Perú. REBIOL 33: 11-22.
- Huerta F., P., O. Loli F. 2014. Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche. Ecología Aplicada 13: 15-22
- Leon P., J. D. 2001. Estudio y control de la erosion. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Medellín. ISBN 9589352278.
- McCool, D. K., G. R. Foster, C. K. Mutchler, L. D. Meyer. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE. (In Press).
- Mejía J., F. Dal P., P. Montilla, G. Torres. 2010. Evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, estado Mérida-Venezuela. Geográfica Venezolana 51: 203-223
- Mitchell, J. K., G. D. Bubenzer. 1984. Estimación de la pérdida del suelo. Erosión de suelos (Eds. M. J. Kirkby y R.P.C. Morgan). Mexico: Limusa. 35-88 pp.
- Pérez N., S., J. L. Arellano M., L. A. Ibáñez C., F. R. Hernández S. 2012. Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. Terra Latinoamericana 30: 103-110.

- Renard, K.G., G. R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703.
- Renard, K., G. R. Foster, G. A. Weesies, J. P. Porter. (1991) RUSLE Revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 46, 30-33.
- Rivera T., F., S. Pérez N., L. A. Ibáñez C., F. R. Hernández S. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Agrociencia 46: 101-105.
- Segundo R., F.M. 2009. Impacto del cambio climático en la erosión mediante un modelo hidrológico de pérdida de suelo. Caso pico de Orizaba. Tesis de maestría en Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral de Agua, Chapingo, Mex.
- SMN. 2015. Normales climatológicas
- Tricart, J y J. Killian. 1982. La ecogeografía y la ordenación del medio natural. Ed. Anagrama. Barcelona, España. 240-253pp.
- Vásquez A., M. Tapia M. 2011. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. Ingeniería UC 18: 42-50.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of soil and water conservation 26:189-193.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. Washington: USDA.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedologia. Enschede, The Netherlands. ISBN:9061643392.