



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE DOS MÉTODOS DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (EUPS) EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO, TEXCOCO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN CIENCIAS
AMBIENTALES

P R E S E N T A:

AMÉRICA PEDRAZA VILLAFANA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SALVADOR ADAME MARTÍNEZ

Toluca de Lerdo, junio de 2015

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
Hipótesis.....	4
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE EL SUELO, SU DEGRADACIÓN Y LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (EUPS).....	5
1.1 Suelo.....	5
1.1.1 Componentes del suelo	7
1.1.2 Importancia del recurso suelo.....	9
1.1.2 Factores de formación de suelos	9
1.2 Degradación de suelos	10
Tipos de degradación de suelos	12
1.3 Erosión de suelos y clases de erosión.....	15
1.3.1 Clases de erosión	16
1.3.2 Agentes de la erosión.....	17
1.3.3 Erosión hídrica.....	18
1.3.4 Formas de erosión hídrica	19
1.4 Pérdida tolerable de suelo.....	22
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA SOBRE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO	24
2.1 Antecedentes de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	24
2.2 Limitaciones de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).....	29
2.3 Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos	30

2.3.1 Factor R o erosividad de la lluvia.....	31
2.3.2 Factor K o erodabilidad del suelo.....	35
2.3.3 Factor <i>LS</i> o longitud de pendiente.....	39
2.3.4 Factor C o factor de manejo o cobertura vegetal.....	40
2.4 Estudios sobre la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)	42
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA CHAPINGO.....	48
3.1 Localización geográfica.....	49
3.2 Clima	51
3.3 Suelos	54
3.4 Geología	57
3.5 Regionalización fisiográfica.....	59
3.6 Hidrología.....	61
3.7 Hidrología subterránea	61
3.8 Uso del suelo y vegetación	64
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA EROSIÓN POTENCIAL Y ACTUAL EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO	68
4.1. Determinación de la erosión potencial y actual a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	68
4.1.1 Cálculo del factor de erosividad (<i>R</i>).....	69
4.1.2 Cálculo del factor de erosionabilidad del suelo (<i>K</i>)	70
4.1.3 Cálculo del factor de longitud y grado de la pendiente (<i>LS</i>)	72
4.1.4 Cálculo del factor cobertura vegetal (<i>C</i>).....	75
4.1.5 Determinación de la erosión potencial y actual de pérdida de suelo.....	78
4.2 Determinación de la erosión por el método de SAGARPA.	79
4.2.1 Estimación indirecta del factor de longitud y grado de pendiente (<i>LS</i>).....	79
4.3 Erosión media ponderada y tasa de aporte de sedimentos.....	81
4.3.1. Tasa de aporte de sedimentos	81

CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
5.1 Método de FAO para calcular la EUPS.....	83
5.1.1 Factor R o erosividad de la lluvia.....	83
5.1.2 Factor K o erodabilidad del suelo.....	87
5.1.3 Factor <i>LS</i> longitud y grado de la pendiente.....	87
5.1.4 Factor <i>C</i> cobertura vegetal.....	90
5.1.5 Erosión potencial y actual de la cuenca del río Chapingo.....	93
5.2. Determinación de erosión por el método de Sagarpa.....	97
5.3 Erosión media ponderada y tasa de entrega de sedimentos.....	100
CONCLUSIONES.....	103
RECOMENDACIONES.....	105
Glosario	109
BIBLIOGRAFÍA	110

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales autores que contribuyeron a la ecuación universal de pérdida de suelo.....	28
Cuadro 2. Períodos convencionales en el ciclo de cultivo para el cálculo del factor C	42
Cuadro 3. Precipitación anual en la cuenca de acuerdo a estaciones climatológicas.....	54
Cuadro 4. Principales elevaciones circundantes a la cuenca del río Chapingo.....	60
Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación.....	65
Cuadro 6. Valores asignados a R.....	71

Cuadro 7. Valores numéricos de las categorías de erosionabilidad por unidad de suelo.....	72
Cuadro 8. Valor textural y coeficiente.....	73
Cuadro 9. Clasificación de las unidades de suelo FAO/UNESCO en tres clases de erosionabilidad.....	73
Cuadro 10. Valores del grado de pendiente.....	75
Cuadro 11. Valores del exponente m para el cálculo del factor L	76
Cuadro 12. Resultados del factor S de acuerdo al grado de pendiente.....	76
Cuadro 13. Períodos convencionales en el ciclo de cultivo para el cálculo del factor C	78
Cuadro 14. Valores de factor de cobertura vegetal (C).....	79
Cuadro 15. Rangos propuestos por FAO para la cartografía del estado actual y potencial	80
Cuadro 16. Valores para establecer estrategias de conservación de acuerdo a RK	83
Cuadro 17. Efecto del área de la cuenca en la tasa de entrega de sedimentos.....	84
Cuadro 18. Estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención del factor R	85
Cuadro 19. Resultados de erosividad para cada una de las estaciones climatológicas.....	87
Cuadro 20. Cobertura y usos de suelo en la cuenca del río Chapingo.....	92
Cuadro 21. Valores de C para cada uso y cobertura.....	93
Cuadro 22. Clases de erosión potencial en la cuenca del río Chapingo.....	95
Cuadro 23. Clases de erosión actual en la cuenca del río Chapingo.....	96
Cuadro 24. Valores mayores y menores a la unidad ($8T$).....	99
Cuadro 25 Erosión media ponderada.....	105

Cuadro 26. Producción de sedimentos en la cuenca Chapingo.....	106
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del suelo.....	8
Figura 2. Principales causas Ambientales y socio-económicas de la degradación de suelos.....	12
Figura 3. Tipos de degradación de suelos.....	13
Figura 4. Mecanismos responsables de la erosión.....	17
Figura 5. Proceso de erosión hídrica.....	18
Figura 6. Erosividad de la República Mexicana.....	35
Figura 7. Nomograma para determinar el factor de erosionabilidad del suelo, K.....	38
Figura 8. Mapa de localización de la cuenca del río Chapingo.....	51
Figura 9. Mapa de climas de la cuenca del río Chapingo.....	53
Figura 10. Climograma de la cuenca.....	55
Figura 11. Mapa de edafología de la cuenca del río Chapingo.....	57
Figura 12. Mapa de geología de la cuenca del río Chapingo.....	59
Figura 13. Topoformas de la zona de estudio.....	61
Figura 14. Perfil de elevaciones de la cuenca del río Chapingo.....	62
Figura 15. Mapa de hidrología de la cuenca del río Chapingo.....	64
Figura 16. Mapa de uso de suelo.....	66
Figura 17. Mapa de vegetación.....	69
Figura 18. Plano de localización de las estaciones climatológicas.....	86
Figura 19. Mapa de erosividad de la lluvia.....	88

Figura 20. Mapa de erodabilidad del suelo.....	90
Figura 21. Mapa de longitud y grado de pendiente.....	91
Figura 22. Mapa de cobertura vegetal.....	94
Figura 23. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Chapingo.....	97
Figura 24. Erosión actual en la cuenca del río Chapingo.....	98
Figura 25. Mapa de <i>LS</i> de la zona de estudio.....	101
Figura 26. Gráfica de la producción de sedimentos en el río Chapingo (1979-1990).....	104

INTRODUCCIÓN

El río Chapingo pertenece a la vertiente oriental del Valle de México o Cuenca del Ex lago de Texcoco. Esta zona es y ha sido desde el punto de vista político y económico, la más importante de México y Mesoamérica, lo que ha provocado que sea una de las zonas más pobladas del mundo, esto conlleva a que se presenten múltiples problemas de derivados de la interacción no equilibrada entre los recursos naturales y el hombre (Llerena *et al.*; 1989).

La erosión hídrica no es un problema ajeno a la cuenca del río Chapingo ya que antes de los trabajos de la Ex – Comisión del Lago de Texcoco, la cuenca presentaba serios problemas ambientales y cuyos efectos se manifestaban tanto dentro como fuera de ella. Por un lado, existía serios problemas de pérdida de suelo, sobre todo en el piedemonte de las montañas, a tal grado de que se tenía expuesto el tepetate y derivado de ello la formación de cárcavas de diverso tamaño.

Posteriormente, la Ex-Comisión del Lago de Texcoco, hoy Gerencia del lago de Texcoco dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CNA) llevó a cabo un programa de manejo integral de la Vertiente Oriental de la Cuenca de México, de la cual forma parte la cuenca del río Chapingo. Es por ello que surgió la inquietud de determinar la pérdida de suelo para evaluar sus efectos.

Por lo tanto, con el objetivo de estimar la erosión hídrica en la cuenca del río Chapingo, en este trabajo se implementó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), la cual fue desarrollada por Wischmeier y Smith en 1956. Esta ecuación fue modificada por FAO (1980) y posteriormente el Colegio de Postgraduados adaptó la ecuación para que fuera aplicada en México. Es a partir de 1992 que la entonces extinta Dirección de Política Agrícola de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGARPA) adopta la ecuación para definir terrenos altamente erosionables en México.

Por último este trabajo tiene un doble propósito, por un lado conocer la pérdida de suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos y por otro comparar dos metodologías alternativas para la obtención de dicha ecuación. Además de proponer estrategias de conservación del suelo en la cuenca del río Chapingo, México.

JUSTIFICACIÓN

El suelo es un recurso natural con una importancia ambiental infinita, pues nos provee la base para el desarrollo de la vida, desde los estratos más bajos de la pirámide ecológica que son las plantas (ya que el suelo provee la humedad y el soporte para que se desarrollen los organismos) hasta el desarrollo de los depredadores, donde entra el hombre. A pesar de éstas y más consideraciones sobre la importancia del suelo, el uso inadecuado de éste es muy común, principalmente en México que se ve más vulnerable a la erosión, por sus características geográficas.

Es decir, el país se caracteriza por poseer un relieve accidentado en buena parte del territorio nacional, se presentan lluvias intensas, además de los tipos de suelo, ya que unos son más erosionables que otros. A estas condiciones físicas y naturales se le suman las presiones antropogénicas como cambios de uso de suelo, deforestación, entre otras, generando con ello problemas de erosión de suelos.

Según la SEMARNAT (2003) uno de los problemas ambientales más importantes en México es la erosión y dentro ella la erosión hídrica ha afectado más del 40% del territorio nacional provocando la pérdida de la capa superficial del suelo y por ende pérdida de su fertilidad y productividad, además de otros impactos negativos fuera del sitio.

Condiciones geográficas y condiciones sociales similares al país presenta la cuenca del río Chapingo. Cabe mencionar que antes de 1977 la cuenca descargaba sus aguas directamente en la parte plana de la zona del Lago de Texcoco y la parte del piedemonte se encontraba problemas fuertes de deforestación y de erosión hídrica de suelos, entre otros.

Por lo anterior, la extinta Comisión del Lago de Texcoco implementó un programa de manejo integral de cuencas: Sin embargo, aún no se conoce si el grado de erosión de suelos ha disminuido desde entonces, por ello uno de los propósitos de este estudio es conocer el nivel de erosión hídrica actual.

La cuenca del río Chapingo se localizada cerca de la ciudad de Texcoco, en el oriente del estado de México. La parte alta de la cuenca forma parte de la denominada Sierra Nevada y la cubierta vegetal es bosque, en la parte media también hay bosque y

agricultura de temporal, en la parte baja hay agricultura de temporal y de riego. Cabe mencionar que desde hace un par de décadas, en la parte baja, se ha presentado un crecimiento importante del área urbana y por lo tanto ha habido presión sobre sus recursos naturales.

Luego entonces es necesario el conocer el estado de la erosión hídrica en la cuenca a fin de dar una serie de recomendaciones de conservación del suelo y agua con la finalidad de controlar las pérdidas de suelos a límites permisibles y así evitar su degradación.

La degradación del suelo por erosión hídrica es un tema pertinente y actual dentro de las ciencias ambientales. Ya que es el hombre el que hace uso, en este caso del suelo a través de las actividades agrícolas, y es una manifestación de la relación sociedad-naturaleza. Y es precisamente esta relación en que se fundamentan las ciencias ambientales como disciplina científica. Además que le compete proponer y emplear metodologías y técnicas para dar soluciones de conservación y restauración de los recursos naturales, suelo, así como buscar su sostenibilidad.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), al igual que muchos otros métodos, representa una metodología adecuada para estimar los niveles de erosión hídrica potencial y actual. La EUPS es una herramienta de planeación del suelo y que permite proponer una serie de obras y prácticas de conservación del suelo y agua.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Determinar los niveles de **erosión hídrica potencial** y actual, a través de dos métodos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (FAO y SAGARPA), que se presenta en la cuenca del río Chapingo, México.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización geográfica de la cuenca del río Chapingo.
- Calcular la erosión potencial y actual de la zona de estudio por el método de la FAO.
- Estimar la erosión hídrica por el método de SAGARPA.
- Determinar la tasa de entrega de sedimentos de la cuenca del río Chapingo.
- Generar propuestas basadas en los niveles de **erosión hídrica actual**, que permitan controlar los niveles de erosión hídrica en la zona aledaña a la cuenca

Hipótesis

Debido a los métodos empleados para el cálculo de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por FAO y SAGARPA, los resultados de pérdida de suelo difieren significativamente entre ellos.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE EL SUELO, SU DEGRADACIÓN Y LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (EUPS)

En el presente capítulo se abordan conceptos relacionados con la **erosión** de suelos, las principales causas y tipos de degradación, el papel de los factores erosivos y las formas de erosión hídrica, así mismo se analizan los conceptos referentes a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, metodologías y antecedentes del tal forma que se identifique como se establece la relación entre erosión de suelos y los factores erosivos.

1.1 Suelo

La palabra suelo proviene del latín “*Solum*” que significa suelo, tierra o parcela.

El suelo es definido como un cuerpo natural tridimensional, constituido por materia orgánica, minerales, agua, aire y organismos. Indispensable recurso natural no renovable ya que ofrece el soporte para el desarrollo de los seres vivos.

De acuerdo con Ortiz (1981) el suelo puede definirse desde el punto de vista técnico como:

Un cuerpo natural que se encuentra sobre la superficie de la corteza terrestre, conteniendo materia viva y soportando o siendo capaz de soportar plantas

A menudo el suelo es definido como la capa superficial de la corteza terrestre de poco espesor y donde se desarrollan las plantas y raíces; no obstante el concepto de suelo abarca mucho más que eso, tal como lo menciona Patrick (1996) esta visión resulta limitada ya que solo está enfocada a la productividad del suelo, por lo tanto es necesario considerar al suelo como un fenómeno natural y parte del ambiente.

Por otro lado también es importante considerar al suelo desde el punto de vista de su productividad o para el fin o uso que se le da por parte de los agricultores, por ello la importancia de la definición de suelo como la capa superficial de la tierra donde se desarrollan las raíces de las plantas. Es conocido como la capa arable o la capa vegetal (Heano, 2006).

Inicialmente durante el siglo XIX la importancia del estudio de los suelos estaba enfocado hacia la producción de fibras y granos por ello durante muchos años los

estudios de los suelos se centraron en poner en claro la formación de suelos (factores y procesos) y en aquellos aspectos relacionados con la agronomía (Porta, 2005), he aquí la importancia desde el punto de vista productivo.

De acuerdo a Porta (2005), en relación al párrafo anterior, a principios del siglo XX surgió la necesidad de considerar al suelo desde el punto de vista complejo y dinámico resaltando sus funciones dentro de los ecosistemas y otras funciones relacionadas con actividades humanas:

Funciones ecológicas

- Producción de biomasa (suministro de nutrientes, aire y agua, y soporte para las raíces de las plantas), proporcionando alimentos, energía renovable, materias primas y rasgos naturales (las masas forestales proporcionan un hábitat importante para muchas especies).
- Funciones de filtrado, tampón, almacenamiento y transformación. Estas funciones tienen gran importancia en relación de los contaminantes. Así, por ejemplo, el poder tampón del suelo permite que esta resista los procesos de acidificación o se recupere de ellos. También indica la capacidad de un suelo para absorber agroquímicos, para admitir purines como nutrientes o sustancias que deriven de vertidos o deposiciones atmosféricas.
- Hábitat biológico o reserva de genes: el conocimiento sobre la microbiología del suelo permite entender y cuantificar una serie de procesos que tienen lugar en el suelo. La flora y la fauna del suelo son mucho menos aparentes que las que están encima del suelo, pero su papel resulta fundamental para el ciclo de muchos elementos y para la vida de las plantas.

Funciones relacionadas con las actividades humanas

- Medio físico: funciones de los suelos como espacio sobre infraestructuras técnicas e industriales y actividades socioeconómicas: construcciones, vías de comunicación, campos de deportes, áreas recreativas, vertido de escombros y basuras, etc.
- Fuentes de materias primas: gravas, arena yeso, agua y minerales.
- Herencia geogénica y cultural: los suelos forman parte de un paisaje en el que pudo haber asentamientos humanos.

1.1.1 Componentes del suelo

Ortiz y Ortiz (1990) mencionan que el suelo es considerado como un recurso natural constituido por una mezcla de material mineral, materia orgánica, agua y aire. El porcentaje que ocupa cada uno de estos componentes en condiciones ideales para el desarrollo de la vegetación, en un suelo superficial con textura franca aproximadamente es el siguiente:

Material mineral: 45%

Materia orgánica: 5%

Agua: 25%

Aire 25%

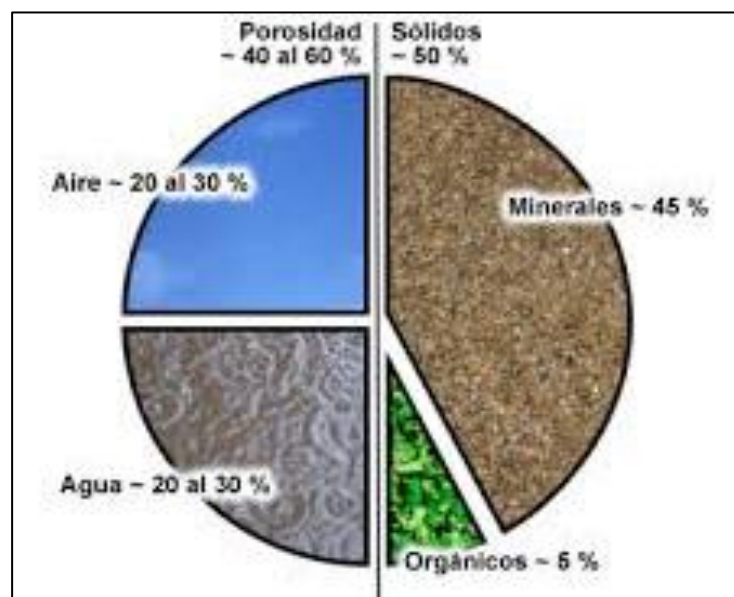
Así mismo sostienen que las proporciones de estos componentes varían de tiempo en tiempo y de lugar a lugar. El volumen de agua y aire componen una relación directamente proporcional uno con el otro. La entrada del agua al suelo excluye al aire. Al ser removida el aguas por el drenaje, la evaporación o por las plantas en desarrollo, el espacio poroso llega a ocuparse con el aire. El subsuelo se caracteriza generalmente por contener menos materia orgánica que el suelo superficial. Un suelo orgánico como los humíferos o turbosos tienen un mayor volumen ocupado por materia orgánica que por materia mineral.

Por otro lado, Porta (1999) dice que para estudiar mejor al suelo es necesario hacer perfiles de suelo. Un **perfil de suelo** es un corte vertical del terreno, que permite estudiar el suelo en su conjunto desde su superficie hasta el material original. A su vez el perfil de suelo está constituido por diferentes capas denominadas horizontes, las cuales se diferencian unas de otras por propiedades como color, estructura, textura y características físicas y químicas.

El suelo es un sistema abierto, dinámico constituido por tres fases:

- **Fase sólida:** formada por componentes inorgánicos y los orgánicos, que dejan un espacio de huecos, (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hayan las fases líquida y gaseosa.
- **Fase líquida:** el volumen de huecos está ocupado parcialmente por agua, como componente principal de esta fase, que puede llevar iones y sustancias en solución o en suspensión.
- **Fase gaseosa:** esta fase la constituye el aire o la atmósfera del suelo, y por las raíces y organismos que viven en él (Porta, 1999).

Figura 1. Componentes del suelo



Fuente: www.meted.ucar.edu

1.1.2 Importancia del recurso suelo

El suelo es esencial para la vida, como lo es el aire y el agua, y cuando es utilizado de manera prudente puede ser considerado como un **recurso renovable**. Es un elemento de enlace entre los factores bióticos y abióticos y se le considera un hábitat para el desarrollo de la vegetación (productores primarios).

El suelo es un recurso natural, que en términos y tendencias actuales podemos nombrar prácticamente no renovable, que desempeña varias funciones y usos (Medina Ross, y otros, 2001):

- Actúa como regulador del ciclo del agua y los **ciclos biogeoquímicos**.
- Es el medio filtrante del agua que recarga los acuíferos y, por lo tanto, su capa de protección.
- Alberga una gran diversidad de organismos lo que implica que el suelo contiene importantes reservas genéticas.
- Es el espacio para actividades agrícolas, ganaderas, forestales y recreativas.
- Es la base para la construcción de obras civiles.
- Alberga parte de la riqueza cultural y es un documento de la historia del paisaje.

1.1.2 Factores de formación de suelos

De acuerdo a Porta y otros (1999), Jenny en 1941 señaló que la formación de suelos está en función de la siguiente ecuación:

$$S = f(m, cl, o, r, t)$$

El suelo (S) es una función de la acción conjunta de cinco factores (entre paréntesis se indica la categoría de actividad de cada factor):

1. Material parental (pasivo)
2. Clima (activo)
3. Organismos o biósfera (activo)
4. Relieve (pasivo)

5. Tiempo (neutro)

Sobre la superficie terrestre, el clima es el factor dominante en la formación de suelos (Ortiz y Ortiz, 1987) y mencionan que su mayor influencia está dada por la precipitación y temperatura. Algunos efectos directos del clima sobre la formación de suelos son:

- Acumulaciones de carbonatos de calcio en áreas de precipitación. El Calcio no es lavado por la insuficiente cantidad de agua.
- Suelos ácidos en áreas húmedas debido al intenso **intemperismo** y lavado.
- Erosión de suelos en pendientes pronunciadas.
- Depositación de materiales del suelo en las partes bajas.
- Mayor intensidad de intemperismo, lavado y erosión en las regiones húmedas y calientes que en las frías.

Como es de interés particular, en este tema se considera a la erosión de suelos en pendientes como efecto directo del factor clima específicamente por la lluvia.

1.2 Degradación de suelos

Según la SEMARNAT (2007) la degradación del suelo se refiere a los procesos inducidos por las actividades humanas que disminuyen su productividad biológica, así como su capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana. El último estudio que se tiene y con mayor resolución sobre la degradación de los suelos del país, fue en el año 2002, donde se señala que el 44.9% de superficie nacional mostraba algún grado de degradación, siendo la degradación química y la erosión hídrica los procesos más importantes con el 17.9% y 11.8%, respectivamente. Y añade que la pérdida de suelo por erosión hídrica afecta el 42.04% del territorio nacional, mientras que en 57.96% de la superficie nacional la pérdida es nula.

Matlock (1976), definió el proceso de degradación de la tierra como un proceso insidioso, cualquiera que sea su nombre, que puede ser expuesto como el efecto acumulativo de una serie de acciones, las cuales pueden o no ser evidentes en cada caso. Tres de estas acciones son: 1) reducción y finalmente desaparición de la vegetación; 2) mayor tasa de escurrimiento y menor infiltración de la precipitación; y 3) erosión creciente del suelo y consecuente, pérdida de fertilidad.

Para Hudson (1982), el término de degradación de suelos tiene que ver con una reducción de su capacidad para producir cosechas. Tal degradación puede presentarse sin que exista remoción o desplazamiento del suelo.

Por su parte, la FAO (1984) señala que la degradación de suelos es la expresión general de los procesos económicos y sociales, así como los naturales e inducidos que disminuyen el equilibrio del suelo, la vegetación, el aire y el agua. Según éste organismo cuando la degradación de las propiedades de los suelos es continua, se llegará a la desertificación.

Otro concepto de degradación es relacionado con la desertificación, que de acuerdo a Anaya (1985), la desertificación es el proceso que incluye todas las formas de deterioro (económico y social) y de degradación (procesos naturales o inducidos, los cuales destruyen el equilibrio del suelo, vegetación aire y agua) de áreas sujetas a una fuerte aridez edáfica o una alta aridez climática.

La degradación se refiere a los procesos físicos y biológicos que disminuyen la utilidad de la tierra. Se define dentro de estos procesos: la erosión del suelo, pérdida de la vegetación, deterioro de la calidad del agua, sobre-explotación de acuíferos y salinización de suelos. (Australian Governmet, 1987.)

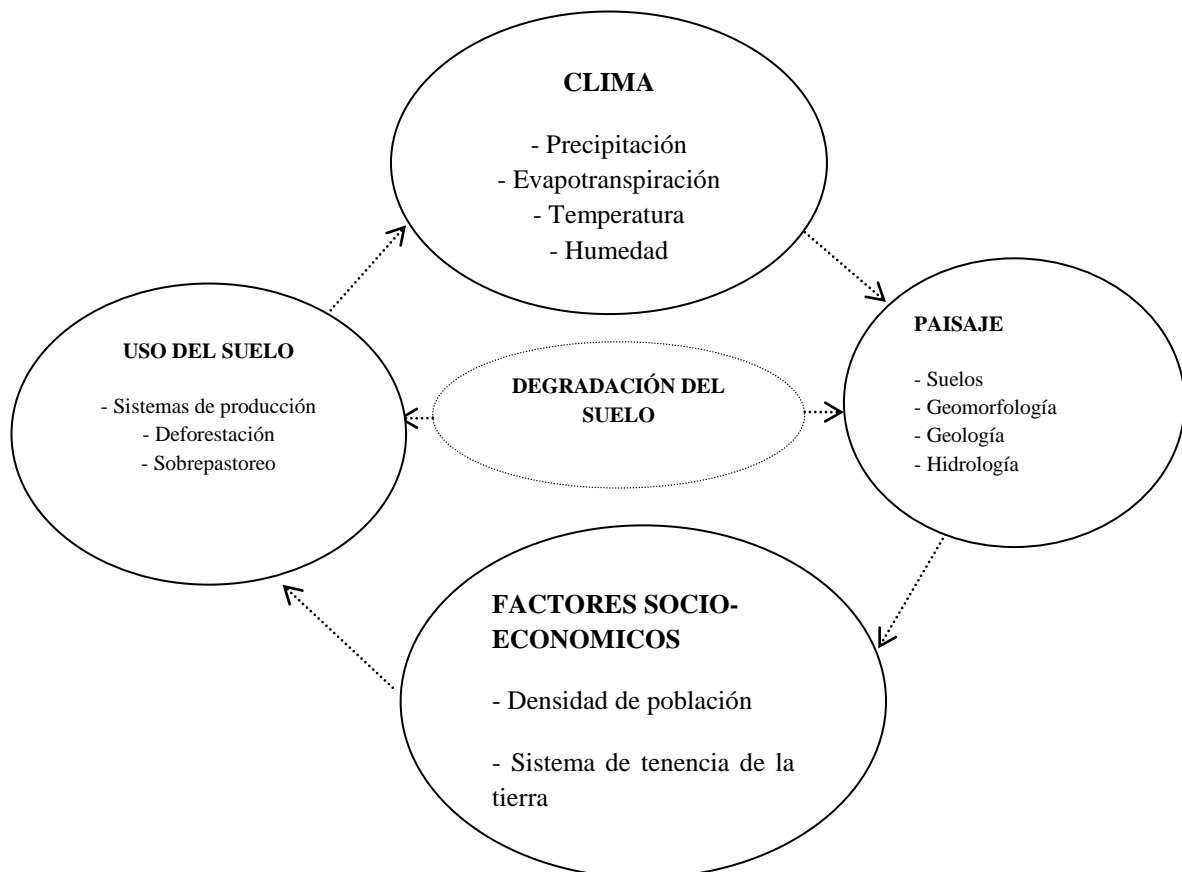
El ISRIC (1988), propuso la siguiente definición: La degradación de suelo es el proceso que describe el fenómeno inducido por el hombre, el cual disminuye la actual y/o futura capacidad de un suelo para soportar la vida humana.

Retomando a Porta (2005), la degradación de un suelo es la pérdida de utilidad actual o potencial, con lo que el suelo será capaz de realizar cada vez menos funciones que las que se podrían esperar de él, a medida que la degradación progresa. En lo que refiere a las propiedades intrínsecas del suelo, se puede definir a la degradación como una

disminución o pérdida de parámetros de calidad, como el espesor del epiedión por erosión; la pérdida de material fino en superficie, con aumento de la pedregosidad superficial; la pérdida de materia orgánica por erosión o por laboreo excesivo; la disminución de la conductividad hidráulica por compactación, entre otros.

Según el INE (2007) lo que resulta de los procesos causantes de la degradación y de aquellos que la contrarrestan, se conoce como degradación neta.

Figura 2. Principales causas Ambientales y socio-económicas de la degradación de suelos.



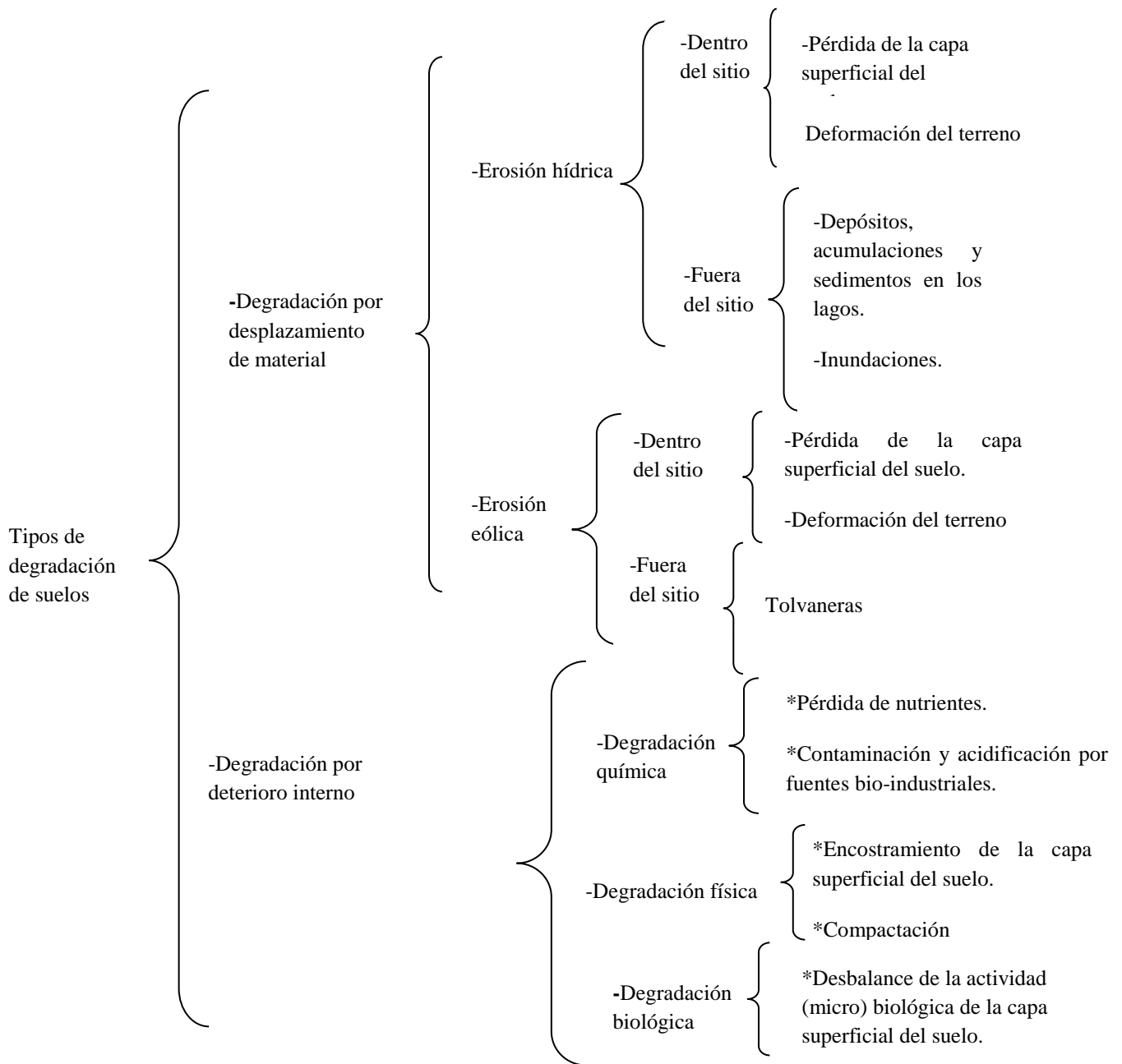
Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2007).

Tipos de degradación de suelos

Los tipos de degradación de suelos que se presente van a depender principalmente de las características físicas, químicas o biológicas del suelo además de las condiciones a

las que este sujeto, como el uso de suelo y vegetación. Así mismo, existen diferentes maneras de clasificar los tipos de degradación de suelos, dependiendo el criterio de cada autor. A continuación se presentan algunas clasificaciones retomadas de diferentes autores: Los tipos de degradación de suelos descritos por el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2007) son los siguientes:

Figura 3. Tipos de degradación de suelos



Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2007).

Como es de observarse en la Figura 3, el INE establece dos categorías de procesos de degradación de suelos causadas por el hombre, de las cuales, la primera categoría se refiere a la degradación por desplazamiento de material del suelo, en ésta, se pueden distinguir tanto efectos en el sitio, como afectaciones de áreas cercanas a éste (efectos en parcela), incluyendo los depósitos locales, y los efectos a distancias considerables al mismo.

La segunda categoría describe los tipos de degradación del suelo como resultado de su deterioro interno. Dentro de esta categoría se reconocen procesos químicos, físicos del suelo y/o las condiciones biológicas relativamente estables de sistemas agrícolas, en las que se maneja activamente la tierra para mantener su productividad.

Al igual que el INE (2007), la SEMARNAT (2003) también reconoce dos procesos de degradación de suelos:

- 1) El que implica el desplazamiento del material del suelo, que tiene como agente causal a la **erosión hídrica** y la eólica.
- 2) El que se refleja en un detrimento de la calidad del suelo, tal como la degradación química y biológica.

Por su parte, Andrés (2006), define a la degradación física, química y biológica de la siguiente manera:

- La degradación química se refiere a la disminución de la fertilidad, comprendiendo procesos tales como: el lavado, sodificación, acumulación de elementos tóxicos (contaminación), entre otros.
- La degradación física consiste fundamentalmente en la destrucción de la estructura del suelo, lo que ocasiona su compactación, sellado, acidificación, y la erosión del suelo. También trae consigo cambios diversos y adversos en sus propiedades físicas, en la porosidad y en la retención de agua.
- La degradación biológica es la provocada por procesos biológicos; de cuya alteración se desprende una disminución de la actividad y diversidad biológica. También se relaciona con el deterioro de la cubierta vegetal.

1.3 Erosión de suelos y clases de erosión

Uno de los principales problemas ambientales es la degradación de suelos por erosión y es provocada por la remoción de la cubierta vegetal, tala de árboles, cambios de usos de suelo, actividades agropecuarias, principalmente. Existen diversas definiciones de erosión de suelo, como se reporta a continuación:

La erosión es la acción de roer, gastar y provocar pérdidas de sustancias del relieve, originando una disminución del volumen, y este proceso está conformado por tres fases principales: la primera, es el desprendimiento de partículas; la segunda fase, se da por el transporte o desplazamiento de los materiales desgastados y por último la acumulación o depositación de los materiales transportados, en lagos, océanos o áreas continentales (Gregory y Walling, 1973).

Para la FAO (1977), la erosión es la pérdida selectiva de materiales del suelo. Por la acción del agua o del viento los materiales de las capas superficiales van siendo arrastrados. Si el agente es el agua se habla de erosión hídrica y para el caso del viento se denomina erosión eólica.

De acuerdo a Kirkby (1980), la erosión del suelo se define como la remoción del material superficial por acción del viento o del agua.

Para el CP (1982), la erosión es el proceso físico que consiste en el desprendimiento y arrastre de los materiales del suelo por los agentes del intemperismo.

Como se puede ver y aunque las definiciones no lo mencionan explícitamente, excepto la del CP (1982), la erosión de suelo es un proceso físico que inicia con el desprendimiento de las partículas del suelo, posteriormente estas partículas son transportadas, ya sea por el agua o por el viento, y finalmente depositadas fuera del sitio donde fueron desprendidas.

Por otro lado, la pérdida de suelo se expresa, habitualmente, en unidades de peso o volumen por unidad de superficie y tiempo (t/ha/año). En una revisión sobre la erosión en condiciones naturales, Young (1969) reporta valores de 0.0045 t/ha para áreas de relieve moderado y 0.45 t/ha para relieves escarpados. En cambio para tierras agrícolas estas cifras varían entre 45 y 450 t/ha. Teóricamente, se juzga la severidad de la pérdida

de suelo relacionándola con la velocidad de formación del suelo. Si propiedades del suelo como, el nivel de nutrientes, la textura y la profundidad, se mantienen inalteradas a través del tiempo, se considera que la tasa de erosión está equilibrada con la velocidad de formación del suelo. (Morgan, 1996).

1.3.1 Clases de erosión

Según Heano (2006) existen dos clases de erosión:

- La erosión geológica o natural y
- La erosión acelerada.

a) La erosión geológica o natural

Es aquella que se produce normalmente sin la acción del hombre y por lo tanto está fuera de su control. Es tan lenta que pasa inadvertida y contribuye en cierto modo a la misma formación del relieve y la meteorización de las rocas.

Actúan en este tipo de erosión el agua de las lluvias, las corrientes de los ríos, el mar, el viento, la temperatura y la gravedad.

Este tipo de erosión se sucede aun hoy en día en tierras muy jóvenes del planeta y no es perjudicial, es por el contrario benéfica, pues busca la estabilidad de la superficie y un equilibrio entre el suelo, la vegetación, los animales y el agua.

b) La erosión acelerada

La erosión acelerada, es la causada con la ayuda del hombre, quien al cultivar al suelo destruye la vegetación protectora y rompe el equilibrio que la naturaleza ha establecido entre la formación del suelo y la erosión natural, ayudando así a que la erosión adquiera velocidad y provoque grandes daños.

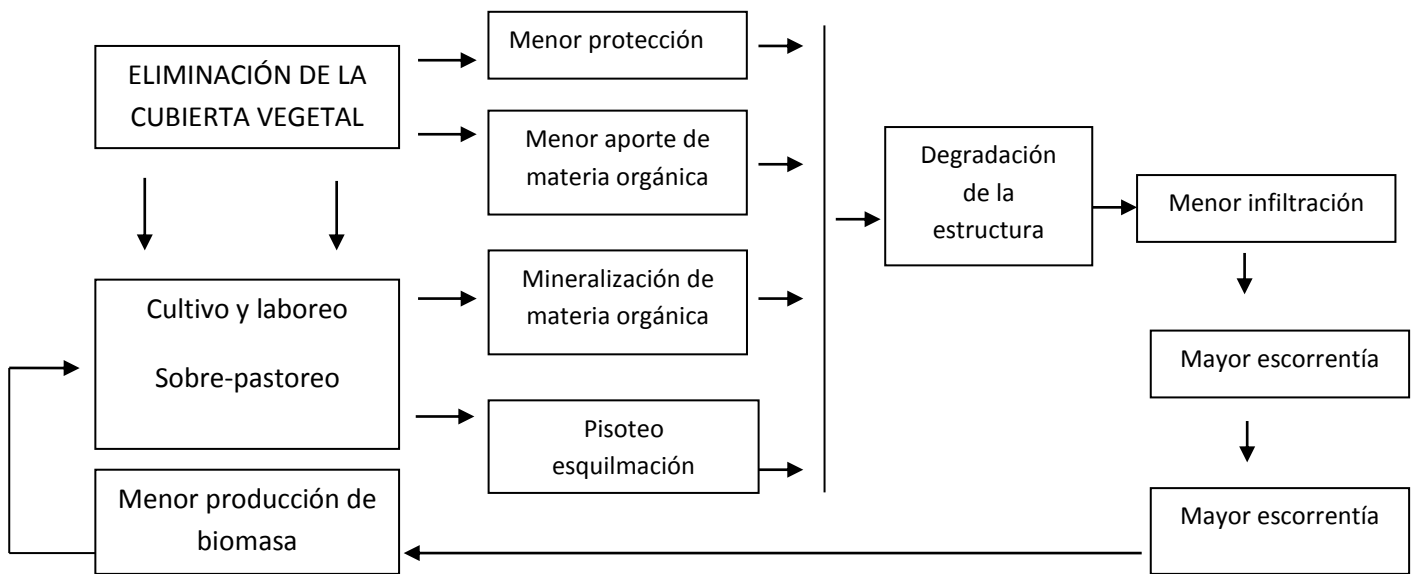
El hombre favorece la acción erosiva del agua y del viento, especialmente en los terrenos pendientes, al usar sistemas de cultivos y herramientas inadecuadas, al talar los bosques o quemar la vegetación, al construir obras o vías de comunicación.

Ejemplos de esta clase de erosión son: los desbordamientos de las quebradas y de los ríos, la pérdida de los suelos por escurrimiento y la formación de eriales por sobrepastoreo.

1.3.2 Agentes de la erosión

El impacto de la erosión depende de factores como la agresividad de los agentes erosivos, la pendiente del terreno y la naturaleza de la cobertura vegetal, así como la susceptibilidad del suelo a ser erosionado o erosionabilidad del suelo.

Figura 4. Mecanismos responsables de la erosión



Fuente: Moreno Caselles y otros, 2000

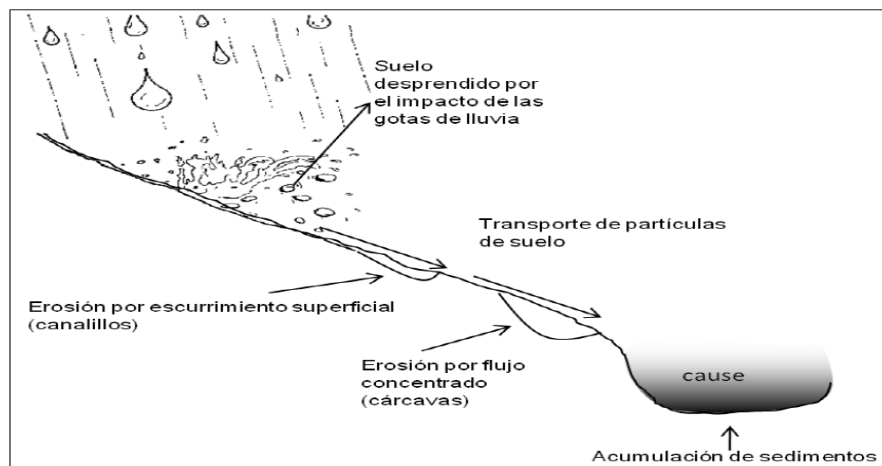
Según Hudson (2006) y el Colegio de Postgraduados (1997), los principales agentes de la erosión son: el agua, el viento, los cambios de temperatura y los procesos biológicos, de los cuales los dos primeros son los que revisten mayor importancia.

- El agua. Es el agente más importante de la erosión. La erosión hídrica es el resultado de la energía producida por el agua al precipitarse sobre la tierra y al fluir sobre la superficie de los terrenos.
- El viento. Es un agente físico que influye en la erosión y formación de los suelos al causar desprendimiento, transporte, deposición y mezcla del suelo. El viento no erosiona por sí mismo las rocas, sino que la abrasión provocada por las partículas del suelo que él transporta es la causante de este desgaste.
- Los cambios de temperatura. Cuando se considera la erosión geológica, el paso del tiempo apenas se nota, y aun cambios pequeños o muy lentos se vuelven perceptibles hasta después de un largo tiempo.
- Los agentes biológicos. El proceso erosivo también está influenciado por los organismos vivos en forma directa o indirecta.

1.3.3 Erosión hídrica

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía (Figura 5). Esta contribuye particularmente a la erosión por flujo superficial y en canales, fenómenos para los que la intensidad de precipitación se considera generalmente la característica más importante (Morgan, 1996).

Figura 5. Proceso de erosión hídrica (CNA, 1996).



1.3.4 Formas de erosión hídrica

Heano (2007) define tres clases de erosión hídrica, atendiendo a la forma como el agua actúa en el suelo. Estas tres clases de erosión son:

1. Erosión por salpicamiento
2. Erosión por escurrimiento o escorrentía
3. Remoción en masa

1.- La erosión por salpicamiento

Es la erosión producida por el golpe de las gotas de lluvia al caer sobre el suelo desnudo (salpicadura). El agua lluvia ejerce su acción erosiva sobre el suelo mediante el impacto de las gotas, las cuales caen con velocidad y energía variable según sea su diámetro.

La fuerza y tamaño de las gotas de lluvia caída ocasionan el desprendimiento de las partículas de los agregados del suelo y su dispersión. La erosión pluvial deja las partículas finas en suspensión para que luego el agua superficial las arrastre y se inicien otras formas de erosión.

Debido a que las partículas del suelo se desprenden ante todo por la acción de la lluvia, este proceso de desprendimiento conocido con el nombre de erosión pluvial es el primer fenómeno que se presenta en cualquier caso de erosión hídrica.

2.- Erosión por escurrimiento o escorrentía

Cuando el agua lluvia no alcanza a infiltrarse en el suelo (debido a que la intensidad del aguacero es mayor que la velocidad de infiltración o a que el suelo está saturado) fluye por la superficie de terrenos pendientes (escorrentía) arrastrando el suelo desprendido.

Según sea la pendiente, la cantidad de agua y la clase de suelo, se presentan diferentes formas de esta clase de erosión, definidas así:

- a. Escurrimiento difuso
- b. Erosión laminar
- c. Erosión de surcos

- d. Erosión en cárcavas
- e. Erosión regresiva o remontante
- f. Terracetas

3.- *Remoción en masa*

Es un movimiento de una masa de suelo, causado por la infiltración del agua y la acción de la gravedad. Puede ser de movimiento o flujo lento como la solifluxión o de flujo rápido como los derrumbes. Las principales formas en que se presenta este fenómeno son:

- a. Deslizamientos
- b. Derrumbes
- c. Coladas de barro
- d. Solifluxión
- e. Hundimientos
- f. Desprendimientos y desplomes

Por otra parte, el Colegio de Postgraduados (1982) y FAO (1978) definen como formas de erosión hídrica las siguientes: erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión en surcos, erosión por cárcavas y formas especiales de la erosión.

1) Erosión por gotas de lluvia

La acción de las gotas de lluvia sobre las partículas del suelo se entiende fácilmente cuando se la considera como el momento de una gota que cae sobre una superficie en pendiente. La salpicadura de las gotas de lluvia no es muy crítica en un terreno a nivel, pero en terrenos con pendiente se esparce más suelo pendiente abajo que pendiente arriba (COLPOS, 1982).

2) Erosión laminar

El poder erosivo y el transporte del flujo laminar son función de la altura de éste y de la velocidad del escurrimiento para una magnitud, una forma y una densidad dadas de las partículas o agregados del suelo. Estudios pertinentes han revelado que el desplazamiento máximo de partículas del suelo se produce cuando la altura del flujo laminar es aproximadamente igual al diámetro de las partículas. El flujo laminar sobre la superficie del suelo ocurre principalmente cuando ésta superficie es lisa y de pendiente uniforme (FAO, 1978).

3) Erosión en surcos

El agua de lluvia cuando se acumula, se concentra en las depresiones y comienza a fluir, adoptando la trayectoria de mínima resistencia. De este modo, el flujo superficial, con el limo en suspensión, se desplaza siguiendo surcos que son lo bastante pequeños para hacerlos desaparecer fácilmente con las operaciones normales de labranza. No existe ningún límite definido que señale el final de la erosión laminar y el comienzo de la erosión en surcos. (FAO, 1978).

Estos se forman casi inmediatamente de iniciarse el flujo superficial. El número de surcos que se forma en una superficie determinada puede variar ampliamente, dependiendo de esta variación sobre todo de la irregularidad de la superficie del terreno y de la cantidad y la velocidad del escurrimiento. El desprendimiento y el transporte de partículas de suelo son mayores en la erosión en surcos que en la laminar. Ello se debe a la aceleración de la velocidad del agua en movimiento cuando ésta se concentra y desplaza en surcos. En la erosión en surcos, el desprendimiento se origina principalmente por la energía del flujo de agua y no por el choque de las gotas de agua de lluvia, como ocurre en el caso de la erosión laminar (FAO, 1978).

4) Erosión por cárcavas

Esta erosión es una erosión en surcos que diseña tan profundamente el suelo que el terreno no puede nivelarse con los instrumentos de labranza ordinarios. La erosión en cárcavas se produce frecuentemente después de la erosión laminar y la erosión en surcos (FAO, 1978) Esta es una forma más avanzada de la erosión por canales, donde la

profundidad alcanzada debido a la erosión, es mayor que cualquiera de las otras formas de erosión.

5) Formas especiales de la erosión:

a) Erosión en pedestales

Cuando se protege a un suelo fácilmente erosionable del impacto de las gotas de lluvia, por medio de piedras o raíces de un árbol, quedan “pedestales” aislados coronados con el material resistente. Se ha demostrado que la destrucción de terrenos adyacentes a los pedestales es debida, principalmente, a las gotas de lluvia más que al flujo superficial.

b) Erosión en pináculos

Se asocia con canales verticales profundos a los lados de las cárcavas

c) Erosión tabular

Se da por la formación de tubos continuos y canales subterráneos. Ésta forma de erosión ocurre cuando el agua que fluye se infiltra a través de la superficie del suelo y se mueve hacia abajo hasta encontrar una capa menos permeable

d) Erosión por caída o remontante

Ésta forma de erosión es un proceso geológico que se presenta en las paredes de la cárcava, sin ninguna intervención del hombre. La caída que se forma en la orilla de la cárcava arroja el material salpicado contra la parte baja de esta cara.

1.4 Pérdida tolerable de suelo

Considerando a Morgan (1997), en cuanto al tema de las pérdidas tolerables, resulta que es complicado definir el nivel de tolerancia de erosión de suelo, ya que las velocidades de formación de suelo son tan lentas que no pueden determinarse con facilidad. Según Buol, Hole y McCracken (1973), las velocidades de formación del suelo en el mundo varían entre 0,01 y 7,7 mm/año. No obstante, los valores más altos son excepcionales y la medida se sitúa alrededor de 0,1 mm/año (Zachar, 1982). Para USA, Kirby (1980) señala velocidades próximas a 0,1 mm/año en el nordeste; 0,2 mm/año en los suelos de loess de las Grandes Llanuras y 0,02 mm/año en las zonas áridas del sudoeste.

De igual forma Morgan (1997) menciona que una aproximación alternativa que evita la necesidad de medir directamente la velocidad de formación del nuevo suelo, es estimar la velocidad requerida para igualar la pérdida de suelo por erosión en áreas donde puede presumirse que existe equilibrio. Utilizando datos de cuencas pequeñas con bosques y vegetación herbácea, Alexander (1988) comprobó que las velocidades requeridas se situaban entre 0,3 y 2 t/ha, quedando en la mayor parte de los casos por debajo de 1 ha.

Bennet (1939) y Hall, Daniels y Foss (1979), citados por Hudson (1981) sugieren que, en suelos de textura media a moderadamente gruesa y con buenas prácticas de cultivo, las tasas anuales de formación del horizonte A pueden superar las 11,2 t/ha. Esto se debe a que el subsuelo puede mejorarse por incorporación de suelo superficial mediante el laboreo, y por el aporte de fertilizantes y materia orgánica. De acuerdo con estas condiciones, se han establecido valores de pérdidas tolerables de suelo de manera que se mantenga una adecuada profundidad para el desarrollo radicular y se eviten pérdidas importantes en los rendimientos, aunque los horizontes superficiales del suelo estén siendo afectados por la erosión. Así que, según este criterio, la pérdida tolerable de suelo debe definirse como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante 20 o 25 años. En estos casos, una pérdida media anual de suelo de 11 t/ha se considera generalmente aceptable aunque, en condiciones particularmente sensibles, como ocurre en los casos de suelos superficiales o altamente erosionables, se recomienda valores bajos como 2 t/ha

CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA SOBRE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO

2.1 Antecedentes de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

De acuerdo a Kirby y Morgan (1980) los primeros estudios científicos sobre los efectos de la erosión surgieron con el edafólogo alemán Wollny a fines del siglo XIX, entre 1877 y 1895. No obstante los primeros estudios cuantitativos en América iniciaron en el Servicio Forestal en 1915. En 1917 Miller realizó estudios en los que demostraba resultados cualitativos de los efectos de la erosión para ello se utilizaron pequeñas parcelas para determinar una gran variedad de efectos como de los cultivos y las rotaciones sobre el escurrimiento y la erosión y deterioro en la estructura del suelo, así como el tipo de suelo y la pendiente. Posteriormente el interés generalizado de los peligros de la erosión del suelo en la década de los 20 y los 30 resultaron en una mayor investigación científica sobre la erosión, fue ahí cuando se tuvo una noción de los factores erosivos.

López (2003) menciona que gracias a los estudios de Laws (1940) se incluyó la importancia del impacto de las gotas de lluvia en el proceso de erosión

Sin embargo, Kirby y Morgan (1982) le atribuyen a Ellison el haber descubierto el verdadero papel de la lluvia en los procesos de erosión hídrica, ya que fue el primero en comprender que la lluvia es de por sí un **agente erosivo** completo y que la erosión es escasa o nula cuando la superficie terrestre está protegida por una amplia cobertura vegetal. Él fue quien demostró que los efectos protectores de la cobertura vegetal se deben al hecho de que priva a las gotas de lluvia de su energía cinética

Y añade que varios científicos comenzaron a idear ecuaciones empíricas para la predicción de la erosión del suelo a medida que los datos se fueron acumulando e intercambiando. La primera de ellas relacionaba la pérdida del suelo con el grado de inclinación y con la longitud de la pendiente la cual ha sido referida como el método de la Pendiente-Práctica. Este método consiste en relacionar la tasa de suelo perdido con el porcentaje y la longitud de la pendiente ($E=S \times L$). Así mismo demostró que duplicando el grado de pendiente aumentaba la pérdida del suelo de 2.61 a 2.80 veces y

duplicando la longitud horizontal de la pendiente aumentaba la pérdida de suelo por escurrimiento 3.03 veces.

Esta relación se expresó de la siguiente manera:

$$A = CS^m L^{n-1}$$

A = Pérdida de suelo promedio por unidad de área en una pendiente de terreno de anchura única.

C = Constante de variación,

S = Grado de pendiente del terreno

L = Longitud horizontal de la pendiente del terreno

m, n = Exponentes del grado de longitud horizontal y de pendiente del terreno, respectivamente.

Así mismo señala que Zing propuso valores de 1.4 y 1.6 respectivamente, para m y n . Según puede observarse al comparar esta ecuación con avances posteriores, la constante de variación C combina los efectos de la precipitación pluvial, el suelo los cultivos y el manejo del suelo.

Posteriormente el año siguiente Smith adiciona a la ecuación las prácticas de conservación en suelos del medio oeste de los Estados Unidos (Hudson, 1982). Evaluó los efectos de las prácticas de conservación mecánicas para cuatro combinaciones de rotación de cultivos y tratamiento de suelo para un suelo. Determinó que:

- a) La pérdida por el contorneado del suelo es del 57 por ciento de la observada al trabajar una colina de arriba abajo.
- b) La pérdida de suelo debido a las cosechas en rotación por franjas es del 25 por ciento de la que se presenta al trabajar una colina de arriba abajo, y
- c) La pérdida de suelo debida a las terrazas es del 3 por ciento de la presentada al trabajar una colina de arriba a abajo

Browning y asociados (1974) citado por López (2003) adicionaron los factores de suelo y manejo, y prepararon un conjunto de tablas para simplificar el uso de la ecuación en campo en el estado de Iowa

La relación de las características de precipitación pluvial con la cantidad de suelo erosionado fue introducido por Musgrave (1947). Tomando datos de varias estaciones, se determinó que la erosión E era proporcional a $P_{30}^{1.75}$, donde P_{30} es la máxima precipitación pluvial en 30 minutos. Se presentó un procedimiento para calcular la pérdida de suelo, en mm, para diversas cubiertas vegetales y para suelos de muchas partes de los Estados Unidos en su región Oriental y Central. La ecuación de Musgrave se utilizó extensamente para estimar la erosión bruta a partir de las **cuencas hidrológicas** (Kirby y Morgan, 1997).

La ecuación propuesta por Musgrave fue:

$$E = (0.00527) IRS^{1.35} L^{0.35} P_{30}^{1.75}$$

Donde:

E = Pérdida de suelo en mm por año

I = La erodabilidad inherente de un suelo con una pendiente del 10 por ciento y una longitud de pendiente de 22 m.

R = Factor de cubierta vegetal,

S = Grado de pendiente, porcentaje

L = Longitud de la pendiente en metros, y

P_{30} = Máximo de precipitación pluvial, en mm

Años más tarde y de acuerdo a Hudson (1982) Zingg analizó las desventajas de la evaluación de inclinación de la pendiente como la pérdida de suelo en las pendientes de menos del cuatro por ciento tuvo una predicción inferior y la pérdida de suelo de cero se computó para una pendiente de cero por ciento. Smith y Whitt (1947, 1948) propusieron una ecuación de la siguiente forma:

$$A = a + bS^n$$

Para describir el efecto de la pendiente en la pérdida de suelo. También presentaron un método de estimar la pérdida de suelo con suelos arcillosos de Missouri, haciendo uso

de los efectos de la inclinación de pendiente, longitud de la pendiente, rotaciones de cultivos, prácticas de conservación y grupos de suelos. (Kirby y Morgan,1997) La ecuación presentada fue:

$$A = CSLKP$$

Donde:

A = pérdida anual promedio de suelo

C = pérdida promedio de suelo por rotación anual en las parcelas y

A , L , K y P = Son multiplicadores para ajustar la pérdida de suelos de las parcelas C , para la inclinación de las pendientes, longitud y grupo de suelo, así como práctica de apoyo para la conservación, respectivamente.

En 1954 la investigación para la predicción de erosión de suelos se consolidó en un esfuerzo cooperativo que tenía por objeto superar muchas de las desventajas inherentes a los proyectos de investigación local o regional. Así mismo se hizo una reevaluación de los diversos factores que afectaban la pérdida de suelos (Smith y Wischmeier, 1957; Wischmeier y Smith, 1958; y Wischmeier y colaboradores, 1958) lo cual condujo a la formulación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. (Kirby y Morgan, 1997).

De manera concomitante, Hudson (1961) presentó una ecuación de erosión:

$$E = T S L P M R$$

Donde:

E = Erosión

T = Tipo de suelo

S =Gradiente de pendiente

L =Longitud

P =Práctica orgánica y agrícola

M = Protección mecánica

R = precipitación pluvial

Aunque la ecuación es llamada universal, su extensa base de datos estaba limitada al este de las Montañas Rocosas, Estados Unidos de América. Además también estaba limitada a pendientes aptas para el cultivo, normalmente entre 0 y 7°, y a suelos con bajo contenido en montmorillonita. Se han hecho intentos para utilizar la ecuación más genéricamente (Morgan, 1997)

Con el fin de proporcionar datos necesarios para la evaluación de los factores surgen los simuladores de lluvia en 1960 que fueron utilizados en campos experimentales en 16 estados.

Cuadro 1. Principales autores que contribuyeron a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Autor	Aportaciones	Ecuación
Zingg 1940	Formuló una ecuación predictiva que relacionaba la pérdida de suelo con el grado de inclinación y con la longitud de la pendiente. Demostró que el duplicar el grado de pendiente aumentaba la pérdida de suelo 2.61 veces a 2.80 veces, y duplicando la forma horizontal de la pendiente aumentaba la pérdida de suelo por escurrimiento 3.03 veces (Kirby y Morgan, 1994)	$A = CS^m L^{n-1}$ <p>A= pérdida de suelo promedio por unidad de área en una pendiente de terreno de anchura única. C= una constante de variación S=grado de pendiente del terreno L=longitud horizontal de la pendiente del terreno. M, n= exponentes del grado de longitud horizontal y de pendiente del terreno, respectivamente, (Zingg, propuso valores de 1.4 y 1.6 para m, n)</p>
Smith (1941)	Smith adicionó a la ecuación de Zingg las prácticas de cultivo y de conservación como factores de la ecuación, estos factores sirven como una capa protectora de los distintos cultivos, e introduce un límite de pérdida de suelo específico (0.9 kg/m ² al año, para desarrollar un método geográfico a fin de determinar las prácticas de conservación en suelos en el medio oeste de Estados Unidos Norteamérica (Hudson, 1982)	$A = CS^m L^{n-1} P$ <p>A= pérdida de suelo promedio por unidad de área en una pendiente de terreno de anchura única. C= una constante de variación S=grado de pendiente del terreno L=longitud horizontal de la pendiente del terreno. M, n= exponentes del grado de longitud horizontal y de pendiente del terreno, respectivamente, (Zingg, propuso valores de 1.4 y 1.6 para m, n) P= prácticas de conservación y cultivo.</p>
Browning (1947)	Incorpora un factor de Erosionabilidad del suelo a la ecuación. (López, 2003)	$As = kL^{0.35} S^{1.35} C$ <p>As=Pérdida anual de suelo por unidad de área. K=Valor numérico proporcional a la erosión del suelo. S=Pendiente C=Cubierta vegetal</p>
Musgrave (1947)	Musgrave incluyó en la ecuación un factor climático, basado en la precipitación máxima en 30 minutos con un periodo de retorno de diez años (Morgan, 1997) y se usó	$A = I_{30}^{1.75} CS^m L^{n-1}$ <p>As=Pérdida anual de suelo por unidad de área. I= Intensidad máxima de una tormenta de</p>

	extensamente para para estimar la erosión bruta a partir de las cuencas acuíferas. Relaciona la característica física de la lluvia con la pérdida de suelo.	duración de 30 minutos para un periodo de retorno de 2 años. K =Valor numérico proporcional a la erosión del suelo. S =Pendiente C =Cubierta vegetal
Wischmeir (1958)	Propone una manera de estimar el factor de erosividad debido a la lluvia a partir de la energía cinética y a la intensidad de la lluvia (Colotti, 2004).	$E = 1.213 + 0.890 \log_{10} I$ E = Energía cinética en kg m/m ² mm I =Intensidad de la precipitación pluvial en mm por hora
Wischmeir y Smith (1965)	El servicio de investigación agrícola de los Estados Unidos (ARS), establece en 1954 el centro nacional para la colecta de datos de escurrimiento y erosión en la universidad de Purdue. Como consecuencia de estas invetigaciones Wischmeir y Smith desarrollan finalmente la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)	$A = R * K * L * S * C * P$ A = Pérdida de suelo (ton/ha/año) R =Erosividad de la precipitación K = La Erosionabilidad LS =La topografía C =Vegetación P =Prácticas de conservación de suelo

Gracias al análisis de este gran conjunto de datos se obtiene un mayor número de mejoras en la ecuación como lo son:

- Un índice de **erosividad** de la lluvia, evaluado con características locales de la misma;
- Factor de **erodabilidad** cuantitativo que es evaluado directamente de datos sobre propiedades del suelo y que es independiente de la topografía y las diferencias en la lluvia;
- Un método de evaluación de los efectos de cultivo y manejo, en relación a las condiciones climáticas y
- Un método para cuantificar los efectos de interacción entre sistemas de cultivo, nivel de productividad, prácticas de labranza y manejo de residuos.

2.2 Limitaciones de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

En cuanto a las limitaciones de la EUPS Wischmeier (1965) y Foster (1979) citado por Lizaso (1980), señalan las siguientes:

- a) No estima con precisión la erosión para un evento específico.
- b) No estima la erosión causada por flujo concentrado.
- c) No estima el depósito de sedimentos.

- d) No estima la concentración de sedimentos en la escorrentía.
- e) No proporciona información sobre los sedimentos en sí, tal como tamaños, densidades, áreas superficiales, etc.

La EUPS es más precisa si se calcula el promedio anual de pérdida de suelo para un periodo, comparado con el cálculo de pérdida de suelo por año. Además observan que la EUPS sobrestima las pérdidas de suelo en terrenos o parcelas con baja erodabilidad y con alta erodabilidad las subestima. De los parámetros de la ecuación el factor Topográfico LS y el factor de cobertura y manejo (C) tienen más influencia en la eficiencia del modelo.

Aún con las limitaciones que pudieran enumerarse, cabe afirmar que la difusión, uso y aceptación de la EUPS ha sido tan grande como el impacto causado por su creación, y que su aplicación aun cuando limitada puede ser continuamente mejorada.

2.3 Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica se pueden evaluar de la siguiente manera:

- En campo, ya sea en parcelas experimentales control o bien en estaciones de aforo de los ríos de una cuenca hidrográfica en la que se midan los sedimentos.
- A partir de estimaciones por medio de modelos, cuyos resultados deben ser validados a partir de medidas en campo, para determinar su idoneidad para la zona en cuestión.

Entre los modelos, el más utilizado por su aparente simplicidad es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Renard y otros, 1994). Es una expresión factorial que toma en consideración los factores de erosividad de la lluvia (R), la erosionabilidad del suelo (K), la longitud e inclinación de la pendiente (LS), la cubierta vegetal (C) y las prácticas de conservación (P). De manera que:

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

Enseguida se desarrolla cada uno de estos factores.

Donde:

A = Es la pérdida de suelo por unidad de superficie. Sus dimensiones son $Mg \cdot ha^{-1}$

R = Factor de erosividad de la lluvia con probabilidad de ocurrencia de la energía cinética de la lluvia por lo menos del 50% para intensidad de lluvias con duración de 30 minutos. Sus dimensiones son $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot Año^{-1}$

K = Erodabilidad del suelo. Cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor R cuando el suelo se encuentra en condiciones máximas de erosión posible.

L = Es la longitud de la pendiente. Es la relación de la erosión con una longitud de pendiente dada y ocurre en el estándar de 22.1 m cuando hay equivalencia con los demás factores.

S = Es el factor de inclinación de la pendiente. Es la relación entre la erosión y la inclinación de una pendiente dada y la cual ocurre a 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.

C = Es el uso y manejo. relación de la erosión de un suelo con el uso y manejo, así como las condiciones bajo las que se encuentre así como la erodabilidad del suelo, a igualdad de los demás factores.

P = Factor de la práctica mecánica de suelo. Factor de la erosión que ocurre cuando una práctica mecánica de apoyo es aplicada.

2.3.1 Factor R o erosividad de la lluvia.

La erosividad es un proceso ligado a la agresividad de la lluvia por sus características hidrodinámicas; Incluye el tamaño o diámetro de la gota, su velocidad de impacto en el suelo, que causa desprendimiento de las partículas menores de 0.05 mm, en el ámbito de limos y arcillas, y el transporte posterior de estas partículas en suspensión, arrastradas por películas superficiales de agua (Núñez, 2001).

De acuerdo con las investigaciones de diversos autores, ninguna de las características de la lluvia considerada en forma individual, presenta una correlación suficiente para explicar la pérdida de suelo causada por la lluvia. La mejor correlación se encontró con la energía cinética, pero ni aún en este caso tal relación explicaba suficiente proceso erosivo. Finalmente, una correlación aceptable se obtuvo al combinar, como índice de erosividad, a dos características de la lluvia: la energía cinética y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (Becerra, 1999).

Por otra parte, desde que en 1944 Ellison encontró una relación directa entre la gota de agua y la erosión de suelos, los investigadores se dirigieron a estudiar qué y cuáles características de la gota de agua son factibles de medir; dichos trabajos generaron metodologías para la cuantificación de propiedades tales como la velocidad final, diámetro, energía cinética, intensidad e impulso mecánico de la gota de lluvia.

Cuando la gota de agua se encuentra en el aire, ésta posee una energía potencial ($E_p=mgh$) que al llegar al suelo se convierte en energía cinética ($E_c=MV^2/2$) y ejerce un trabajo sobre éste. Sobre la base de ésta última ecuación es obvio deducir que a mayor diámetro, mayor masa y mayor velocidad de caída, trayendo como consecuencia una mayor acción de trabajo en la disgregación del suelo (Contreras, 1986).

El factor de erosividad de la lluvia en la EUPS, es el índice de erosividad presentado por Wischmeier en 1959, y se define como el producto de dos características de la lluvia: la energía cinética total de la lluvia (E_c) y la intensidad máxima en treinta minutos (I_{30}). El producto de ambos se conoce como Índice de Wischmeier, y se expresa de la siguiente manera:

$$EI_{30} = (E_c)(I_{30})$$

Donde:

EI_{30} =Índice de erosividad para un evento (MJ.mm/ha.hr).

E_c =Energía cinética total de la lluvia (MJ/ha).

I_{30} =Intensidad máxima de la lluvia en 30 min (mm/hr).

Wischmeier y colaboradores también analizaron la distribución de los tamaños de gotas de la lluvia y la velocidad terminal de las mismas, determinando una ecuación para calcular la energía cinética de la lluvia a partir de su intensidad la cual, en forma general se expresa por:

$$Ec = A + B(\text{Log}_{10} I)$$

En ésta los parámetros A y B pueden tomar diferentes valores numéricos, según las unidades que se utilicen para la intensidad de la lluvia (*pulgadas/hr, cm/hr, mm/hr*). La versión más utilizada actualmente es la propuesta por Foster y otros (1981), la cual, con base en el sistema internacional de medidas (SI), se expresa como sigue:

$$Ec_i = 0.119 + 0.0873 \text{Log}_{10}(I_i); \quad I_i = p_i (60/t_i)$$

Donde:

I_i = Intensidad de la lluvia, en el intervalo i, expresada en mm/hr.

Ec_i = Energía cinética para el intervalo de tiempo i, en MJ/ha.mm.

t_i = Cantidad de lluvia en el intervalo de tiempo i, en mm.

Esta ecuación es válida para intensidades de lluvia menores a 76 mm, considerando que a intensidades mayores, el tamaño de gotas ya no se incrementa, y una parte de la energía de una masa mayor de lluvia es absorbida por la lámina de agua que sobre la superficie del suelo dejan las lluvias tempestuosas. En los casos en que este umbral de intensidad sea rebasado, se recomienda utilizar un valor constante de Ec para intervalo correspondiente:

$$Ec_i = 0.283 \text{ MJ / ha.mm}$$

Para calcular la energía cinética total de una tormenta, es necesario dividir la curva del pluviograma respectivo en varios segmentos (figura 7), según los cambios de intensidad registrados en el evento, enseguida se aplica la ecuación anterior para cada segmento, se multiplica el resultado por la cantidad de la lluvia con esa intensidad, y se suman los resultados parciales, según se expresa en la formula siguiente:

$$Ec = \sum_{i=1}^n Ec_i p_i$$

Donde:

Ec = Energía Cinética.

n = Número de intervalos con diferente intensidad durante el mismo evento.

Ec_i y p_i = Energía y cantidad de lluvia en intervalo de tiempo i , en mm.

Con todo lo anterior, la expresión algebraica de R es:

$$R = \sum_{j=1}^m (EI_{30})_j$$

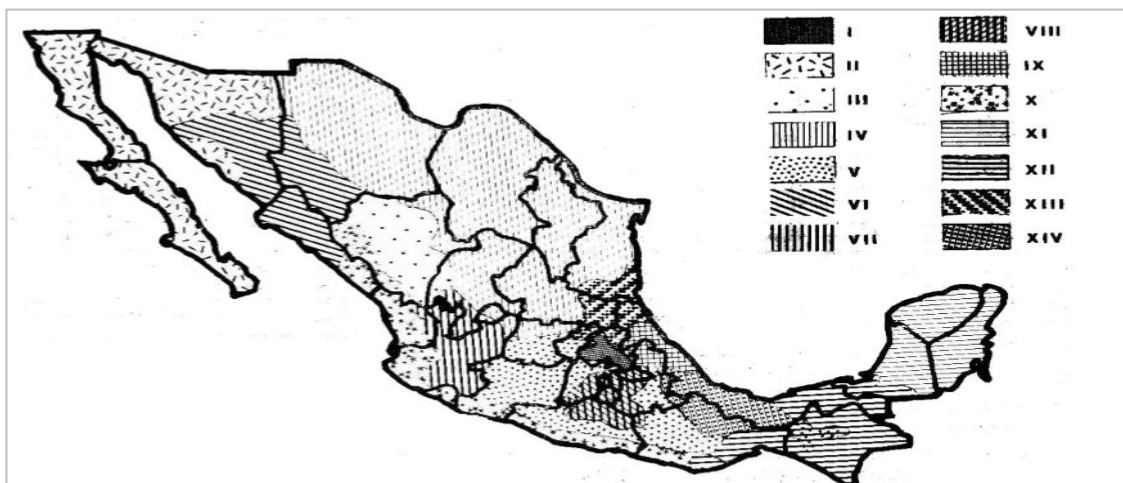
Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia o índice de erosividad anual de Wischmeier, expresado en MJ/ha/año.

m = Número de eventos durante el año.

Por otro lado, Cortés (1991) rediseñó una ecuación para correlacionar los datos de precipitación anual con los valores de R estimados en el país usando la información disponible de los de intensidad de la lluvia disponibles. De esta manera dividió a la República Mexicana en regiones de erosividad de la lluvia, el cual se muestra en la figura 6

Figura 6. Mapa de erosividad en la República Mexicana



Otro índice de erosividad desarrollado para regiones donde se carece de registros pluviográficos, es el índice de Fournier, el cual fue también evaluado por Arias (1980). Con resultados aceptables (Becerra, 1999)

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

Donde:

R = Erosividad de la lluvia.

P^2 = Precipitación mensual en mm

P = Precipitación anual en mm.

Esta ecuación fue adoptada por la FAO (1980) dada dificultad para emplear el EI_{30} , Para fines de este trabajo de investigación se empleó el índice de Fournier para calcular R

2.3.2 Factor K o erodabilidad del suelo.

El término erosionabilidad del suelo K se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo particular a ser erosionado. Este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas, con igualdad de los demás factores constantes, y se define como tasa de pérdida de suelo por cada unidad adicional de EI_{30} cuando los factores L , S , C y P permanecen constantes, (Roose, 1996).

Algunos suelos se erosionan más rápidamente que otros bajo idénticas condiciones. Los suelos altos en limo o arena muy fina erosionan más rápidamente.

La erosionabilidad de los suelos depende de diversas propiedades y características del suelo, siendo las más importantes, de acuerdo con autores citados por SARH (1987), las que se enumeran a continuación:

- Distribución de las partículas primarias (arena, limo y arcilla).
- Contenido de materia orgánica.

- Estructura del suelo.
- Óxidos de fierro y aluminio.
- Uniones electroquímicas.
- Contenido inicial de humedad.
- Procesos de humedecimiento y secado del suelo.

Las muestras de suelo para análisis se colectan del extractor superficial del suelo, hasta una profundidad de 15 a 20 cm. Las clases de estructuras son:

- Granular muy fino, migajoso y agregados con diámetros menores de 1 milímetros.
- Granular fino, migajoso y agregados con diámetros entre 1 y 2 milímetros.
- Granular mediano, hasta burdo, con agregados de hasta 10 mm de diámetro. La mayoría de los suelos agrícolas tienen este tipo de estructura.
- Agregados en forma de placas, prismas o columnas o muy gruesos (terrones estables).

La permeabilidad del suelo es evaluada en el ámbito de campo, hasta una profundidad entre 0.8 y 1.0 m.

Las clases de permeabilidad son:

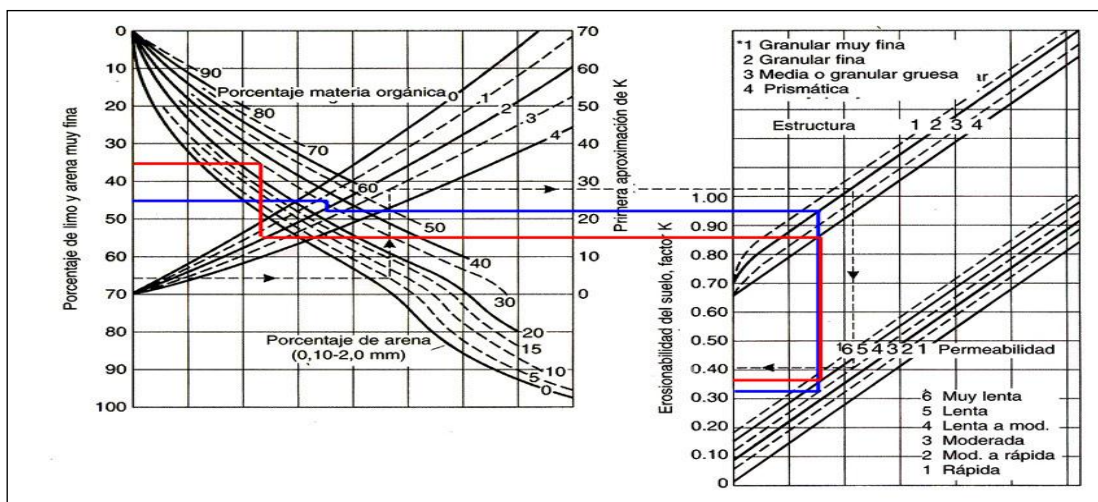
- Suelo muy arenoso por toda su profundidad.
- Todos los demás suelos.
- Suelos de capa arable moderadamente profunda y permeable, sobre un subsuelo gruesamente estructurado o de textura gruesa.
- Suelos de poca profundidad de la capa arable, moderadamente estructurados de arcilla limosa o de arcilla franco limosa.
- Suelos de poca profundidad de la capa arable, sobre estratos de arcilla masiva a arcilla limosa masiva.
- Suelos muy arcillosos o con estratos impermeables debajo de la superficie.

Para determinar el valor de K se puede hacer uso de la información de las propiedades del suelo y característica morfológicas de levantamientos de suelos y sus respectivos mapas. Otra forma es tomando muestras de suelos para ser analizadas en el laboratorio y obtenido información de campo. Los parámetros a determinar son:

- Porcentaje de limo y arena muy fina (diámetros de partículas entre 0.002 y 0.10 mm).
- Porcentaje de arena excluyendo la arena muy fina (diámetros de partículas entre 0.10 y 2.00 mm).
- Porcentaje de materia orgánica.
- Estructura: tipo y clase.
- Permeabilidad del perfil.

De estos parámetros, los tres primeros se obtienen a partir del análisis de muestras de suelo en el laboratorio, mientras que la estructura y la permeabilidad se determinan en campo, según la valoración que se da en el nomograma (figura 8). Cabe mencionar que, si solo se dispone de los tres primeros, puede determinarse una primera aproximación de K , como se indica en la primera parte del nomograma.

Figura 7. Nomograma para determinar el factor de erosionabilidad del suelo, K



Fuente: Morgan (1997)

El nomograma se basa en la siguiente ecuación, que fue desarrollada de los datos de campo de las parcelas de erosión que se establecieron en los Estados Unidos (Wischmeier, 1974) citado por (INETER, 2004).

$$100 K = 2.1 * (M_{1.14} / 10,000) * [(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)]$$

Donde:

M = Limo + arena muy fina (%)

a = Materia orgánica (%)

b = Clase de estructura

c = Clase de permeabilidad

Para obtener el valor de K mediante el nomograma de Wischmeier, se parte del porcentaje de limos + arenas muy finas, proyectándose horizontalmente hasta llegar a la curva correspondiente del porcentaje de arenas; luego se gira hacia arriba hasta llegar a la de porcentaje de materia orgánica, y de ésta se cambia de dirección nuevamente hacia la derecha hasta interceptar la curva correspondiente a la estructura del suelo, desplazarse a partir de ella hacia abajo para llegar a la permeabilidad. Finalmente, desde ésta se desplaza a la izquierda hasta llegar al eje de valores de K . esta secuencia se indica en el nomograma con una flecha punteada.

Para valores más exactos de K pueden ser obtenidos usando el nomograma de erodabilidad, el nomograma gráficamente calcula K para un suelo dado en función de la distribución de tamaño de las partículas, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del perfil. Valores conocidos de este factor de suelo reportado son entre 0.005 y 0.034 (Wischmeier, 1974).

Valores de K de suelos gravosos o pedregosos o con un alto contenido de material grueso no erodable (tepetate) se reduce entre 0.05 y 0.15. Los valores de K no son constantes, en la medida que se avanza la erosión de un determinado suelo, tiende a disminuir su valor K , debido a la pérdida de las partículas más erosionables, lo que

origina un incremento en la proporción de material no erosionable por lo tanto mayor resistencia a la subsiguiente erosión (INETER, 2004).

2.3.3 Factor *LS* o longitud de pendiente

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores *L* y *S*, para la longitud (*L*) y el grado (*S*) de la pendiente, en este último caso expresado en porcentaje. A medida que ambas características de la topografía se incrementan, su efecto en la pérdida de suelo es mayor. A menudo estos dos factores son representado como un factor único, *LS* (Becerra, 2005).

La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde la pendiente disminuye hasta que ocurra la depositación, ó que la esorrentía entre a un canal definido (Kirby y Morgan, 1994).

El factor *L* es la proporción entre la pérdida de suelo que puede ocurrir en un terreno con longitud de pendiente “*x*”, y la pérdida ocurrida en un terreno de longitud estándar, permitiendo constantes los demás factores, esto es:

$$L = \frac{\text{Pérdida de suelo, con longitud } x}{\text{Pérdida de suelo, con longitud estándar (22.1 m)}}$$

Para obtener el valor numérico del factor con esta relación, sería necesario contar con los datos experimentales para cada caso, lo que limitaría enormemente su uso; sin embargo, se ha desarrollado un procedimiento sencillo de cálculo para este factor, a partir de datos obtenidos con lotes de escurrimiento de longitud estándar (Wishmeier y Smith, 1978).

De esta manera, el factor *L* está definido por la relación siguiente:

Donde:

x= Longitud de la pendiente, en metros

m= Exponente que depende del grado de pendiente

La magnitud del exponente (m) varía en función de la pendiente del terreno, siendo sus valores entre 0.2 y 0.5, como se indica a continuación (Mitchell y Bubenzer, 1984):

$m = 0.5$ si la pendiente del terreno es mayor de 5%

$m = 0.4$ para pendientes entre 3% y 5%

$m = 0.3$ para pendientes entre 1% y 3%

$m = 0.2$ si la pendiente es menor a 1%

El mismo equipo de investigación dirigido por Wischmeier determinó la relación del grado de la pendiente con la erosión, proponiendo la siguiente ecuación para calcular el valor del factor S :

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

Donde:

S = Factor de inclinación (factor pendiente)

s = Pendiente del terreno, en porcentaje

Puesto que en la EUPS dichos factores son multiplicativos, se puede unir ambas ecuaciones obteniendo el valor conjunto del factor por topografía (LS):

$$LS = (x / 22.13)^m (0.065 + 0.045s + 0.065s^2)$$

2.3.4 Factor C o factor de manejo o cobertura vegetal

El factor C de la EUPS, representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación, en comparación con la pérdida de suelo que pudiera presentar el mismo terreno estando desprovisto de vegetación y bajo labranza continua. Como se indicó anteriormente en la condición estándar (sin cobertura vegetal y con barbecho continuo, condición extrema en cuanto a favorecer la erosión, el valor de C es la unidad y será cada vez menor a medida que haya una cobertura vegetal

sobre el terreno, de esta manera los valores de C fluctúan entre 0.01 y 1.0, estos valores correspondiente a un terreno totalmente protegido (0.01) y uno totalmente desprotegido (1.0) (Becerra, 2005).

Cabe señalar que no es posible evaluar independientemente los factores de manejo y cobertura debido a que sus efectos están influidos por muchas correlaciones importantes, entre ellas (SARH, 1991) menciona las siguientes:

- La influencia de la rotación de cultivos en la duración de la cobertura vegetal y su efecto residual sobre el suelo.
- Las labores de labranza, que puede dejar la superficie del suelo con o sin residuos de la cosecha anterior; asimismo, pueden dejarla con diversos grados de rugosidad.
- La eficiencia de los residuos vegetales en el control de la erosión depende de la cantidad disponible de los mismos.
- La eficiencia de un cultivo para evitar la erosión depende de cuánta lluvia erosiva ocurra durante los distintos períodos de crecimiento del cultivo.

De acuerdo con lo anterior, y considerando que los cambios en la cobertura efectiva desarrollada por los cultivos es gradual a través del año, para calcular los valores de C en los cultivos, el año se divide en períodos de crecimiento definidos, asumiendo, para simplificación, que tal cobertura es uniforme en cada período, y considerando la interacción entre la cobertura vegetal y la erosividad de la lluvia. Convencionalmente se distinguen cinco períodos, los cuales corresponden al mismo número de fases de cultivo. Como la duración de éstas varía para los diferentes cultivos, las fechas de inicio y término de los períodos deben ser establecidos para cada caso particular, como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Períodos convencionales en el ciclo de cultivo para el cálculo del factor C .

Período	Descripción
F Barbecho bruto	Desde la labranza hasta la siembra
1 Siembra	De la preparación de la de siembra hasta un mes después de la siembra
2 Implantación	Un mes a partir del período anterior
3 Crecimiento y maduración	Desde el final del período anterior hasta la cosecha
4 Residuo	Desde la cosecha hasta la labranza

Fuente: Mitchell y Bubbenzer (1984)

Para calcular el valor de C , es necesario determinar por un lado, el porcentaje de erosividad anual correspondiente a cada uno de los períodos arriba indicados, y por otro, la porción de C correspondiente a la cobertura presente en esos mismos períodos. Con el producto de ambos valores, expresados en fracción unitaria, se obtiene el valor de C para cada período de cultivo en cuestión, y la suma de esos valores parciales será el valor anualizado del factor C (Becerra, 2005).

La estimación del valor de C debe hacerse para cada sistema de cultivo cuando se pretende una buena precisión, lo que lo hace complejo. No obstante, para propósitos de planeación en aquellos casos donde se carece de la información detallada requerida, se pueden utilizar los valores generalizados, reportados en tablas por diversos autores.

Existe un procedimiento para calcular C para un cultivo y sistema de manejo dado con relación a un patrón de lluvia. Tablas regionales de valores de C son disponibles en la literatura así como para las condiciones de sitios de construcción, pastizales y bosque. Valores de C universalmente no válidos no existen, por la gran variedad de cultivos, secuencias y rotaciones de cultivos y manejos, sería necesaria la evaluación de valores de C experimentalmente en condiciones locales. Con el uso de tablas de referencia de la literatura especializada en donde el producto de ensayos experimentales de algunas regiones se han compilado valores del factor C (cuadro 5) (Martínez, 2010).

2.4 Estudios sobre la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)

De acuerdo a la FAO (2015) la erosión del suelo representa un problema ambiental cuyos efectos se manifiestan tanto in situ como ex situ. Por un lado la pérdida de productividad del suelo suele ser el principal efecto in situ, mientras que el aumento de la productividad en los suelos al pie de laderas, la sedimentación y eutrofización los cursos y reservas de agua son efectos comunes ex situ.

Como ejemplo de los efectos in situ y ex situ de la erosión de suelo, la ONU menciona que esta problemática afecta especialmente a 1,200 millones de personas que viven en las zonas rurales más pobres del mundo, los que más dependen de lo que el suelo produce para su subsistencia. Y es un problema que sigue aumentando. En las zonas de

secano del planeta, donde viven 2,000 millones de personas, cada año se pierden entre 8 y 10 millones de hectáreas de suelo arable, una superficie similar a Austria.

En este sentido muchos proyectos de investigación han estudiado la erosión del suelo a lo largo del tiempo, ya que se dice que la erosión de suelo se da por periodos y puede deberse a diversas razones como fenómenos naturales como sismos, erupciones volcánicas, y fenómenos climáticos, sin embargo las que representan generan un tipo de erosión acelerada son el uso y prácticas de manejo de la tierra.

Por otro lado investigaciones demuestran que la erosión de suelos tiene una estrecha relación con los factores económicos ya que de acuerdo a Boardman y otros (2003) las decisiones de los agricultores con respecto a la producción y uso de la tierra están fuertemente influenciados por factores socioeconómicos. Como ejemplo, en Japón existe una situación que respecta a las tierras forestales como factor de equilibrio para las tierras de cultivo. Ésta nación insular con sus profundos valles de suelos volcánicos sueltos, sometidos a lluvias torrenciales, se ve obligada a cultivar intensivamente toda porción de tierra disponible para sostener su numerosa población. Este país constituye un ejemplo excelente de una agricultura bien mantenida mediante sus montañas cubiertas de arbolado, conservadas así a lo largo de los siglos. Cuando la cubierta forestal desaparece en los declives, surge la amenaza de un desastre en forma de espectacular erosión por el agua hasta que se restaura la vegetación y se construyen obras apropiadas. Para regular el escurrimiento. Desde hace mucho tiempo, los japoneses observan una política estricta de protección de los montes para el fin concreto de combatir la erosión hídrica (FAO, 1978).

Así mismo Boardman y otros (2003) señalan que en África existen condiciones muy diferentes, algunos de los países de éste continente la erosión del suelo por el agua es un factor que puede obstaculizar el desarrollo agrícola y económico, esto se debe a que muchos de los suelos aprovechables carecen de vegetación protectora durante parte o todo el año, o tienen una cubierta delgada en cualquier temporada del año. La forma más comúnmente frecuente de erosión es la erosión laminar, pero en las comarcas con precipitaciones incluso moderadas abunda la erosión en cárcavas. Las causas que principalmente contribuyen a la erosión hídrica vienen desde hace mucho. En primer lugar es el pastoreo abusivo y luego las talas excesivas y el cultivo sobre las laderas.

Así como existen proyectos de investigación sobre la erosión, también se han desarrollado estudios a nivel mundial para estimar los niveles de erosión en pequeñas o grandes escalas como la estimación de la erosión en cuencas. Barrack y Geert, (2006), establecieron indicadores visuales de erosión de suelo en la cuenca de Gikuuri en el altiplano central de Kenia a falta de métodos especializados para determinar la erosión de suelos, así como los rendimientos de los cultivos de maíz a la erosión en el sitio y los indicadores de sedimentación percibidos por los agricultores.

Por otra parte Fu y otros (2005) evaluaron la pérdida de suelo en la cuenca Yanhe y con ayuda de la USLE y un Sistema de información geográfica calcularon todos los factores usados en la USLE para la cuenca a partir de datos locales. Gracias a esto detectaron que erosión en el centro y sureste que en el noroeste de la cuenca Yanhe.. Sin embargo menciona que también resulta necesario aplicar algunos métodos de para identificar el transporte de sedimentos y depositación en cuencas.

En este sentido resulta importante resaltar que el modelo USLE por sus siglas en inglés o EUPS en español representa un método eficaz para estimar los niveles de erosión hídrica y tomado gran importancia en conjunto con los SIG. Aunque la ecuación es llamada universal, su extensa base de datos estaba limitada al este de las Montañas Rocosas, Estados Unidos de América. Además también estaba limitada a pendientes aptas para el cultivo, normalmente entre 0 y 7°, y a suelos con bajo contenido en montmorillonita. Se han hecho intentos para utilizar la ecuación más genéricamente (Morgan, 1997)

En lo que respecta a América Latina, existen varias investigaciones sobre aplicaciones del modelo USLE y sus factores. Lianes y Marchamalo (2009), evaluaron el factor C o cobertura vegetal en el control de la erosión en la cuenca del Río Birrís, Costa Rica. De su investigación se concluye que los factores C agrícolas presentan valores menores que los tabulados para la región, empleados en otros estudios, lo cual parece indicar que se ha corregido parte de la sobreestimación de las pérdidas de suelo de tierras agrícolas señalada en estudios previos. Para corregir el conflicto de uso de la tierra y disminuir la erosión se recomienda aplicar planes de manejo integrado que implementen prácticas para la conservación de suelos y aguas, considerando las propuestas de cubiertas vegetales que ofrecen mejor protección al suelo.

Cléricali y García (2009) también aplicaron en sus estudios el modelo USLE/RUSLE para estimar las pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región del sur de la cuenca río de la Plata.

Hoyos y otros (2005) estimaron la erosión potencial en una cuenca tropical colombiana, utilizó RUSLE en un SIG ambiental. Se tomaron en cuenta dos modelos de la cuenca, uno para la estación húmeda y otro para la estación seca. Tres escenarios de erodabilidad (K) fueron considerados (alta, media y baja) para representar la variabilidad en las medidas de infiltración dentro de cada uso de suelo. El factor topográfico y cobertura de suelo, fueron desarrollados de datos existentes de uso de suelo y curvas de nivel. El modelo resultante indicó que en la estación seca, y bajo el escenario promedio de erodabilidad, 534 ha (11%) del área de la cuenca rural fue dentro de la categoría de erosión potencial extrema. Durante la estación húmeda, ésta área incremento a 1348 ha (12%). En general, áreas que cuentan con bosque tuvieron bajos valores de erosión potencial, mientras que aquellas áreas bajo café y pastura variaron de acuerdo a la topografía. La modelación es probable que los escenarios de cambio de uso de suelo indicaron que la erosión potencial de la cuenca disminuiría como resultado de la conversión del café a pastura.

En México, también existen varias investigaciones sobre la erosión del suelo y la aplicación del modelo USLE o EUPS. A continuación se mencionan algunos de los estudios más representativos.

León y otros (2011) estimaron el riesgo de erosión hídrica en la Cuenca “Santa Catarina” en el Estado de Querétaro. El riesgo fue evaluado mediante el análisis de cuatro factores incluidos en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Los cuatro factores considerados involucran la potencialidad erosiva de la lluvia y el escurrimiento (factor R), la susceptibilidad del suelo a la erosión (factor K) y el efecto de la pendiente (factor S) y la longitud de la pendiente (factor L). Los resultados sirvieron también para la planeación de un programa de manejo y conservación del recurso suelo de la Cuenca.

Torres y otros (2003) también evaluaron la degradación de los suelos en la cuenca “El Josefino”, en Jesús María, Jalisco. Los escenarios se construyeron mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Los datos utilizados consistieron en cuatro años de

información climática, uso de suelo y unidades de suelo, lo cual resultó en cinco Unidades Hidrológicas, mismas que sirvieron para la predicción de la erosión hídrica. Las metodologías utilizadas fueron: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para la erosión hídrica, y FAO para estimar la degradación química, física y biológica. En los resultados, se observó que los principales procesos de degradación de los suelos de la cuenca son la erosión hídrica con valores clasificados entre altos y muy altos, que van de 107 a 200 t ha⁻¹año⁻¹ y afectan entre 35 y 81% del área total, respectivamente. La degradación física y química representan los menores grados de afectación que van de ligeras a moderadas.

Por su parte, Millward y otros (1999) integran la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar la erosión potencial en Zenzontla, una subcuenca del Río Ayuquila, ubicada en la Reserva de la Biósfera Sierra Manantlán de Guadalajara, México. Topografía montañosa y un régimen de precipitación unimodal tropical caracterizan esta región. Los datos utilizados en este estudio para generar las variables RUSLE incluyen una imagen Landsat Thematic Mapper (cubierta vegetal), topográfica digitalizada y mapas de suelos, y datos de precipitación tabulares., y los resultados se presentan como mapas geo-referenciados para cada una de las estaciones de precipitación húmeda y seca. Estos mapas confirman que las zonas de alta y extrema de pérdida de suelo se producen dentro de la Zenzontla sub-cuenca, y que la erosión potencial difiere significativamente entre las estaciones húmedas y secas.

Hernández y otros (2008) identificaron áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma que producen mayor pérdida de suelo. Los resultados mostraron a los municipios más susceptibles a erosionarse con el fin de tomar las medidas preventivas.

Aunado a los estudios mencionados, el papel del factor *C* o factor de cobertura vegetal y el factor *P* o factor de prácticas de conservación llamados factores atenuantes, en la cuenca del río Chapingo éstos factores han provocado que existan bajos niveles de erosión, ya que existen antecedentes de obras de conservación de suelos aplicados en esta zona a través de un manejo integral de la cuenca

En lo que respecta a las investigaciones sobre trabajos realizados para la restauración de suelos en la Vertiente Oriental del Valle de México, de la cual forma parte cuenca del

río Chapingo, se cita a Llerena y Sánchez (1992), en su artículo sobre la Recuperación de tepetates en la Vertiente Oriental del Valle de México, en el cual se menciona la importancia de esta zona por lo que representa por su pasado histórico y cultural, ya que el área del lago de Texcoco es un ejemplo donde el Rey Netzahualcōyotl realizó obras de conservación y mejoramiento de suelos y agua, y aunque se cree que la conquista española está involucrada en la degradación de los recursos, también el crecimiento urbano desordenado y la demanda de bienes y servicios está relacionada con la devastación de los recursos naturales de forma permanente. Por lo tanto la erosión, causada por la deforestación y el cambio de uso de suelo, el transporte de sedimentos, la disminución del manto acuífero son algunos problemas de la cuenca del Ex –lago de Texcoco.

Así mismo Llerena y Sánchez (1992) mencionan que para solucionar la situación de deterioro en la zona el Gobierno Federal de México creó el Proyecto Lago de Texcoco en 1973, el cual atacó esta problemática a través de programas de recuperación y acondicionamiento de suelos, reforestación y otras obras cuyas acciones han dejado beneficios como la incorporación de los tepetates a las actividades forestales y agrícolas, la disminución de la pérdida de suelo, el incremento en la recarga de acuíferos, el control de escurrimientos y, en general, beneficios al ambiente de la zona.

De acuerdo con Adame y Martínez (1999) para 1974, en la parte media de la cuenca se presentaba un fuerte proceso erosivo, manifestado por la presencia de suelos esqueléticos fuertemente erosionados, caracterizados por colores blanquecinos y rojizos conocidos como tepetates y pastizales degradados. Complementariamente existía la presencia de cárcavas profundas y frecuentes, que hacían de los terrenos zonas con pastizales degradados. Para 1989, la zona erosionada se redujo a 26.0 ha (menos de 1.0% de la superficie total de la cuenca) y las 370.4 ha restantes fueron rehabilitadas a través de obras y prácticas de conservación del suelo y el agua, que consistieron en roturación profunda, subsoleos, bordos y terrazas de banco; una pequeña porción se recuperó con reforestaciones.

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA CHAPINGO

En el presente capítulo se hace una descripción de cada uno de los elementos del medio físico que componen a la cuenca del río Chapingo, tales como hidrología, geología, edafología, fisiografía y uso de suelo.

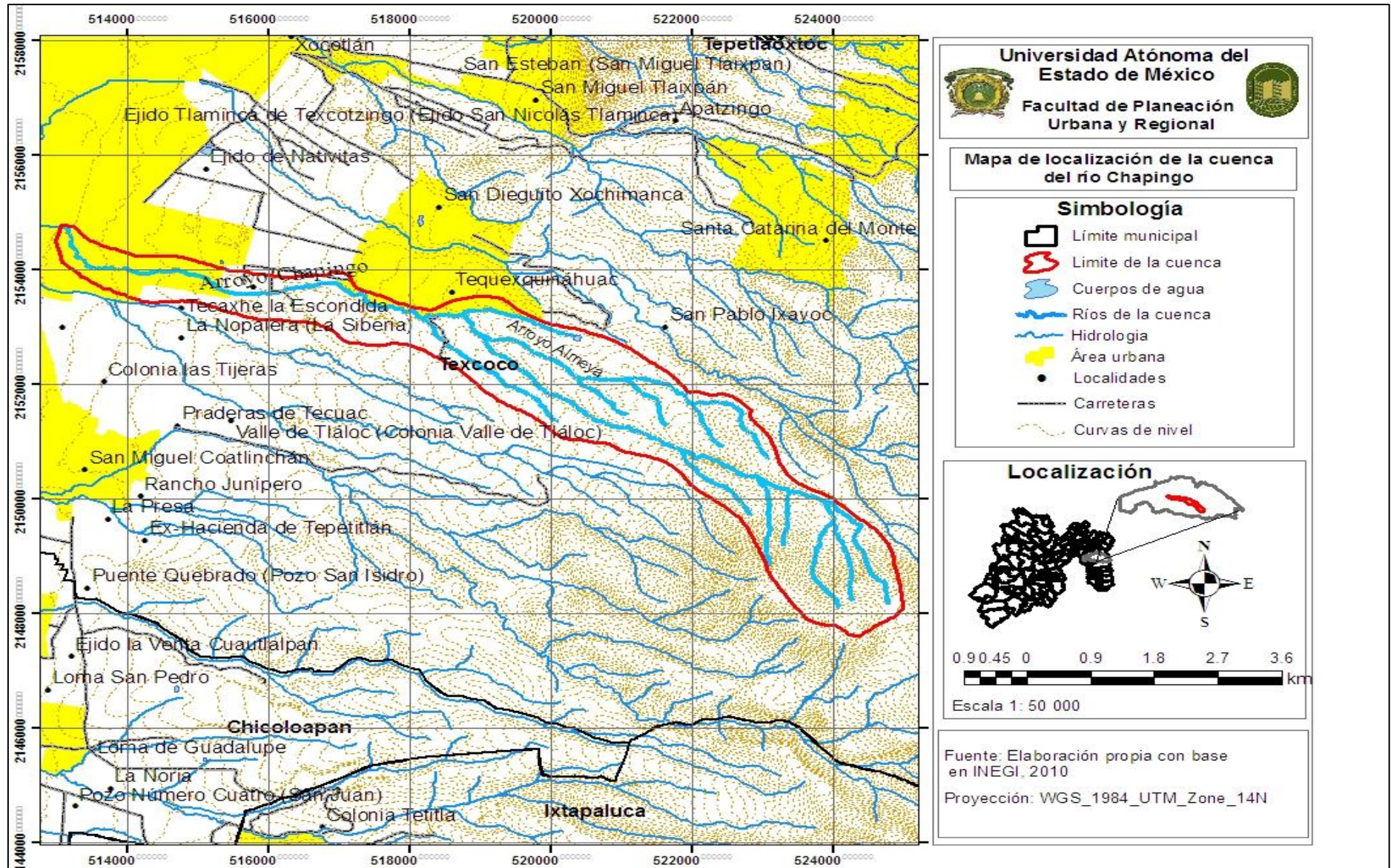
Este apartado tiene la finalidad de relacionar cada uno de los factores de la EUPS con los factores o elementos del medio físico que componen a la cuenca del río Chapingo

3.1 Localización geográfica

La cuenca del río Chapingo forma parte de la zona denominada Vertiente Oriental del Valle de México o Cuenca del Lago de Texcoco, que a su vez forma parte de la Gran Cuenca de México. Cuenta con un área total de 1729.71 ha, nace en el municipio de Texcoco de Mora, el cual se ubica en la parte este del Estado de México, colinda al norte con Tepetlaoxtoc, Papalotla, Chihuahuala, Chiconcuac; al sur con Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca; al oeste con Atenco y al este con los estados de Tlaxcala y Puebla (Figura 8).

El río Chapingo tiene su origen en una serie de torrentes que, con dirección al Norte, bajan de los cerros Tearco y Tecorral, desde una altitud del orden de los 3,500 m.s.n.m. Los anteriores cerros pertenecen al accidente orográfico denominado Sierra de Quetzaltepec. Las corrientes se unen a la cañada de Carcases, donde forman el arroyo Tepetlaya, este sigue una dirección al nor-Noroeste, para recibir una pequeño afluente derecho de nombre arroyo Almeya; a partir de este corrige su curso al Oeste y se le conoce como río Chapingo, el que pasa al Sur de la población de Tequexquináhuac, Estado de México, y más adelante, por San Luis Huexotla y San Mateo Huexotla. Río abajo cruza la carretera federal México- Texcoco, penetrando a continuación por una zona dedicada a la agricultura; en este tramo, su cauce se encuentra canalizado. Finalmente descarga a la zona del ex -vaso de Texcoco.

Figura 8. Mapa de localización de la cuenca del río Chapingo



3.2 Clima

Con base a información de la CONABIO y del Atlas del Estado de México, los grupos climático predominantes en la cuenca del río Chapingo son los que se mencionan a continuación.

Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media c (w1) (w).

Es un clima intermedio en cuanto a humedad con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5. Abarca una franja del norte, otra del centro norte y más del este que representan 5.7% de la superficie estatal y se localizan más o menos siguiendo el contorno boreal del clima templado subhúmedo de mayor humedad. La precipitación total anual suma entre 600 y 800 mm y la temperatura media anual fluctúa entre 12° y 18° C.

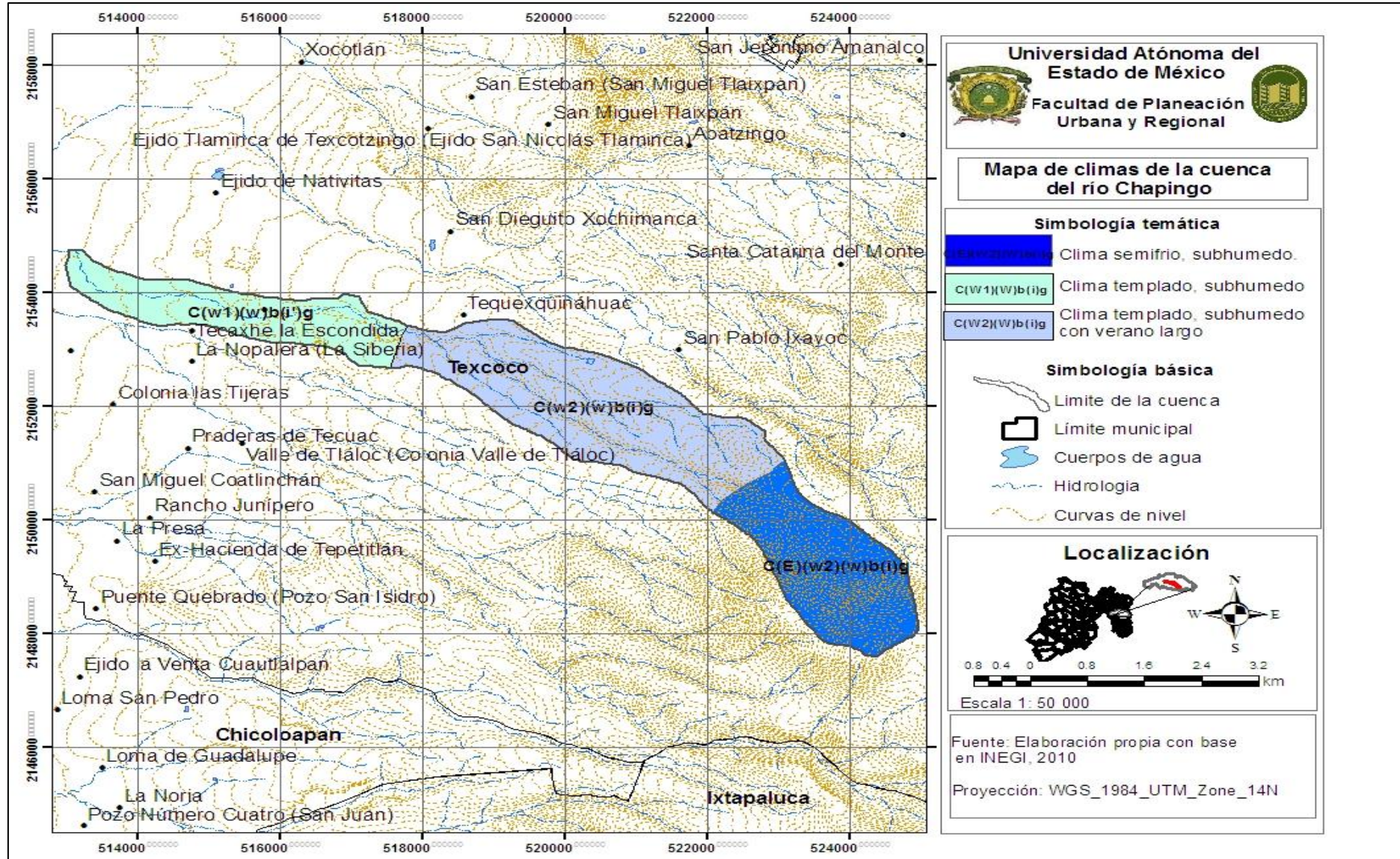
Templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad c (w2) (w)

Es el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, su precipitación invernal, es decir, la ocurrida en los meses de enero, febrero y marzo, corresponde al menos de 5% de la lluvia total anual. Es el clima a más importante de la entidad ya que ocupa 46.7% se encuentra en terrenos cuya altitud va de 1800 a 2700 m. en las cuales la precipitación total anual es mayor de 700 mm y la temperatura media anual varía de 12° a 18° C

Semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad c (e) (w2) (w)

Es el más húmedo de los climas semifríos subhúmedos con lluvias en verano, su precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor de 5. La precipitación total anual en esta zona es mayor de 800 mm y la temperatura media anual varía de 5° a 12° C.

Figura 9. Mapa de climas de la cuenca del río Chapingo



Como es de observarse el clima predominante en la cuenca del río Chapingo es el templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad. Se localiza en la zona media de la cuenca cerca de las localidades de Tequexquináhuac y San Pablo Ixayoc. En este clima la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano.

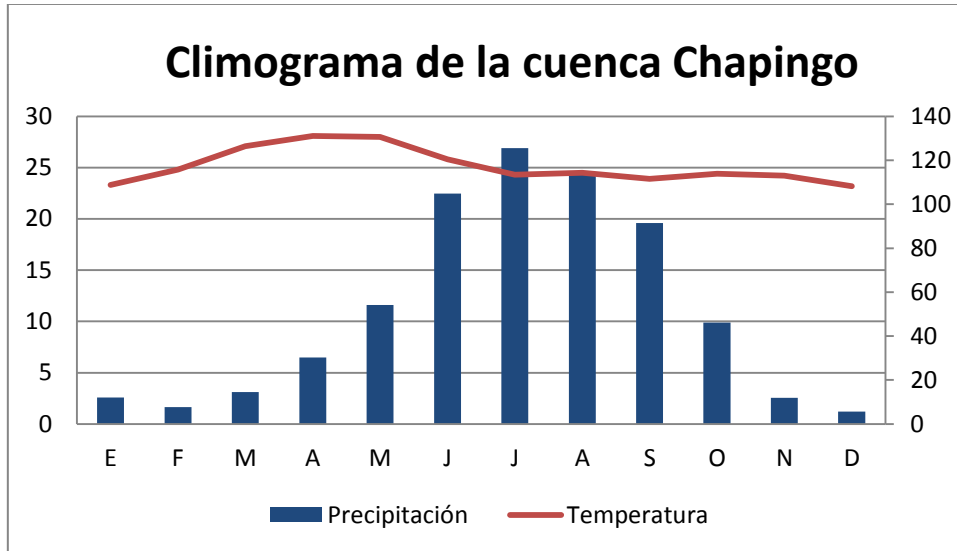
Por otra parte, el clima más frío es el semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad y se localiza en la zona alta de la cuenca donde la altitud es de hasta 3500 msnm, es aquí donde nacen los afluentes del río Chapingo. Por último, el clima templado, subhúmedo (humedad moderada), de verano largo, este tipo de clima se localiza en la parte baja de la cuenca, donde predomina el uso urbano, algunas localidades de esta zona son La nopalera y Tecaxhe la escondida.

De acuerdo a los datos de temperatura y precipitación de las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional en el período de 1959 a 2010, la temperatura máxima se registró en el mes de abril y fue de 28.1 °C. La temperatura mínima se reporta en enero y fue de 23.3. Los niveles máximos de precipitación se alcanzan en el verano y fue de hasta 125.5 mm. Es importante conocer los valores de precipitación ya que a partir de ellos se obtiene el factor de erosividad de la lluvia o la capacidad de la lluvia para provocar erosión. De acuerdo con el climograma la mayor intensidad de precipitación se dan de junio a septiembre, por lo que los efectos de la erosividad de la lluvia se presentan en verano.

Cuadro 3. Precipitación anual en la cuenca de acuerdo a estaciones climatológicas.

ESTACIÓN	COORDENADAS		PRECIPITACIÓN ANUAL
Chapingo	19°29'05" N	098°53'11" W	618.3
Coatepec de los Olivos	19°23'05" N	098°50'46" W	648.7
San Miguel Tlaixpan	19°31'10" N	098°48'45" W	590.2
El Tejocote	19°26'36" N	098°54'10" W	561.4
Texcoco(SMN)	19°31'00" N	098°53'00" W	696.9
Tepetlaoxtoc	19°33'00" N	098°49'00" W	615.1
Ixtapaluca	19°19'02" N	098°52'56" W	632.7
Tlalpitzahuatl	19°19'54" N	098°52'12" W	614.0
Río Frío (Ixtapaluca)	19°21'09" N	098°40'11" W	972.0
San Juan Totolapan (Tepetlaoxtoc)	19°31'47" N	098°43'36" W	560.6
Santa Rita Tlahuapan (Puebla)	19°20'47" N	098°34'53" W	855.6

Figura 10. Climograma de la cuenca



Fuente: Elaboración propia con base a datos climáticos de CNA (2015)

3.3 Suelos

Según la información de la Comisión Nacional para la Biodiversidad y la carta edafológica del INEGI (2010), los suelos que caracterizan a la cuenca Chapingo son cambisol éutrico, feozem y feozem háplico, de los cuales el feozem es el predominante tal como lo indica el mapa de la figura 9. A continuación se describen cada uno de ellos.

Feozem.

Son suelos aptos para la agricultura en condiciones de clima templado; presentan una marcada acumulación de materia orgánica y nutrientes; son de fácil manejo y alcanzan un alto grado de productividad agrícola; son susceptibles a la erosión moderada y alta; se encuentran en zonas de acumulación de materiales en áreas de poca pendiente. Están presentes en Texcoco y en la porción sur de Tepetlaoxtoc.

Feozem háplico.

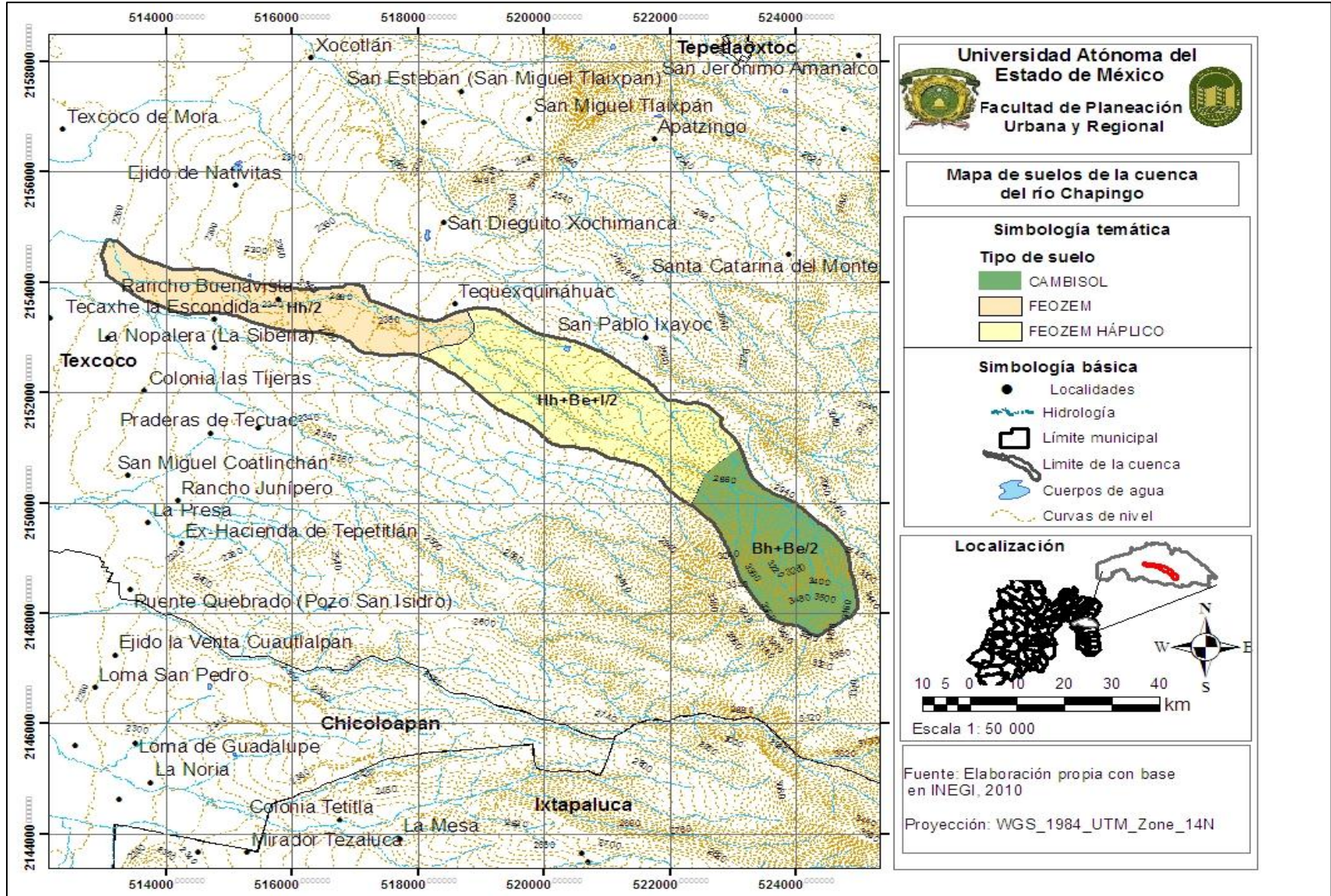
Tiene un horizonte A mólico, con una reacción nula al fluoruro de sodio (Na⁺) y al ácido clorhídrico (HCl) diluido y puede presentar un horizonte C o B cámbico. Este tipo de feozem es el más fértil al uso agrícola y el más abundante.

Cambisol éutrico.

Son suelos jóvenes, de características poco definidas; se presentan en diferentes condiciones topográficas y climáticas; son moderadamente aptos para la agricultura; muestran una capa superficial de color claro, pobre en material orgánico y pueden presentar una ligera acumulación de arcillas y carbonatos. Presenta un horizonte A ótrico y un horizonte B cámbico con un porcentaje de saturación de bases de 50% o más, por lo que su contenido de nutrientes puede ser abundante. De acuerdo con estas características su fertilidad al uso agrícola varía de moderada a alta. La unidad de suelo cambisol está presente en la parte oriente de la cuenca, del municipio de Texcoco y Tepetlaoxtoc, particularmente en lo que corresponde a la Sierra de Río Frío.

La importancia que tiene el conocer las unidades de suelo de la cuenca es que da la pauta para determinar de acuerdo a las características físicas como textura, permeabilidad y estructura, la susceptibilidad que tiene el suelo a ser erosionado, lo que se denomina como factor *K* o factor de erodabilidad para la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. En este caso el Feozem presenta una susceptibilidad a la erosión moderada y alta.

Figura 11. Mapa de edafología de la cuenca del río Chapingo



3.4 Geología

De acuerdo con el Atlas General del Estado de México, las rocas más recientes de la cuenca Chapingo, consisten en rocas ígneas o volcánicas de la época Plioceno-Holoceno de la era Cenozoica, con una edad de entre 37 y 10 millones de años de antigüedad. Este tipo de rocas son de composición clástica, andesítica y basáltica, con depósitos piroclásticos y sedimentos fluviales y lacustres producidos simultáneamente con el vulcanismo. Como ejemplos de este tipo de rocas están: andesita, tobas, brecha, basaltos, riolitas y dacitas. Los edificios volcánicos más notables que caracterizan a la provincia del eje Neovolcánico Transversal son los estratovolcanes ubicados en el complejo de la Sierra de Río Frío y constituyen algunos de los volcanes más altos del país (Figura 10).

Con relación a la minería, la zona de estudio pertenece al distrito minero de Texcoco-Ixtapaluca, en el cual destaca el municipio de Texcoco. Este distrito abastece de materiales pétreos a un importante mercado de la zona oriente del Distrito Federal y a municipios aledaños. Las sustancias minerales con que cuentan los municipios de la zona de estudio consisten en: arena, cantera, grava, tepetate y tezontle.

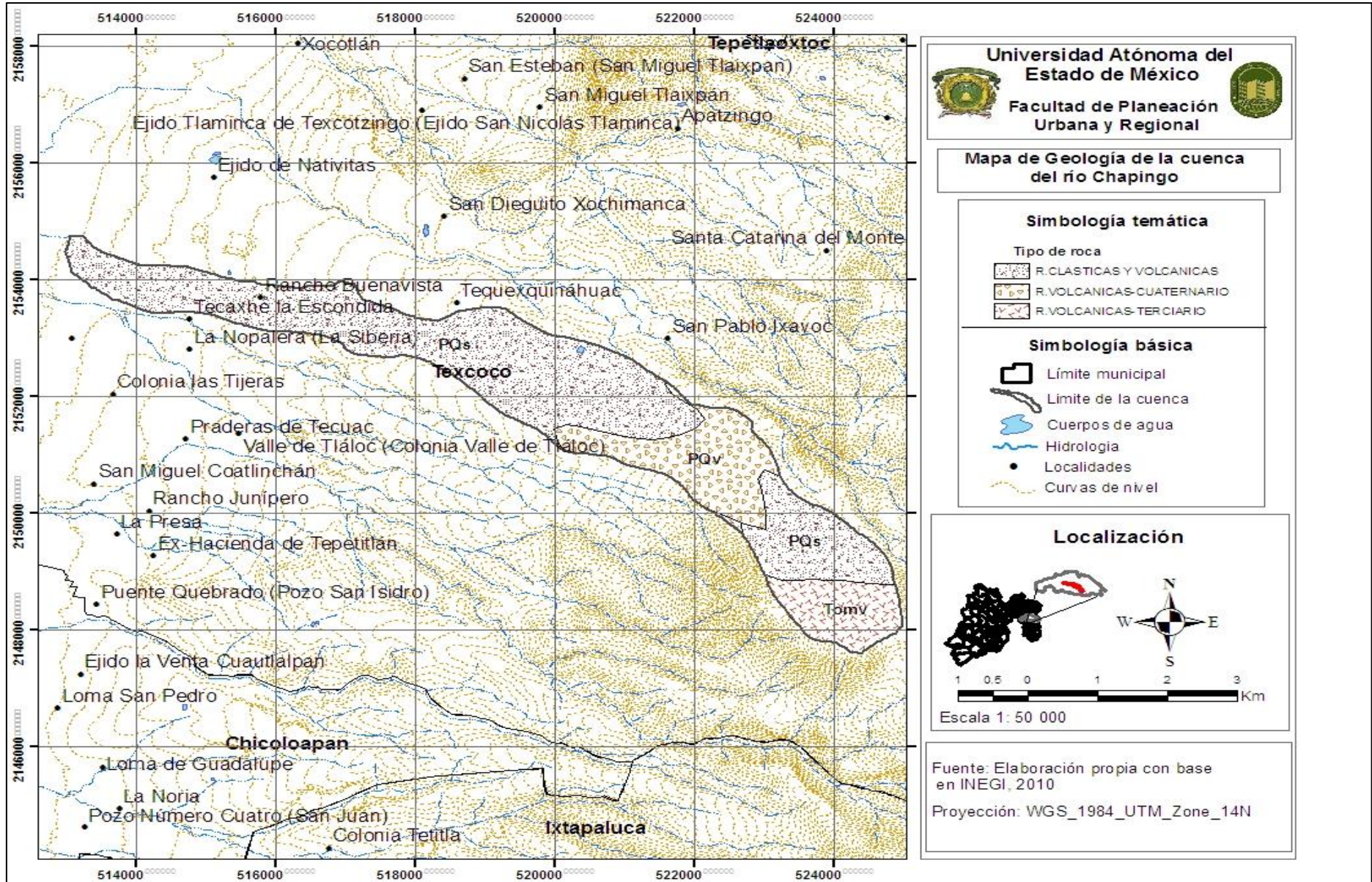
TS (A) Andesitas

Representan las diferentes unidades del terciario superior que se exponen en el área; las hay lamprobolita, de piroxenos, cuarzo. La unidad incluye algunos vitrificados andesíticos y en los estratovolcanes brechas andesíticas. Las andesitas son por lo general de textura merocrystalina porfídica con fenocristales de plagioclasia y ferromagnesianos. En su superficie fresca son de color gris con tonos claros, oscuros y rosas; intemperizan a tonos ocre. Las andesitas están dispuestas generalmente como coladas de bloques, algunos son vesiculares, sobre todo las más básicas, en ocasiones se presentan fracturadas en lajas.

Ts (Bs) Brechas sedimentarias

Representan los depósitos acumulados a pie de las edificaciones volcánicas (lahares), la unidad está constituida por fragmentos angulosos de andesitas porfídicas en una matriz arenosa de grano medio, en ocasiones piroclástica; los fragmentos tienen un rango granulométrico que va desde gránulos hasta bloques.

Figura 12. Mapa de geología de la cuenca del río Chapingo



3.5 Regionalización fisiográfica

La cuenca Chapingo se encuentra enclavada en el sistema orográfico de la provincia del Eje Volcánico Transversal y la subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac. El relieve característico es montañoso y accidentado hacia el lado de la Sierra de Río Frío y la Sierra Platachique; los lomeríos se ubican hacia las zonas bajas de estas sierras y las planicies en lo que fuera el Lago de Texcoco (GEM, 1993). Actualmente en las planicies se encuentran asentamientos de las localidades de Tequexquináhuac, San Pablo Ixhayoc, Rancho Buenavista entre otras, donde predomina la actividad minera y agrícola. Ver figura 13

.Hacia el lado oriente del municipio de Texcoco se encuentra la Sierra de Río Frío, la cual representa la barrera divisoria entre el Estado de México y los estados de Tlaxcala y Puebla. En el cuadro 4 se muestran las elevaciones más importantes.

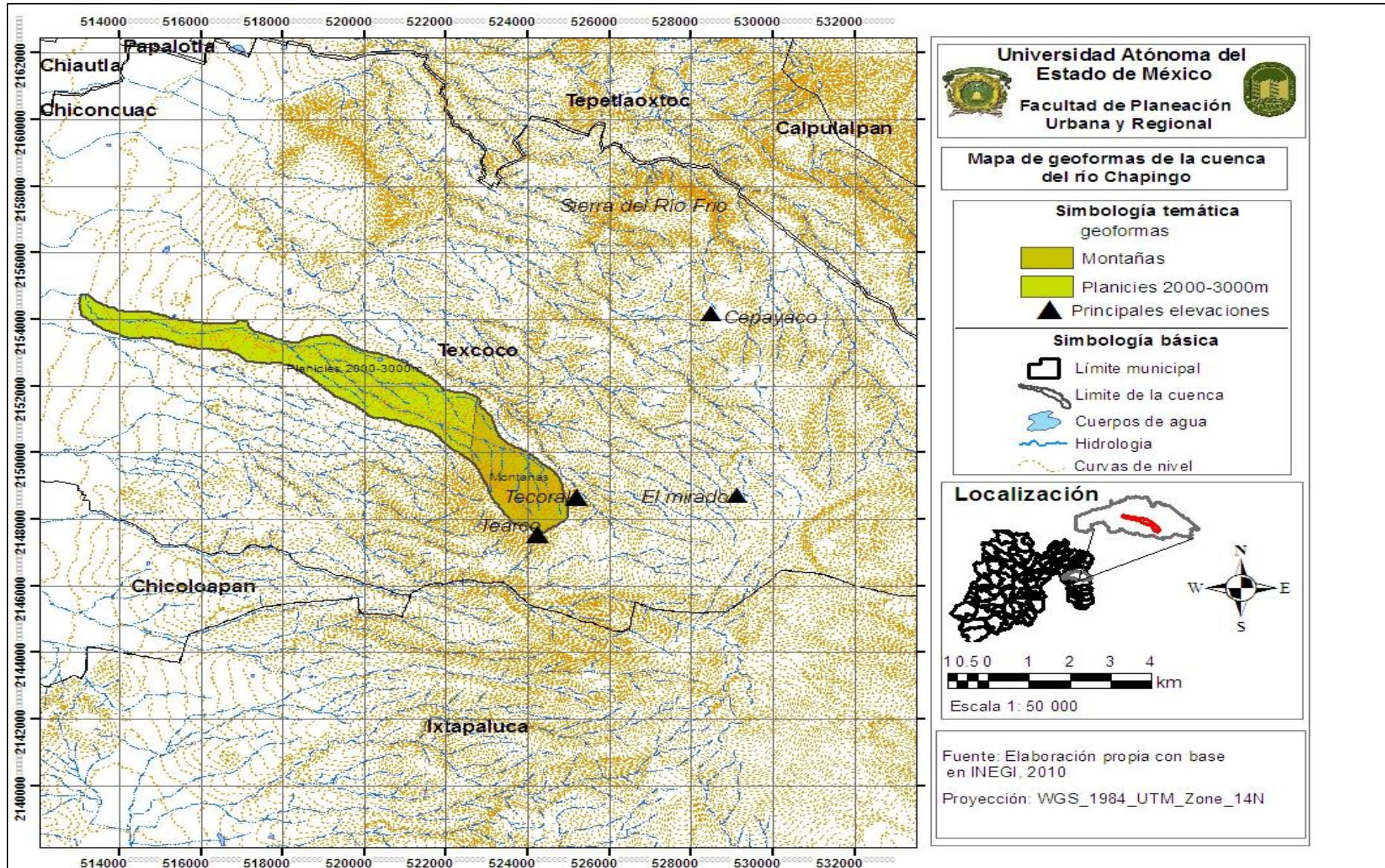
Cuadro 4. Principales elevaciones circundantes a la cuenca del río Chapingo.

Elevación	Ubicación	Altitud (msnm)	Municipio
El mirador	Sierra de Río Frío	4,100	Texcoco
Cepayaco	Sierra de Río Frío	3,800	Texcoco
Cuajio	Sierra Platachique	2,700	Tepetlaoxtoc
Tezontlale	Sierra Platachique	2,500	Tepetlaoxtoc

Fuente: Dirección de Diagnóstico Ambiental, con información del Atlas General del Estado de México (1993)

La topografía del terreno también es un factor determinante para la erosión hídrica. Éste factor se denomina factor de longitud y grado de pendiente (*LS*). Entre más accidentado sea el paisaje mayor será la erosión hídrica, ya que ésta se presenta en laderas, y sus formas se pueden presentar en deformación del paisaje como presencia de cárcavas, canalillos, deslaves, entre otras.

Figura 13. Topoformas de la zona de estudio.



3.6 Hidrología

El río Chapingo se localiza dentro de una de las regiones hidrológicas más importantes del país, tanto por su extensión como por el volumen de sus corrientes superficiales: la Región Hidrológica 26 Río Pánuco (RH26), dentro de la cual se ubica la cuenca Río Moctezuma. Durante el recorrido de las corrientes de agua principales sobre el territorio, éstas son recargadas por corrientes tributarias, pequeños afluentes que escurren de manera independiente denominadas subcuencas tributarias. Dentro de la zona de estudio, se presenta una subcuenca tributaria a la RH26, denominada Vaso de Texcoco.

Las subcuencas son de gran importancia para su estudio y manejo en la planificación de sistemas de potabilización, ubicación de asentamientos humanos, almacenamiento y distribución de agua para riego y prevención de desastres por inundaciones. Básicamente la hidrología tiene su origen en los escurrimientos provenientes de la zona montañosa de la Sierra de Río Frío en donde nacen los ríos Hueyapa y el San Bernardino.

Los Órganos se origina en la Sierra Platachique. Estas corrientes reciben descargas de aguas residuales de uso doméstico. Por otra parte, existen manantiales con buena calidad de agua formados por los escurrimientos que descienden de la zona montañosa, entre los más conocidos están los llamados Ateshcaque

La cuenca del río Chapingo abarca una elevación de 2400 msnm hasta 3800 msnm, es drenada por un conjunto de corrientes intermitentes pequeñas presentando un patrón de drenaje dentrítico subparalelo. Tiene una orden de corrientes de cuatro (Figura 14).

3.7 Hidrología subterránea

La subcuenca pertenece a la zona de explotación 9-01 Valle de México, donde el acuífero está constituido por sedimentos lacustres y aluviales intercalados con cenizas volcánicas que cubren derrames básicos e intermedios y conglomerado calcáreo.

El tipo de material que constituye al material rocoso determina el nivel de permeabilidad y capacidad de infiltración de la lluvia. En este sentido, la subcuenca se

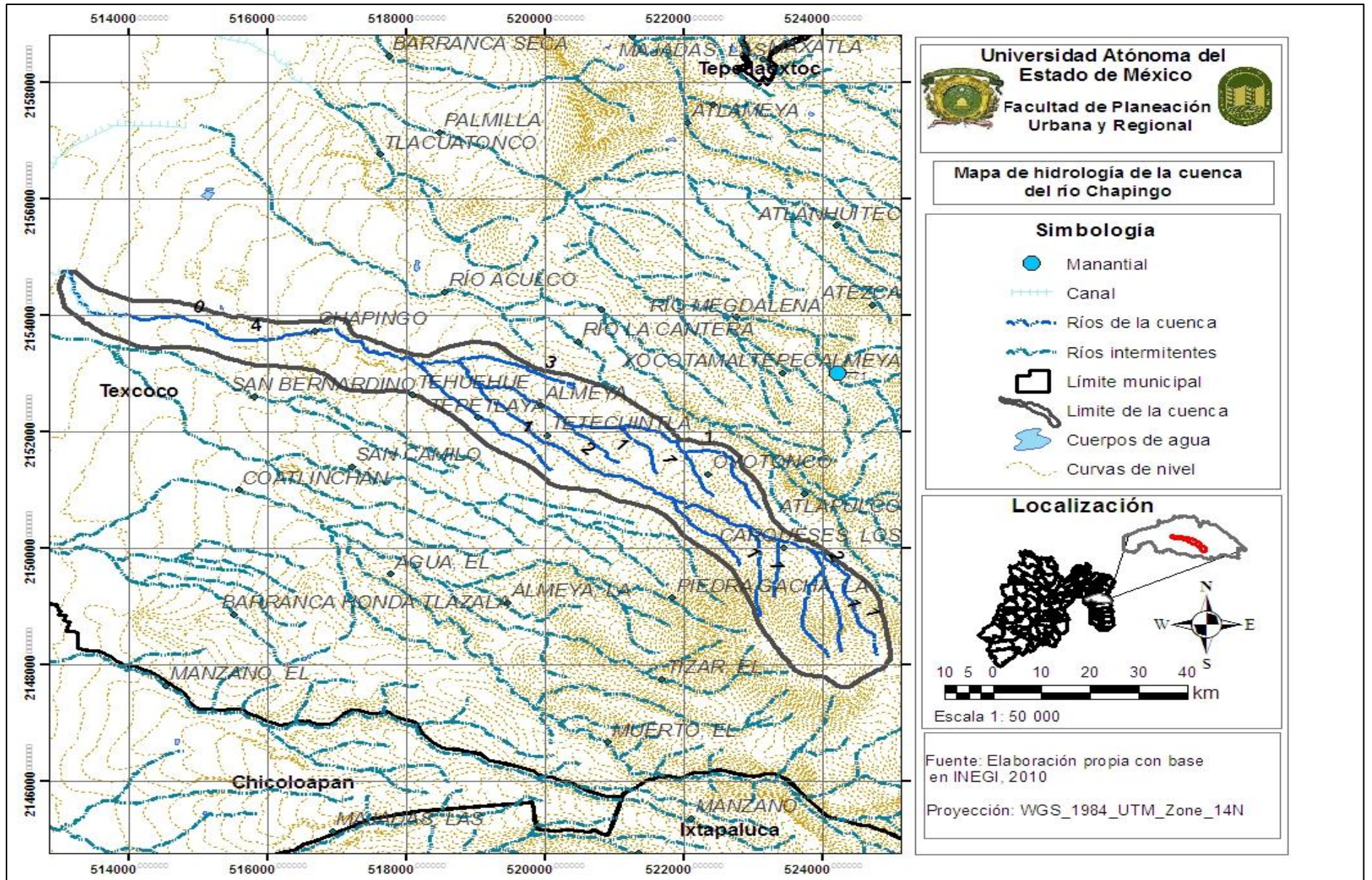
caracteriza principalmente por una unidad de material consolidado con permeabilidad media.

Las unidades de permeabilidad se refieren a la capacidad que tienen las rocas y materiales granulares para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea a través de ellas.

Unidad de material consolidado con permeabilidad media.

Esta unidad presenta un fracturamiento moderado, acusando disolución química, con estratos que varían de delgados a masivos. Se clasificó con permeabilidad media a las andesitas del Terciario superior que forman las coladas masivas.

Figura 15. Mapa de hidrología de la cuenca del río Chapingo



3.8 Uso del suelo y vegetación

a) Uso de suelo

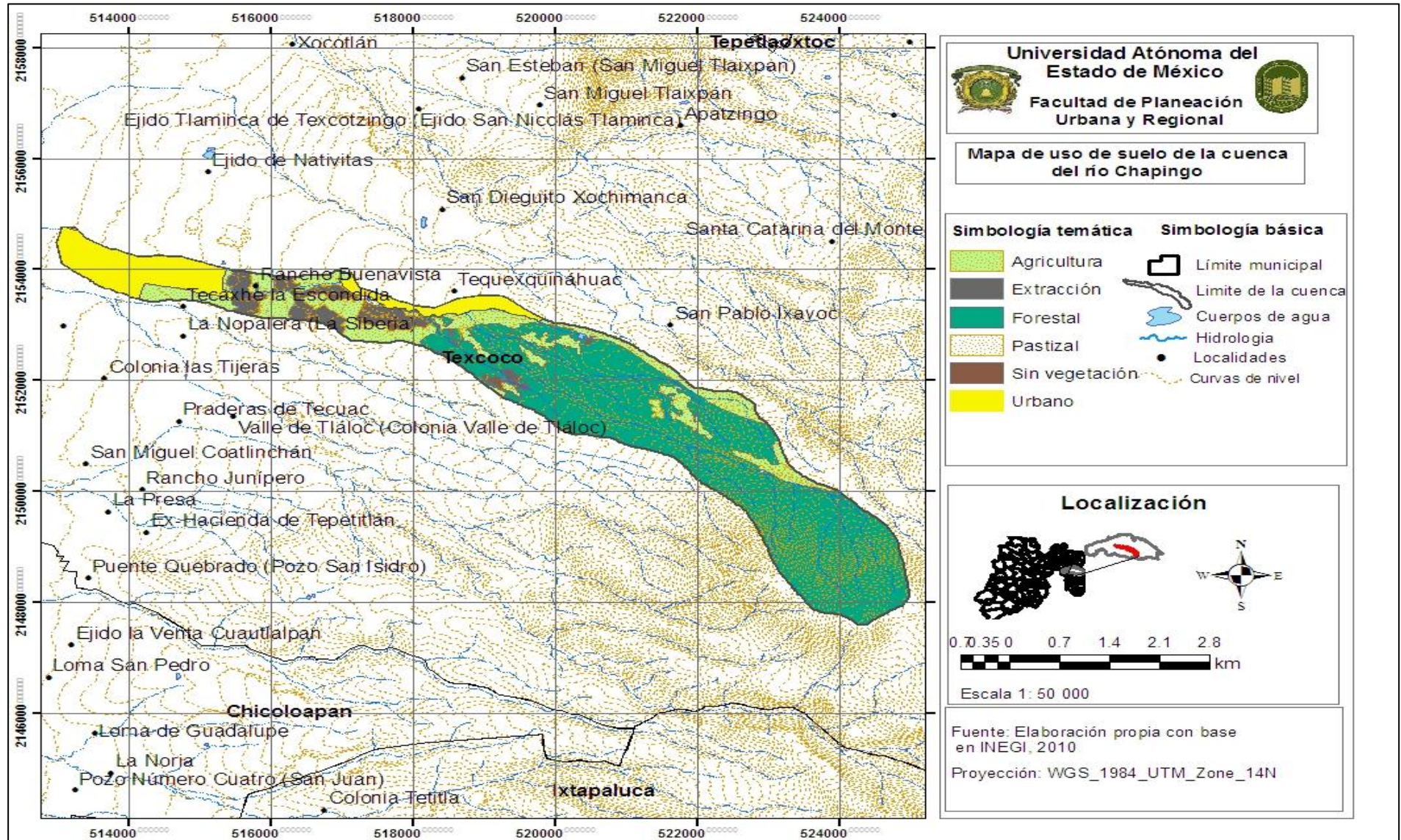
El principal uso de suelo en la cuenca es el uso agrícola ya sea de riego, temporal y algunas producciones en invernaderos son característicos de esta zona, cerca de San Pablo Ixayoc y Tequexquináhuac. Posteriormente le sigue el uso urbano y el minero. En el cuadro 5 y en la figura 16 se puede observar los usos de suelo de la cuenca y la cobertura de cada uno de ellos.

Cuadro 5. Uso de suelo y vegetación

Cobertura y uso de suelo	Superficie (ha)	Porcentaje
Agricultura	603.73	34.90
Area urbana	242.28	14.01
Forestal	248.22	14.35
cuerpos de agua	101.7	5.88
Extracción de materiales pétreos	214.49	12.40
Pastizal	196.34	11.33
Suelo desnudo	124.03	7.170
Total	1729.71	100.00

Fuente: elaboración propia con base a imagen de satélite.

Figura 16. Mapa de uso de suelo.



b) Vegetación

Con respecto a la vegetación y de acuerdo a la información de la carta de uso de suelo y vegetación escala 1: 50,000 del INEGI (2005), los tipos de vegetación existentes en la cuenca del río Chapingo son los siguientes:

Bosque de oyamel.

El bosque de oyamel está conformado por árboles altos, a veces mayores de 30m las masas arboladas, pueden estar conformados por elementos de la misma especie o mixtos acompañados por diferentes especies de coníferas y latifoliadas; se desarrolla a altitudes entre 2400 y 3400m; prospera en suelos de tipo andosol y cambisol con profundidad variable, bien drenados, ricos en materia orgánica y húmedos durante buena parte del año, los climas donde se encuentran es semifrío subhúmedo con lluvias en verano con precipitaciones anuales en promedios que fluctúan de 1000 a 1400 mm, con temperaturas muy frescas en el año de 7 a 14 °C promedio. Este bosque está dominado por elementos arborescentes del género *abies*, con una altura de 20 a 40 m, la vegetación herbácea en el sotobosque es muy escasa, pero aumenta con el excesivo disturbio al clarear espacios y permitir iluminación.

Además del disturbio por tala inmoderada, estos bosques han disminuido su extensión a causa de los incendios y el pastoreo desordenado.

Bosque de pino

Es una comunidad siempre verde constituida por pinos los cuales se encuentran asociados con encinares y otras especies. Los bosques de pino y de coníferas en general constituye el recurso forestal por excelencia. La vegetación está dominada por diferentes especies de pino que alcanzan una altura promedio de 15 a 30m, los pinares tienen un estrato inferior relativamente pobre en arbustos pero abundante de gramíneas amacolladas, esta condición se relaciona con los frecuentes incendios y la tala inmoderada.

Gran parte de estos bosques se asientan en las partes altas de las sierras volcánicas del estado, a altitudes de entre 2500 y 4000 metros, crecen sobre suelos profundos tipo andosol o de escaso desarrollo como regosol y cambisol. La precipitación en estos lugares es superior a los 1,000 mm anuales y la temperatura se mantiene entre 8 y 12 °C, estas condiciones son propias de los climas semifríos subhúmedos con lluvias en verano.

Bosque de encino

Comunidad boscosa dominada por diferentes especies de género *Quercus* (encinos o robles), estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar desde 4 hasta más de 30 metros de altura, pueden ser abiertos o muy densos, se desarrollan en muy diversas condiciones ecológicas de casi el nivel del mar hasta los 3000 metros. Se localizan en suelos de tipo feozem de profundidad variable ricos en materias orgánica y nutrientes o bien en suelos clasificados como regosol rendzina y luvisol, ricos en arcillas poco profundos y susceptibles a la erosión.

Se adaptan a varios climas desde los templados subhúmedos y semisecos con lluvias en verano, la temperatura oscila entre 12 y 24 °C con una precipitación anual de 700 a 1200 mm. Este tipo de bosque se caracteriza por tener unas 200 especies a nivel nacional (Rzedowski, 2006)

Pastizal inducido

Es aquel que surge cuando es eliminada la vegetación original. Este pastizal puede aparecer como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación, también puede establecerse en áreas agrícolas abundantes o bien en terrenos que se encuentran.

El uso de suelo y vegetación o cobertura representan el factor *C* de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Este factor es atenuante de la erosión de suelos, en este sentido analizando la vegetación, se puede decir que hay una gran extensión con bosque

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA EROSIÓN POTENCIAL Y ACTUAL EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

En este capítulo se reporta la metodología empleada en el presente trabajo de investigación, y la manera en cómo se calcularon cada uno de los factores que conforman la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por el método de FAO y por el método de SAGARPA. En cada uno de estos métodos se determinó la erosión hídrica potencial y actual de la cuenca del río Chapingo.

Se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) la cual fue propuesta por Wischmeier y Smith en 1965, y que posteriormente FAO la modificó. De la misma manera y dada la complejidad para calcular los factores *L* y *S* de la EUPS, el Colegio de Postgraduados la modificó para contar con un método en México que simplificará su cálculo. Cabe resaltar que este último método fue adoptado como oficial por la extinta Dirección General de Política Agrícola a partir de 1992 (Método SAGARPA).

4.1. Determinación de la erosión potencial y actual a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo consta de seis factores multiplicativos, los cuales influyen en el proceso erosivo. La forma de esta ecuación es la siguiente:

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

Donde:

A= Pérdidas de suelo por erosión en toneladas por hectárea por año (ton/ha/año)

R= Erosividad de la lluvia (Mj*mm/ha/hr/año)

K= Erosionabilidad del suelo

LS= Longitud y grado de pendiente

C= Cobertura vegetal

P= Prácticas mecánicas de conservación de suelos

A continuación se describe la forma en que fueron calculados cada uno de los factores que componen la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS).

4.1.1 Cálculo del factor de erosividad (R)

Desde el punto de vista de precipitación el índice de erosividad de la lluvia es un parámetro estimado a partir de datos de las características de la lluvia que se correlacionan significativamente con las pérdidas de suelo, de acuerdo a Arias (1980) la capacidad potencial es debida a la energía de la lluvia y la intensidad de la lluvia.

Para el cálculo del factor R , en este trabajo se utilizó la modificación del índice de Fournier, propuesto por FAO (1980):

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

Donde:

- R = Erosividad de la lluvia.
- P^2 = Precipitación mensual en mm
- P = Precipitación anual en mm.

Las valoraciones asignadas a R se reportan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Valores asignados a R .

0-50	50-500	500-1000	>1000
Ligero	Moderado	Alto	Muy Alto

Posteriormente se seleccionaron las estaciones climatológicas localizadas tanto dentro como fuera de la cuenca del río Chapingo, y se aplicó el índice de erosividad de FAO para cada una de las estaciones. Una vez obtenido el índice de erosividad R , se procesó dicha información en un Sistema de Información Geográfica, en este caso ArcGis 10.2. Con este programa se llevó a cabo la interpolación de los valores de erosividad obtenidos empleando la herramienta Spline de Spatial Analyst Tools. De esta forma se obtuvo el mapa del factor R en formato raster.

4.1.2 Cálculo del factor de erosionabilidad del suelo (*K*)

Dada la dificultad que existe para calcular el factor de erosionabilidad del suelo por el método original, se optó por emplear un método alternativo propuesto por la FAO (1980) que se basa en las unidades, subunidades y clases textural de los suelos. El método que establece FAO, consiste en multiplicar los valores numéricos asignados a la unidad de suelo y su textura, según la clasificación FAO/UNESCO de las cartas edafológicas del INEGI a escala 1:50,000.

La erosionabilidad por unidad de suelo es clasificada en tres categorías: ligera, moderada y alta, a las cuales se les asigna un valor numérico, como se reporta en el cuadro 7.

Cuadro 7. Valores numéricos de las categorías de erosionabilidad por unidad de suelo.

Categoría de erosionabilidad	Valor numérico
Ligera (I)	0.5
Moderada (II)	1.0
Alta (III)	2.0

Con respecto a la clase textural FAO distingue tres tipos de textura del suelo: fina, media y gruesa, como aparece a continuación y en el cuadro 8.

- 1.- Textura gruesa (< 18% de arcilla y > 65% de arena)
- 2.- Textura media (< 35% de arcilla y > 65% de arena, o < 18% de arcilla y > 82% de arena)
- 3.- Textura fina (<35% de arcilla) o en su defecto la roca madre (fase pedregosa).

Cuadro 8. Valor textural y coeficiente.

Gruesa	0.2
Media	0.3
Fina	0.1
Fase pedregosa	0.5

El factor K , erosionabilidad del suelo, es el producto de multiplicar los valores numéricos de unidad de suelo por los valores numéricos de textura, el resultado es el valor de K de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo. Para las unidades de suelo, cuadro 9, se utilizaron las cartas edafológicas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a escala 1:50 000.

Cuadro 9. Clasificación de las unidades de suelo FAO/UNESCO en tres clases de erosionabilidad.

ORDEN	TEXTURA			ORDEN	TEXTURA		
	G	M	F		G	M	F
A	0.026	0.040	0.013	lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.030	0.013	lv	0.053	0.079	0.026
Ab	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.26	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,b)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C(g,h,b,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F(a,b,o,p,r)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.26	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	I	0.026	0.040	0.013

Gh	0.013	0.020	0.007	lh	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	lm	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	lo	0.026	0.040	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	lv	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	W	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K(h,k,l)	0.026	0.040	0.013	X(b,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
L	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007
Lg	0.026	0.040	0.013	Zc	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Donde la textura se clasifica en: G = gruesa, M = media, y F = fina

Fuente: (FAO, 1980)

4.1.3 Cálculo del factor de longitud y grado de la pendiente (*LS*)

Los efectos de la longitud y el grado o inclinación de la pendiente se representan en la Ecuación Universal de Pérdida del suelo, como *L* y *S*, respectivamente; no obstante y a menudo se evalúan de forma conjunta.

La longitud de la pendiente 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 a un canal bien definido, el cual puede ser parte de una red de drenaje natural, o un canal construido (Arnoldus, 1977).

Para la elaboración de este plano (*LS*) se requirió una carta topográfica donde aparece la red hidrográfica que incluyó todos los órdenes de las corrientes presentes con la ubicación del parteaguas correspondiente.

Simultáneamente se elaboró un plano de rangos de pendientes tomando como base el material cartográfico de la zona. La carta empleada fue la topográfica de la zona, a escala 1:50,000 denominada “Chalco” del INEGI.

Los rangos que se utilizaron se presentan en el cuadro 10.

Cuadro 10. Valores del grado de pendiente.

a	0-5	2.5
b	5-10	7.5
c	10-15	12.5
d	15-20	17.5
e	>20	35.0

El factor L se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$L = \left(\frac{l}{22.1}\right)^m$$

Donde:

- L = Factor de longitud de la pendiente
- l = Longitud media de la pendiente (m)
- m = Exponente

El exponente m depende de la inclinación de la pendiente de acuerdo a los valores del cuadro 11.

Cuadro 11. Valores del exponente m para el cálculo del factor L.

Valor de m	Pendiente (%)
0.2	>1.0%
0.3	1-3.5%
0.4	3.5-5.0%
0.5	5.0-10.0%
0.6	>10%

El factor grado de la pendiente (S) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación y al valor de la pendiente como aparece en el cuadro 12.

$$S = 0.44 + 0.30 s + 0.043 s^2 / 6.613$$

Donde:

- S= Pendiente (%)

Cuadro 12. Resultados del factor S de acuerdo al grado de pendiente.

Rango (%) (valor medio de clase)	Valor de S
a	$S = 0.43 + 0.30 (2.5) + 0.043 (2.5)^2 / 6.613 =$ S= 0.21907
b	$S = 0.43 + 0.30 (7.5) + 0.043 (7.5)^2 / 6.613 =$ S= 0.771019
c	$S = 0.43 + 0.30 (12.5) + 0.043 (12.5)^2 / 6.613 =$ S= 1.648079
d	$S = 0.43 + 0.30 (17.5) + 0.043 (17.5)^2 / 6.613 =$ S= 2.85026
e	$S = 0.43 + 0.30 (35) + 0.043 (35)^2 / 6.613 =$ S= 9.61818

El plano de *LS*, se obtiene al sobreponer el plano de *L* y el de *S* (se multiplican sus valores numéricos de cada uno). Este plano fue escaneado y luego digitalizado en el SIG.

4.1.4 Cálculo del factor cobertura vegetal (*C*)

El factor *C* de la EUPS, representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación, en comparación con la pérdida de suelo que pudiera presentar el mismo terreno estando desprovisto de vegetación y bajo labranza continua. Como se indicó anteriormente en la condición estándar (sin cobertura vegetal y con barbecho continuo, condición extrema en cuanto a favorecer la erosión, el valor de *C* es la unidad y será cada vez menor a medida que haya una cobertura vegetal sobre el terreno, de esta manera los valores de *C* fluctúan entre 0.0 y 1.0, estos valores correspondiente a un terreno totalmente protegido (0.0) y uno totalmente desprotegido (1.0) (Becerra, 2005).

Cabe señalar que no es posible evaluar independientemente los factores de manejo y cobertura debido a que sus efectos están influidos por muchas correlaciones importantes, entre ellas (SARH, 1991) menciona las siguientes:

- La influencia de la rotación de cultivos en la duración de la cobertura vegetal y su efecto residual sobre el suelo.
- Las labores de labranza, que puede dejar la superficie del suelo con o sin residuos de la cosecha anterior; asimismo, pueden dejarla con diversos grados de rugosidad.
- La eficiencia de los residuos vegetales en el control de la erosión depende de la cantidad disponible de los mismos.
- La eficiencia de un cultivo para evitar la erosión depende de cuánta lluvia erosiva ocurra durante los distintos períodos de crecimiento del cultivo.

De acuerdo con lo anterior, y considerando que los cambios en la cobertura efectiva desarrollada por los cultivos es gradual a través del año, para calcular los valores de *C* en los cultivos, el año se divide en períodos de crecimiento definidos, asumiendo, para simplificación, que tal cobertura es uniforme en cada período, y considerando la

interacción entre la cobertura vegetal y la erosividad de la lluvia. Convencionalmente se distinguen cinco períodos, los cuales corresponden al mismo número de fases de cultivo. Como la duración de éstas varía para los diferentes cultivos, las fechas de inicio y término de los períodos deben ser establecidos para cada caso particular, como se muestra en el cuadro 13.

Cuadro 13. Períodos convencionales en el ciclo de cultivo para el cálculo del factor C.

Período	Descripción
F Barbecho bruto	Desde la labranza hasta la siembra
1 Siembra	De la preparación de la de siembra hasta un mes después de la siembra
2 Implantación	Un mes a partir del período anterior
3 Crecimiento y maduración	Desde el final del período anterior hasta la cosecha
4 Residuo	Desde la cosecha hasta la labranza

Fuente: (Mitchell & Bubenzer, 1984)

Para calcular el valor de C , es necesario determinar por un lado, el porcentaje de erosividad anual correspondiente a cada uno de los períodos arriba indicados, y por otro, la porción de C correspondiente a la cobertura presente en esos mismos períodos. Con el producto de ambos valores, expresados en fracción unitaria, se obtiene el valor de C para cada período de cultivo en cuestión, y la suma de esos valores parciales será el valor anualizado del factor C (Becerra, 2005). La estimación del valor de C debe hacerse para cada sistema de cultivo cuando se pretende una buena precisión, lo que lo hace complejo. No obstante, para propósitos de planeación en aquellos casos donde se carece de la información detallada requerida, se pueden utilizar los valores generalizados, reportados en tablas por diversos autores. Existe un procedimiento para calcular C para un cultivo y sistema de manejo dado con relación a un patrón de lluvia. Tablas regionales de valores de C son disponibles en la literatura así como para las condiciones de sitios de construcción, pastizales y bosque. Valores de C universalmente no válidos no existen, por la gran variedad de cultivos, secuencias y rotaciones de cultivos y manejos, sería necesaria la evaluación de valores de C experimentalmente en condiciones locales. Con el uso de tablas de referencia de la literatura especializada en

donde el producto de ensayos experimentales de algunas regiones se han compilado valores del factor C (cuadro 14) (Martínez, 2010).

Cuadro 14. Valores de factor de cobertura vegetal (C)

Cultivo y Práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso	0.001
Sabana o pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbácea sobrepastada	0.1
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02 – 0.20
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.23 – 0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soja	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuete	0.30 – 0.80
Palmera, cafeto, cocotero con cobertura vegetal	0.10 – 0.30
Piña cultivada a nivel, con retirada de residuos	0.10 – 0.40
Piña cultivada a nivel, con residuos en superficie	0.01
Patata, surcos según la pendiente	0.20 – 0.50
Patata, surcos transversales a la pendiente	0.10 – 0.40
Caupi (judía de vaca)	0.30 – 0.40
Fresa con cobertura de mañas hierbas	0.27
Granado con cobertura de malas hierbas	0.08
Granado limpio de malas hierbas	0.56
Tef (Eragrotis tef)	0.25
Caña de azúcar	0.13 -0.40
Ñame	0.40 – 0.50
Guisante de angola	0.60 – 0.70
Judía mungo	0.04
Pimiento	0.33
Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano: después de la primera recolección	0.05 – 0.10
Papaya	0.21

La evaluación de este factor resulta difícil, al tener que integrar las características de cada sistema agrícola, para determinar su valor hay que conocer las prácticas agrícolas habituales, su secuencia y la duración de cada una de ellas a lo largo del año. Los períodos en el ciclo de un cultivo son: suelo desnudo (barbecho) desde que se labra hasta la siembra.

4.1.5 Determinación de la erosión potencial y actual de pérdida de suelo

El plano de erosión potencial se calculó al multiplicar los factores, R , K , $L S$, sin incluir el factor C . Como resultado de esto, se obtuvo en forma cuantitativa la representación de la erosión en la cuenca, si ésta estuviera desprovista de vegetación. Las clases de erosión, al igual que en el plano de erosión actual, se agruparon de acuerdo a FAO (1998), tal como se muestra en el cuadro 15.

Cuadro 15. Rangos propuestos por FAO para la cartografía del estado actual y potencial

Estado Actual de Erosión	Pérdida de Suelo	
	Ton/ha/año	mm/año
Ninguna a Ligera	<10	<0.6
Moderada	10-50	0.6-3.3
Alta	50-200	3.3-13.3
Muy Alta	>200	>13.3

Mientras que el estado actual de erosión se obtiene al considerar todos los factores calculados anteriormente. Así entonces se multiplicaron los planos de R , K , LS , y C en formato raster, con ayuda de la función Raster calculator de ArcGis 10.2.

El plano resultante de esta multiplicación representa en forma cuantitativa el estado actual de erosión de cada una de las nuevas áreas formadas, no obstante, para fines de planeación, se recomienda una agrupación de los valores de acuerdo al cuadro 15.

4.2 Determinación de la erosión por el método de SAGARPA.

Con este método se procedió a calcular los valores de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, sin embargo no se calculan todos los factores sino solo los de R y K , y a partir de un razonamiento matemático se obtiene LS .

Los factores R y K , se obtuvieron de acuerdo al método FAO, y se estimaron solo una vez para los dos métodos que se están comparando en el presente trabajo de investigación. La diferencia consiste en LS , y en el siguiente apartado se reporta su procedimiento.

4.2.1 Estimación indirecta del factor de longitud y grado de pendiente (LS)

La estimación indirecta del factor de longitud y grado de pendiente se fundamenta de acuerdo a SAGARPA, en el siguiente razonamiento:

La erosión potencial de un sitio está definida por la combinación de factores de erosividad de la lluvia (R), Erosionabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L) y por la inclinación o gradiente de la pendiente (S); dada por la siguiente expresión:

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

Con base a lo anterior se ha tomado como definición que los terrenos altamente erosionables son aquellos que su tasa de erosión llega a ser ocho veces mayor a la tasa de formación de los suelos, la cual se considera de 20 ton/ha/año promedio nacional, que equivale a tener una pérdida de 2 mm de suelo por ha/año (Figueroa y otros, 1991).

Al involucrar el concepto de terreno altamente erosionable, como criterio de definición de áreas estratégicas de atención, el factor de pérdida de suelo dentro de la EUPS puede ser sustituido por el valor de $8T$, siendo equivalente a tener la siguiente igualdad algebraica, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = RKLS * CP = 8T$$

Esta sustitución implica que, no interesa saber directamente el valor de la erosión actual dentro de un área en la que será establecida una estrategia de conservación, lo que interesa saber es qué práctica de conservación se puede implementar en esa zona para reducir los niveles de erosión actual hacia tasas de erosión en los que exista sostenibilidad del recurso suelo.

De la ecuación anterior se pueden hacer las siguientes consideraciones para conocer la erosión potencial, para esto se considera que el valor de los factores C y P son iguales a la unidad, lo que implica tener un terreno desnudo bajo barbecho continuo, y sin prácticas de conservación, con lo que la relación se reduce a:

$$8T = RKLS$$

De la ecuación anterior se conoce el valor de $8T$ (160 ton/ha/año), los valores de R (erosividad de la lluvia) y K (Erosionabilidad del suelo) se determinan a detalle dentro del estudio y son valores conocidos, se puede despejar a LS tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$LS = 8T/RK$$

Hasta este punto se obtienen valores que varían desde cero, en zonas con alto potencial de erosividad de la lluvia y alta erosionabilidad del suelo, hasta valores cercanos a 8 en sitios donde la agresividad de la lluvia es baja o en casos donde el suelo presenta alta resistencia a la erosión. De aquí se desprende la existencia de valores mayores y menores de la unidad, dentro de los cuales se presentan en el Cuadro 16.

Los valores de L y S generados con esta metodología, proporcionaron un criterio de definición de las áreas prioritarias de atención, a la vez que es posible realizar una jerarquización de las actividades de conservación en función de la potencialidad productiva del terreno y por el valor económico y social que estas áreas representan.

Cuadro 16. Valores para establecer estrategias de conservación de acuerdo a RK .

Si $LS > 1 \Rightarrow 8T > RK$	La erosión provocada por el producto RK es menor del valor considerado como límite para definir terrenos altamente erosionables, por lo que no existen problemas de erosión evidentes que requieran atención inmediata ya que la tasa de formación del suelo es mayor que la tasa de erosión de una zona en particular.
SI $LS = 1 \Rightarrow 8T = RK$	Este es el punto de equilibrio en la definición de un terreno altamente erosionable, lo que implica que la erosión provocada por el producto RK es equivalente a 160 ton/ha/año, es decir se está perdiendo lo que se forma.
SI $LS < 1 \Rightarrow 8T < RK$	La tasa de formación del suelo ($8T$) no es suficiente para sustituir las remociones de suelo provocada por RK , por lo que a estos valores se les debe considerar como áreas prioritarias para el establecimiento de estrategias de conservación.

4.3 Erosión media ponderada y tasa de aporte de sedimentos

Para conocer el valor de pérdida de suelo en la cuenca, como un área global, se procedió a calcular la erosión media ponderada. La fórmula a emplear es la siguiente:

$$E = \sum_{n=1}^{\bar{n}} A_p * X/At$$

4.3.1. Tasa de aporte de sedimentos

Si se compara el valor de la erosión con los sedimentos producidos en pequeñas áreas, probablemente ambos tengan el mismo valor o muy semejante, sin embargo al incrementarse el área de drenaje existe una mayor sedimentación de partículas de suelo en el recorrido de los escurrimientos y consecuentemente hay mayor diferencia entre la erosión y la producción de sedimentos: la relación que existe entre la erosión y producción de sedimentos se denomina tasa de aporte o entrega de sedimentos.

Según Robinson, mencionado por Velázquez (1984), en una cuenca de las dimensiones de la que está bajo estudio le corresponde una tasa de entrega de sedimentos de 0.13, como se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Efecto del área de la cuenca en la tasa de entrega de sedimentos.

Área de la cuenca (km ²)	Tasa de entrega de sedimentos
0.1	0.53
0.5	0.39
1.0	0.35
5.0	0.27
10.0	0.24
50.0	0.15
100.0	0.13
200.0	0.11
500.0	0.085

Fuente: Robinson (1977)

CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se reportan los resultados obtenidos de la aplicación del método de FAO y el método de SAGARPA, con el propósito de conocer la pérdida de suelo potencial y actual en la cuenca del río Chapingo. Además de hacer una comparación entre ambos métodos alternativos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

5.1 Método de FAO para calcular la EUPS.

A continuación se presentan los resultados para cada uno de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

5.1.1 Factor R o erosividad de la lluvia.

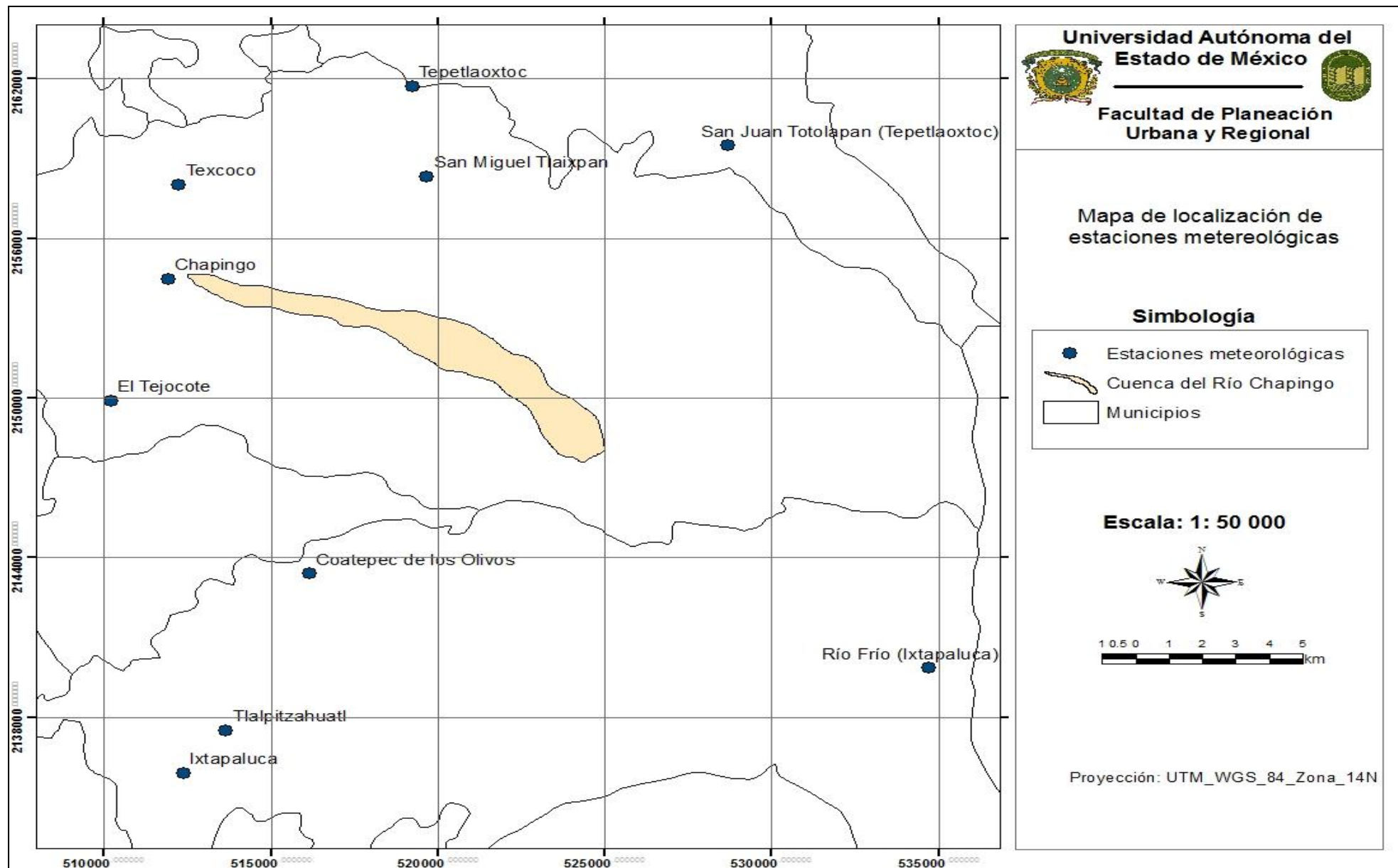
Para obtener el factor *R*, primero se seleccionaron 12 estaciones climatológicas que se encontraban ubicadas tanto dentro como fuera de la cuenca, como se muestran en el cuadro 18 y figura 18, donde se reportan los datos de cada una de las estaciones.

Cuadro 18. Estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención del factor R.

Estación	Coordenadas		Altitud (msnm)
Chapingo	19°29'05" N	098°53'11" W	2250
Coatepec de los Olivos	19°23'05" N	098°50'46" W	2405
San Miguel Tlaixpan	19°31'10" N	098°48'45" W	2405
El Tejocote	19°26'36" N	098°54'10" W	2256
Texcoco(DGE)	19°30'20"N	098°52'55" W	2250
Texcoco(SMN)	19°31'00" N	098°53'00" W	2255
Tepetlaoxtoc	19°33'00" N	098°49'00"W	2324
Ixtapaluca	19°19'02"N	098°52'56"W	2250
Tlalpitzahuatl	19°19'54"N	098°52'12"W	2340
Río Frío (Ixtapaluca)	19°21'09"N	098°40'11"W	2977
San Juan Totolapan (Tepetlaoxtoc)	19°31'47"N	098°43'36"W	2750
Santa Rita Tlahuapan (Puebla)	19°20'47"N	098°34'53"W	2609

Fuente: CNA (2015)

Figura 18. Plano de localización de las estaciones climatológicas



Una vez seleccionadas las estaciones se procedió a calcular el factor R mediante el índice de Fournier propuesta por FAO:

$$R = \sum_{n=1}^{12} \frac{P^2}{P}$$

Donde:

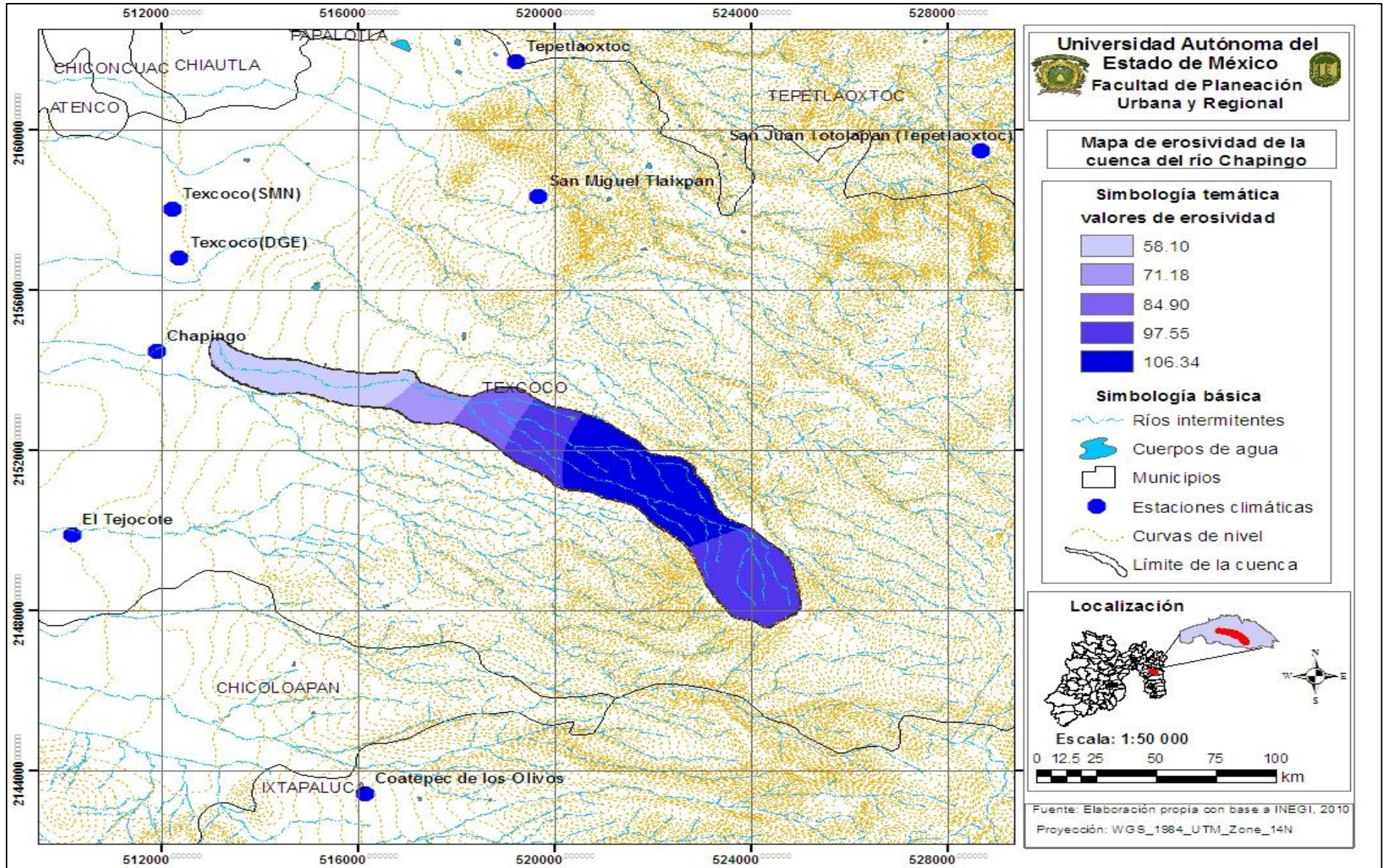
- R = Erosividad de la lluvia.
- P^2 = Precipitación mensual en mm
- P = Precipitación anual en mm.

Ya calculado el factor R para cada una de las estaciones climatológicas, tal como se muestra en el cuadro 19, se procedió a capturar la información en una base de datos de Excel para poder exportarlo a ArcGis y hacer una interpolación de los valores. Para llevar a cabo la interpolación de los datos se empleó la herramienta Spline de la función Spatial Analyst. (Figura 19).

Cuadro 19. Resultados de erosividad para cada una de las estaciones climatológicas

Estación climática	Altitud	Precipitación media anual (mm)	Erosividad (Mj/hr/ha/año)
Chapingo	2250	618.3	88.11
Coatepec de los Olivos	2405	648.7	92.46
San Miguel Tlaixpan	2405	590.2	83.44
El Tejocote	2256	561.4	82.30
Texcoco(DGE)	2250	554.5	83.44
Texcoco(SMN)	2255	696.9	114.93
Tepetlaoxtoc	2324	615.1	88.73
Ixtapaluca	2250	632.7	96.77
Tlalpitzahuatl	2340	614.0	89.20
Río Frío (Ixtapaluca)	2977	972.0	139.01
San Juan Totolapan (Tepetlaoxtoc)	2750	560.6	75.60
Santa Rita Tlahuapan (Puebla)	2609	855.6	124.14

Figura 19. Mapa de erosividad de la lluvia



5.1.2 Factor K o erodabilidad del suelo.

Para estimar el factor K se consultaron las unidades de suelo y sus texturas a través de la carta edafológica escala 1:50000 del INEGI. Una vez identificadas las unidades, subunidades y sus texturas se les asignaron los valores respectivos propuestos por la FAO. Los valores de K oscilaron entre 0.100 y 0.224; los valores mínimos indican baja susceptibilidad a la erosión del suelo. En la figura 20 se presenta el mapa del factor K .

5.1.3 Factor LS longitud y grado de la pendiente.

Cabe señalar que la elaboración de este plano, además de los planos de R y K fue de manera manual, por lo que primeramente se realizaron los cálculos y la digitalización a mano sobre la carta topográfica 1:50,000 denominada Chalco, por lo cual posteriormente se escaneó la imagen y fue procesada en ArcGis para convertirlo a formato ráster y por último hacer la sobreposición de mapas.

Para obtener el mapa del factor LS , primeramente se requirió del mapa de la red hidrográfica a 1: 50,000 para determinar la longitud de pendiente. En este caso el orden de corrientes de la cuenca es de 4.

Como es de esperarse los valores más altos se localizaron en la zona montañosa de la cuenca alcanzando los 3,590 msnm, mientras que los puntos más bajos alcanzan los 2,256 msnm. Por último, se realizó la multiplicación de los mapas L y S para obtener como resultado final el plano LS , tal como lo muestra la figura 21.

Figura 20. Mapa de erodabilidad del suelo.

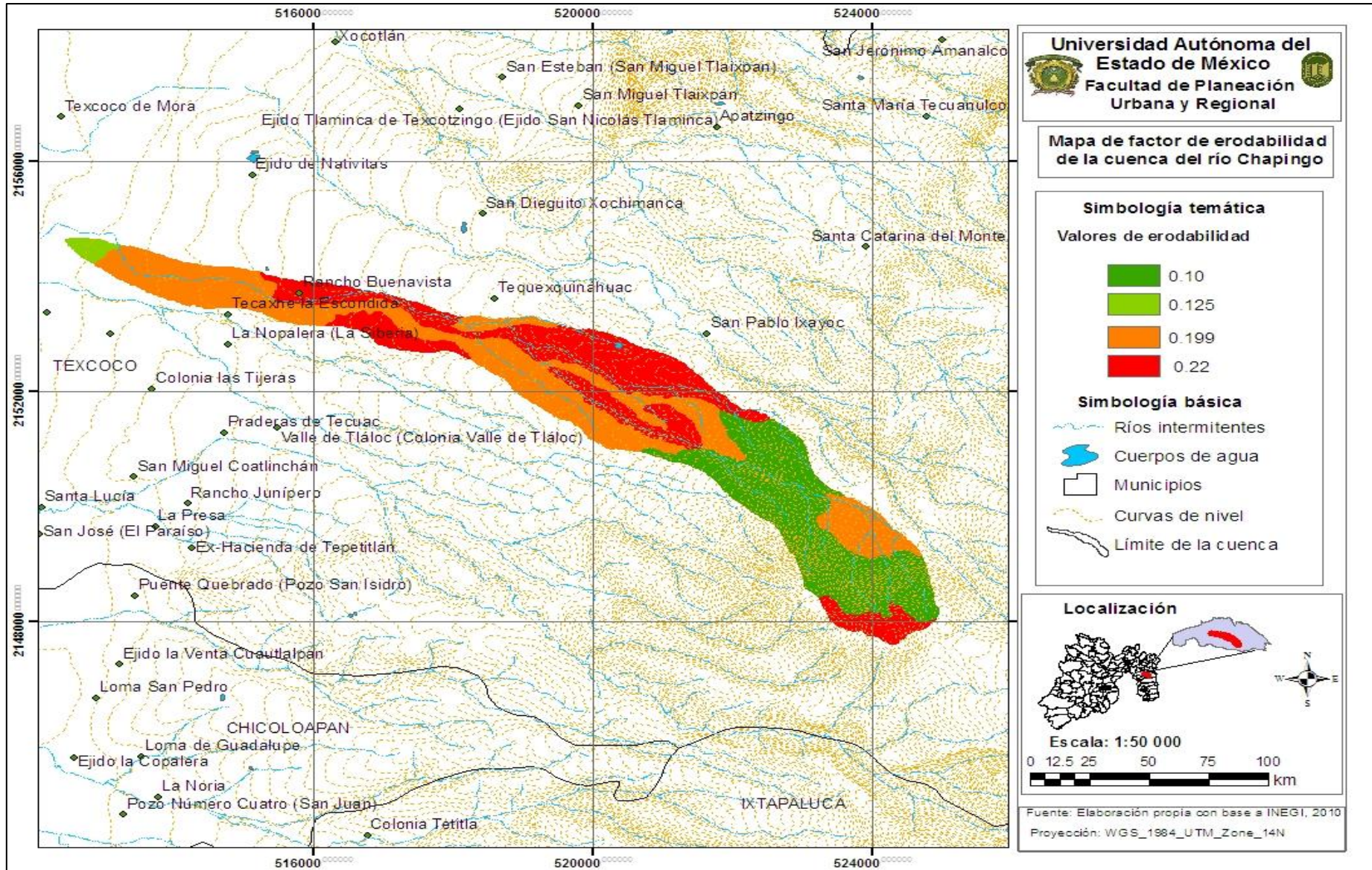
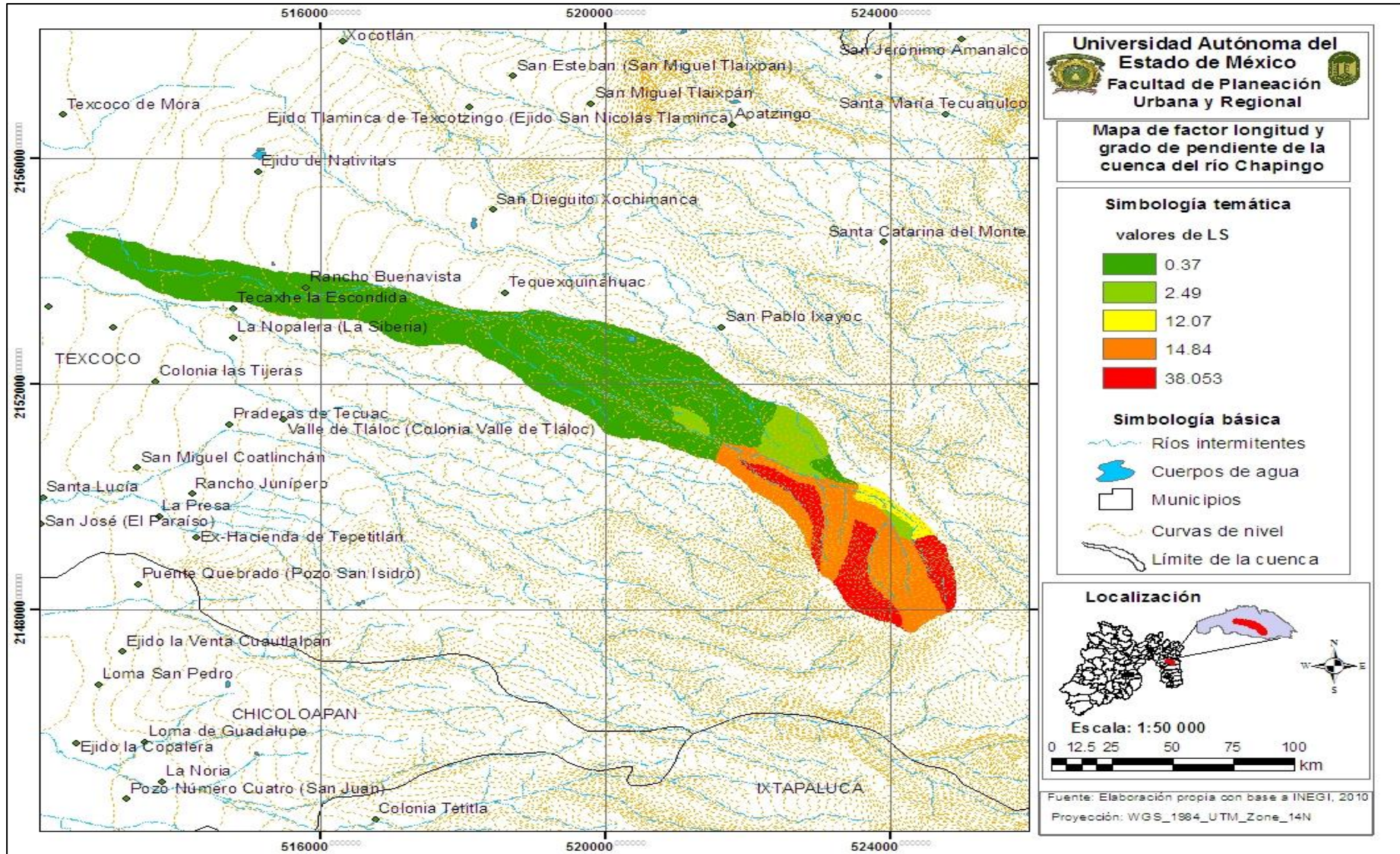


Figura 21. Mapa de longitud y grado de pendiente



5.1.4 Factor C cobertura vegetal.

Para obtener el mapa del factor de cobertura vegetal se realizó mediante una interpretación visual de imágenes de satélite del 2013 de los usos y cobertura vegetal del suelo de la zona de estudio. Como resultado de esta interpretación se identificaron diez usos y cobertura de suelo (cuadro 20). El uso de suelo predominante fue el de agricultura de temporal con un 22.97 % de la superficie total de la cuenca. Una vez identificados y delimitados nidos los polígonos se le asignó un valor de C de acuerdo a Jung y otros (s/f), para cada uso (cuadro 21).

Cuadro 20. Cobertura y usos de suelo en la cuenca del río Chapingo.

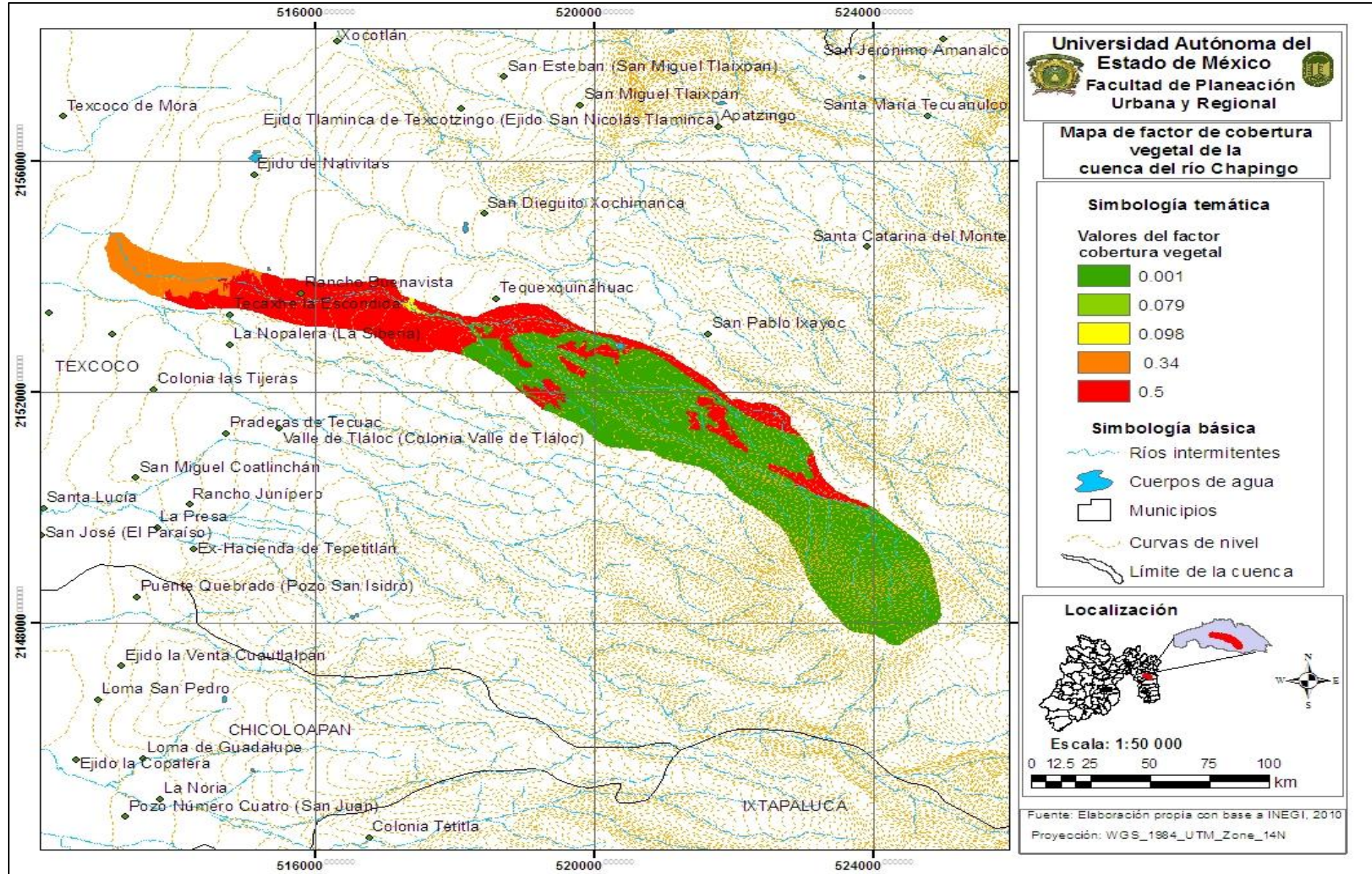
Cobertura y uso de suelo	Superficie (ha)	Porcentaje
Agricultura de riego	104.9	6.064
Agricultura de temporal	397.47	22.97
Area urbana	242.28	14
Bosque	111.21	6.42
cuerpos de agua	101.7	5.87
Invernadero	100.28	5.79
Mina	214.49	12.4
Pastizal	196.34	11.35
Suelo desnudo	124.03	7.17
Terrazas	137.01	7.92
Total	1729.71	100.0

Cuadro 21. Valores de C para cada uso y cobertura.

Cobertura y uso de suelo	Clave	Valor de C
Agricultura de riego	Ar	0.5
Agricultura de temporal	At	0.5
Área urbana	Au	0.1
Bosque	B	0.001
cuerpos de agua	CA	0.01
Invernadero	I	0.1
Mina	M	0.35
Pastizal	P	0.08
Suelo desnudo	Sd	0.35
Terrazas	T	0.001

Como resultado de la aplicación de la metodología se obtuvo el mapa del factor *C* en formato raster para posteriormente multiplicarlo con los demás factores de la EUPS (Figura 22).

Figura 22. Mapa de cobertura vegetal



5.1.5 Erosión potencial y actual de la cuenca del río Chapingo

Primero se obtuvo la erosión potencial (figura 23) que es resultado de la multiplicación de los factores *R*, *K* y *LS* y este tipo de erosión es la que existiría si el suelo estuviera desprovisto de cobertura vegetal. En este sentido se detectaron cuatro clases de erosión potencial que son: ligera con una extensión de 1127.59 ha, lo que equivale al 65.2% de la superficie total de la cuenca; la moderada con 203.16 ha (11.75%), la alta con 301.17 ha (17.41%) y la muy alta con 97.76 ha (5.65%) (Cuadro 22).

Cuadro 22. Clases de erosión potencial en la cuenca del río Chapingo

Clases de erosión	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ligera	1127.59	65.19
Moderada	203.1611	11.75
Alta	301.17	17.41
Muy alta	97.76	5.65
Total	1729.6811	100

Las clases de erosión alta y muy alta se localizan en las zonas montañosas y se asocian con las zonas donde se presenta alta erosividad de la lluvia y relieve accidentado del terreno.

Con relación a la erosión actual (figura 24), en la cuenca del río Chapingo, y como resultado de la multiplicación de los mapas *RKLSC* se generó el mapa de erosión actual, y se puede observar que la clase de erosión predominante en la cuenca es la ligera con una extensión de 1512.96 ha, cubriendo un 87.4% de la cuenca. En segundo lugar se encuentra la clase de erosión moderada con 91.82 ha; posteriormente la muy alta con 63.17 ha, y por último la alta con un área de 61.76 hectáreas (Cuadro 23).

Como se puede apreciar la erosión ligera es la clase que cubre la mayor superficie de la cuenca, ello se debe a los trabajos que se realizaron a partir de 1978 por parte de la Gerencia del Lago de Texcoco hoy día dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Cuadro 23. Clases de erosión actual en la cuenca del río Chapingo.

Clases de erosión	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ligera	1512.96	87.47
Moderada	91.82	5.31
Alta	61.76	3.57
Muy alta	63.17	3.65
total	1729.71	100.0

Aunque se encontraron dos zonas con los niveles altos y muy altos de erosión, su superficie dentro de la cuenca es relativamente mínima y los lugares en donde se presenta son terrenos escabrosos o muy accidentados. Cabe señalar que en el modelo de la EUPS, la erosión aumenta conforme lo hace la longitud del terreno y la inclinación de la pendiente se hace mayor (Torres, 1999). De aquí que el factor longitud y grado de pendiente sea determinante para que se propicie la erosión hídrica de suelos.

En resumen no se presentan un problema grave de erosión de suelos en la zona de estudio, ya que casi el 88% de la superficie de la cuenca presenta erosión ligera. Sin embargo, se requiere conservar estas áreas con erosión ligera mediante el establecimiento de alguna práctica de conservación de suelos.

Figura 23. Mapa de erosión potencial en la cuenca del río Chapingo

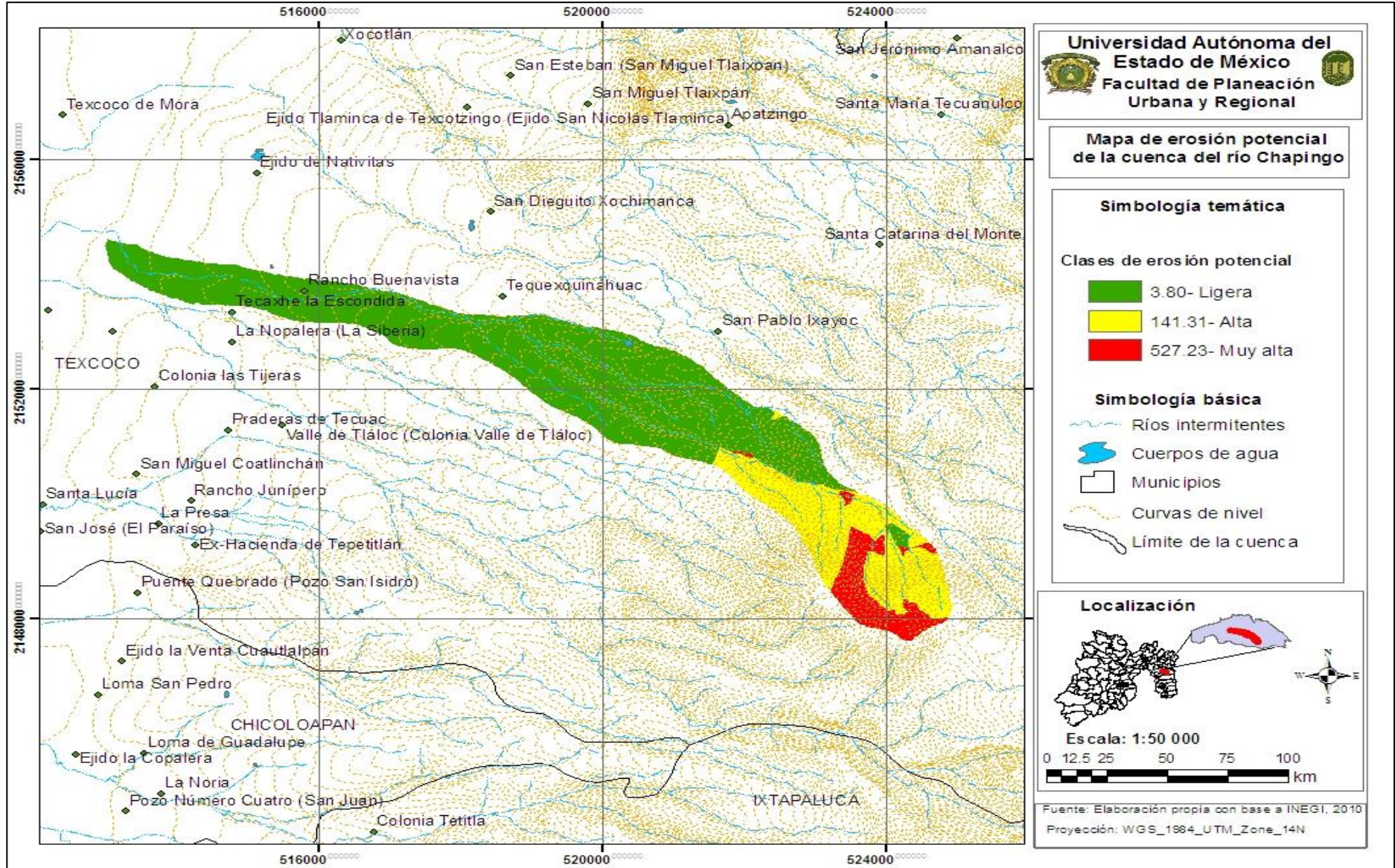
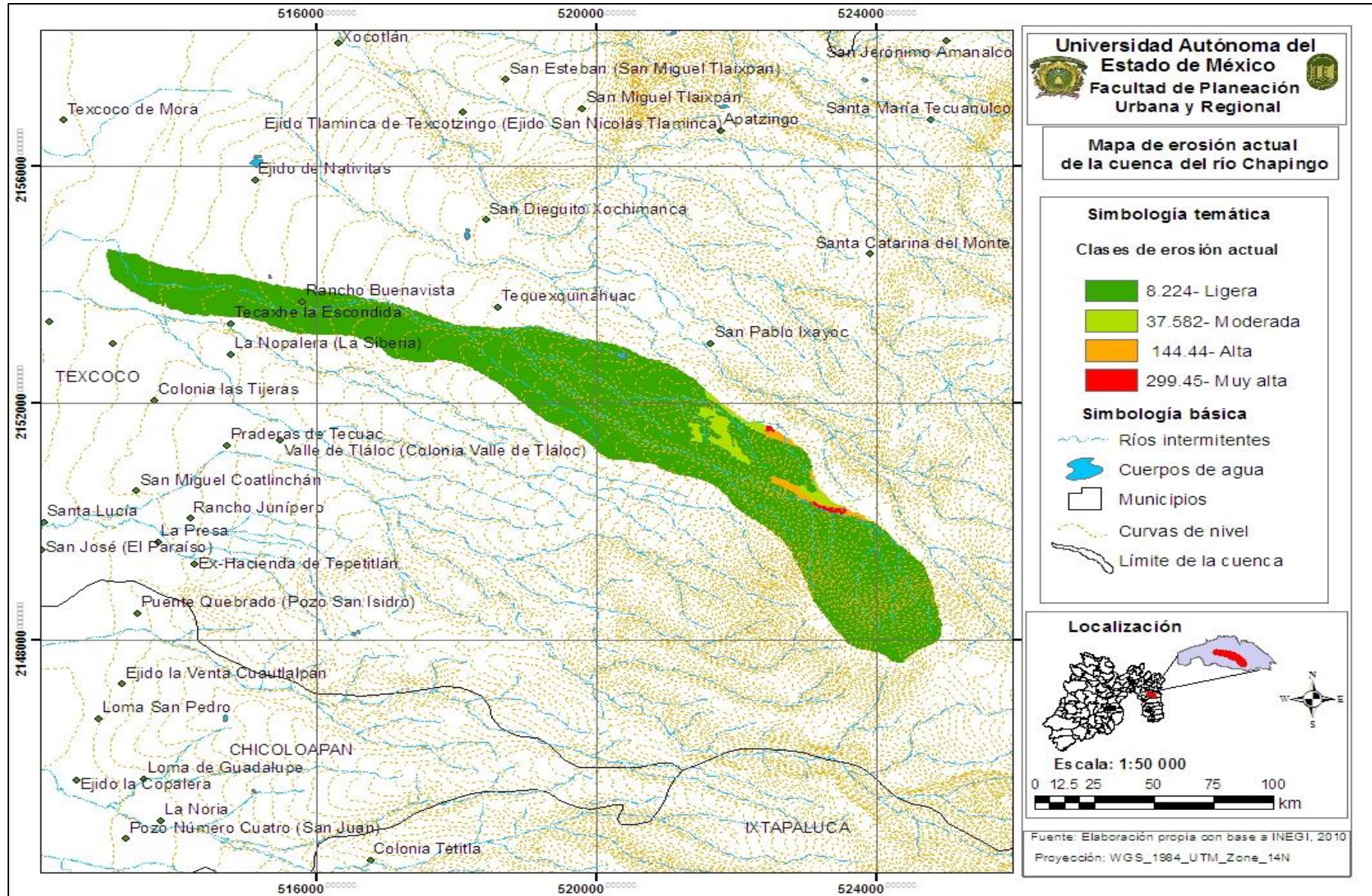


Figura 24. Erosión actual en la cuenca del río Chapingo



5.2. Determinación de erosión por el método de Sagarpa.

Los factores de erosividad de la lluvia y de erodabilidad del suelo R y K se determinaron de acuerdo a la metodología de FAO descrita anteriormente.

Como método alternativo para obtener los valores del factor longitud y pendiente (LS), se empleó la fórmula propuesta por SAGARPA. En este apartado se obtuvieron los valores de LS , los cuales varían desde cero en zonas donde existe alta erosividad de la lluvia y alta susceptibilidad del suelo a ser removido, hasta 8 donde existen valores bajos de erosividad de la lluvia y de erodabilidad del suelo. De ello se desprende la existencia de valores mayores y menores de la unidad, tal como lo muestra el cuadro 24.

Cuadro 24. Valores mayores y menores a la unidad ($8T$).

$Si \quad LS > 1 \rightarrow 8T > RK$	La erosión provocada por el producto RK es menor del valor considerado como límite para definir terrenos altamente erosionables, por lo que no existen problemas de erosión evidente que requieren atención inmediata, ya que la tasa de formación del suelo es mayor que la tasa de erosión.
$Si \quad LS = 1 \rightarrow 8T = RK$	Este es el punto de equilibrio en la definición de un terreno altamente erosionable, lo que implica que la erosión provocada por el producto RK es equivalente a 160 ton/ha/año, es decir que se está perdiendo lo que se forma.
$Si \quad LS < 1 \rightarrow 8T < RK$	La tasa de formación del suelo $8T$ no es suficiente para sustituir las remociones del suelo por lo que a estos valores se les debe de considerar como áreas prioritarias para el establecimiento de estrategias de conservación.

Haciendo hincapié en este razonamiento, como resultado del factor LS , se tiene que los valores de LS tanto el mínimo como el máximo, son mayores a la unidad, es decir van desde 6.32 a 19.20, por lo tanto la erosión provocada por los factores de erodabilidad y de erosividad es menor que el límite permisible para terrenos altamente erosionables, por lo que no existen problemas de erosión evidente que requieran atención inmediata en la cuenca del río Chapingo.

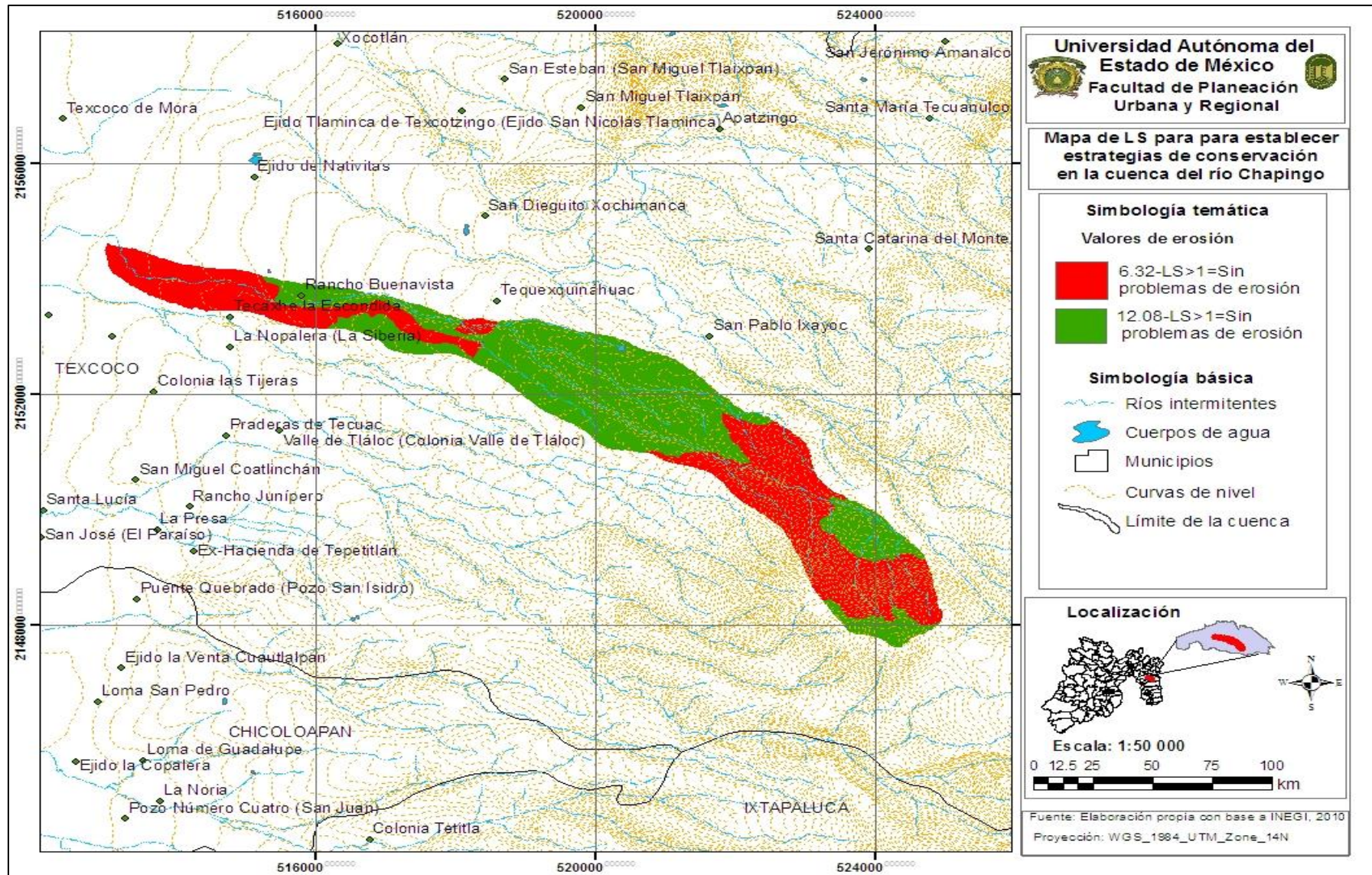
Esto debido a que la tasa de formación del suelo es mayor a la tasa de pérdida de suelo. La figura 25, reporta el factor LS , donde los valores más bajos señalan que están más cercanos a la unidad o al punto de equilibrio de un terreno altamente erosionable, no obstante el plano muestra que no existen problemas de erosión.

A manera de resumen se puede afirmar que las dos metodologías empleadas para determinar la erosión hídrica en sus formas laminar y canalillos, coinciden. Mientras un método estimada que el 88% de la superficie de la cuenca presenta erosión ligera, el otro método indica que dado el valor de LS mayor a 1, esto se traduce en que no existen problemas de erosión evidente que requieren atención inmediata , ya que la tasa de formación del suelo es mayor que la tasa de erosión.

Lo anterior, se explica debido a las prácticas de conservación de suelos que se llevaron a cabo a partir de 1977 en la cuenca por la Ex-Comisión del Lago de Texcoco, ahora Gerencia del Lago de Texcoco dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Este organismo gubernamental formuló un programa de rehabilitación y manejo integral de la Vertiente Oriental mediante la reforestación de 5,110 hectáreas; terraceo y subsoleo de 4,644 hectáreas y la construcción de 1,205 presas de control de azolves (Arias y otros, 1990 y Llerena y otros, 1993).

Sin embargo, y como todo proceso erosivo se requiere que las obras y prácticas de conservación de suelo se les de mantenimiento y que la zona de estudio sea atendida con diversas prácticas y obras de conservación a fin de evitar su deterioro.

Figura 25. Mapa de LS de la zona de estudio.



5.3 Erosión media ponderada y tasa de entrega de sedimentos

Con base en la aplicación de la ecuación para obtener la erosión media ponderada (cuadro 25) se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 25 Erosión media ponderada

Clases de erosión	Superficie (ha)	Erosión media ponderada (ton/ha)
Ligera	1512.96	10.93
Moderada	91.82	1.86
Severa	61.76	2.68
Muy severa	63.17	4.38
total	1729.71	19.85

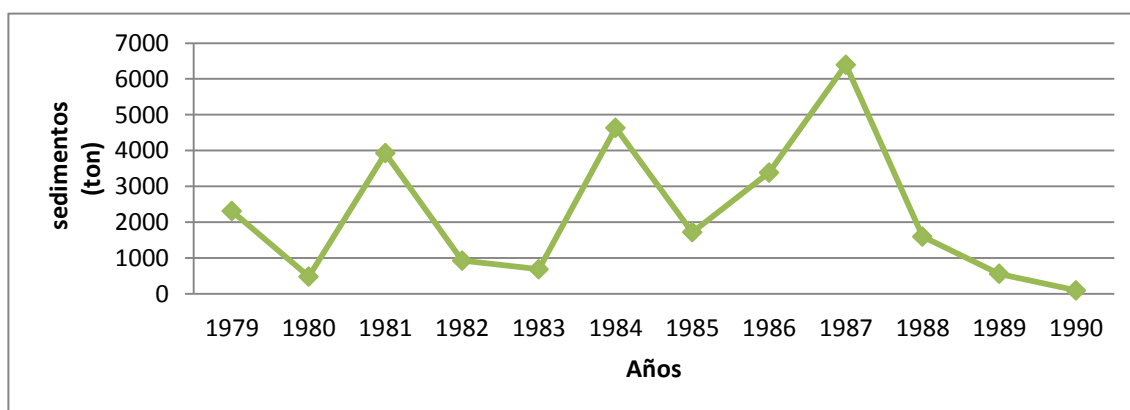
El resultado de la erosión media ponderada es de 19.85 toneladas por hectárea lo que quiere decir que pertenece al rango de erosión moderada (0-50 ton/ha/año). Y aunque se tienen clases de erosión moderada, severa y muy severa, los valores de su erosión media ponderada son bajos y las tasas de formación compensan estas pérdidas.

Por otra parte, con lo que respecta a la producción de sedimentos en la cuenca del río Chapingo, el promedio anual es de 2,224 toneladas y la degradación específica es de 1.28 t/ha, como se aprecia en el cuadro 26.

Cuadro 26. Producción de sedimentos en la cuenca Chapingo

Año	Producción de sedimentos (ton)	Degradación específica t/ha
1979	2304	1.33
1980	480	0.27
1981	3924	2.26
1982	924	0.53
1983	684	0.39
1984	4632	2.67
1985	1716	0.99
1986	3384	1.95
1987	6396	3.69
1988	1596	0.92
1989	552	0.31
1990	96	0.05
Promedio	2224	1.28

Figura 26. Gráfica de la producción de sedimentos en el río Chapingo (1979-1990)



Como se puede observar en la Figura 26, la producción de sedimentos presenta altibajos muy marcados tanto antes como después de establecido el programa de conservación y rehabilitación de la cuenca, y resaltan los años de 1987 con una producción máxima de sedimentos y el de 1990 por ser el año con el valor mínimo.

Nuevamente se puede comprobar que las acciones de conservación y restauración de suelos como la construcción de terrazas y reforestaciones en las partes altas de la cuenca, han disminuido los niveles de erosión hídrica en canalillos y cárcavas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación el objetivo general planteado se cumplió satisfactoriamente, mientras que la hipótesis se rechaza ya que se estableció que debido a los métodos empleados para el cálculo de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por FAO y SAGARPA, los resultados de pérdida de suelo difieren significativamente entre ellos, y los resultados fueron similares. Por lo tanto la hipótesis de trabajo se rechaza.

En este trabajo se presentaron dos metodologías para estimar la erosión hídrica en sus formas laminar y canalillos en la cuenca del río Chapingo. Estas dos metodologías permiten calcular la pérdida de suelo con modificaciones a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). La metodología de la FAO estimada los factores de la EUPS mientras que la metodología empleada por SAGARPA se focaliza en las zonas que requieren atención con base al factor *LS*. Cabe señalar que el método tradicional de la USLE (por sus siglas en inglés) indica de manera aproximada el estado actual y potencial de la erosión considerando todos los factores, es decir, posee un enfoque más sistémico.

A pesar de ser dos métodos alternativos para calcular la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, los resultados entre ambos métodos demuestran que no existen problemas de erosión en la cuenca del río Chapingo, la erosión con el método de FAO indica que la erosión que se presenta en la cuenca es ligera y el método de SAGARPA reporta que no hay ningún sitio que requiera de atención en materia de conservación del suelo y agua.

Con base a lo anterior y retomando a Llerena y Sánchez (1992), las bajas pérdidas de suelo se deben a los trabajos que en 1977 la Gerencia del Lago de Texcoco inicio los trabajos de conservación y rehabilitación de suelos en la Vertiente Oriental de México. Concretamente en la cuenca del río Chapingo se hicieron trabajos de terraceo, reforestación y construcción de presas de control de azolves en los cauces de la cuenca. Esto es, se implementó un programa integral y a partir de esto, se ha recuperado significativamente la zona de estudio.

Con este programa de manejo integral de cuencas, en la cuenca del río Chapingo, se han tenido beneficios traducidos en un aumento de la recarga del acuífero, mayores zonas de bosque (por la reforestación), disminución de la erosión hídrica en forma de canalillos y cárcavas, y con ellos menor aporte de sedimentos y azolves en las partes bajas de la cuenca.

Finalmente y gracias al desarrollo y aplicación de esta metodología se pudo analizar la importancia de la conservación y el buen manejo de los suelos, ya que a pesar de que algunos resultados se observan largo plazo, la calidad de restauración es evidente y se refleja en el buen estado biofísico de la cuenca.

En lo que respecta a la comparación de los dos métodos, en lo particular se considera que es más factible aplicar el método de SAGARPA, ya que éste simplifica la metodología desarrollada por la FAO, además de que identifica las zonas que requieren atención en cuanto a la aplicación de estrategias de conservación de suelos.

En este sentido la aplicación de estrategias como obras de conservación de suelos toma un papel importante para el sector social, esto debido a que está comprobado que el hombre también tiene la capacidad de restaurar los recursos naturales, en este caso el suelo.

Aunado a esto, el papel de un licenciado o licenciada en ciencias ambientales precisamente es el evaluar, analizar y conocer la situación de los recursos naturales para proponer alternativas o soluciones prácticas buscando la sustentabilidad a largo plazo. Es por ello que el tema de la conservación de suelos es un área de oportunidad para las ciencias ambientales, donde se pueden aplicar diversas metodologías prácticas y proponer soluciones permitiendo la armonía con las comunidades y la naturaleza.

RECOMENDACIONES

Finalmente, como recomendaciones de obras de conservación aplicables a la cuenca Chapingo se consultó el catálogo de obras de conservación de suelo y agua del Colegio de Posgraduados (1991). Las obras de conservación se mencionan a continuación:

Zona de uso agrícola

Dentro de este apartado se tiene el manejo de residuos de cultivo o cosecha, surcado al contorno, labranza de conservación y la construcción de terrazas.

Manejo de residuos de cultivo

Consiste en usar residuos de plantas para proteger los campos cultivados, durante los períodos de erosión crítica y de deficiencias de humedad. Lo que se pretende es conservar la humedad del suelo; incrementar la infiltración del agua; reducir las pérdidas del suelo por erosión y mejorar la estructura del suelo con la incorporación de materia orgánica.

Los residuos de cultivo pueden incorporarse al suelo justamente antes de la siembra, para garantizar el control de la erosión y la conservación de la humedad. Esto se realiza con un arado de vertedera o discos. Se requiere analizar algunas condiciones en que se encuentre el suelo por ejemplo el tipo, el contenido de humedad, la profundidad de labranza, la velocidad y el tipo de implemento.

Evaluar si existe enfermedad o plaga en los residuos.

Surcado al contorno.

Esta práctica de conservación de suelo y agua, consiste en el trazado de los surcos en forma perpendicular a la pendiente del terreno, siguiendo las curvas de nivel. Terrenos en pendientes menores del 5% se recomienda al productor realice el surcado al contorno, principalmente en cultivos de escarda como es el maíz.

El propósito del surcado es: reducir la pérdida de suelo ocasionada por la erosión hídrica; fomentar la infiltración lo que aumenta la humedad disponible para las plantas; distribuir de una manera más uniforme la humedad proveniente del agua de lluvia; controlar la erosión laminar y reducir el desgaste de la maquinaria agrícola.

Para llevar a cabo esta práctica, se requiere considerar el tipo de suelo y cultivo, la cubierta vegetal existente, la pendiente del terreno y los cauces de desalojo de las aguas en demasía.

Terrazas.

Las terrazas se forman entre los bordos de tierra, o la combinación de bordos y canales construidos transversalmente a la pendiente de una ladera a espaciamientos fijos. Existen diversos tipos de terrazas como son: terrazas de formación sucesiva, terrazas de base ancha, terrazas de banco, etc.

Las ventajas de las terrazas son: cambiar la pendiente del terreno y la longitud; reducir la erosión hídrica; interceptar y controlar el escurrimiento superficial a velocidades no erosivas y dirigirlo hacia una salida estable; retardar el escurrimiento para aumentar la infiltración y así obtener mayor humedad para el desarrollo de los cultivos y prevenir la formación de cárcavas, principalmente.

Estas prácticas mecánicas se construyen en terrenos con problemas de erosión hídrica, donde se requiere conservar el agua y en donde las pendientes predominantes del terreno no exceden el 16%.

En donde se construyen las terrazas se recomienda que se combinen con otras prácticas como el surcado al contorno, cultivos de cobertera, etc. También, se requiere de un sistema completo de manejo del agua, que debe incluir cauces empastados, drenes y estructuras de desviación de las aguas de demasías.

Área forestal

Se requiere que se mantenga el bosque y se haga un manejo del mismo, de tal manera para que la vegetación nativa sea conservada para proporcionar protección contra la erosión. Ello proporciona beneficios económicos y ambientales continuos para la gente y la vida silvestre.

Es necesario que se conozcan las necesidades de protección del bosque para protegerlo de la gente, del ganado o del fuego; reconsiderar la aptitud para un uso secundario como el pastoreo de ganado, evaluar las condiciones del bosque en términos de madurez, complejidad, potencialidad y necesidad de prácticas de manejo para lograr objetivos.

Reforestación.

Se recomienda que se establezca un programa de reforestación, en aquellas áreas que se han visto afectadas por la tala, sobre todo en las partas altas de la cuenca, ya que representan las zonas de recarga de acuíferos.

Viveros en escuelas.

Una estrategia interesante y que podría representar un éxito, sería la implementación de viveros en las escuelas primarias y secundarias localizadas en la cuenca, con la finalidad de producir planta para el programa de reforestación o también para crear huertos familiares.

Programa contra tala clandestina.

Es deseable que se cuiden los bosques para evitar la tala clandestina. En algunos sitios de la cuenca se detectó tala clandestina y en otros, se estima que la superficie arbolada no se ha visto afectada por tala, pero si ha sido afectada en densidad la masa arbolada.

Frutales en contorno.

La práctica consiste en plantar frutales en las laderas de los cerros o en terrazas, cuando los terrenos tienen más del 2% de pendiente. Ello ayudaría a reducir el escurrimiento

superficial y en consecuencia controlar la erosión hídrica. Además, se conseguiría tener un mejor manejo y uso del agua.

Realizar en terrenos con pendientes mayores del 2% en donde las pérdidas de suelo y agua necesitan controlarse; y en hileras de frutales en curvas de nivel para separar cultivos en fajas y desviar el escurrimiento del agua.

Control de cárcavas

Se le llama cárcava al estado más avanzado de la erosión hídrica. Esta forma de erosión es la más fácilmente perceptible, se origina por los escurrimientos superficiales que se concentran en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento en el tamaño de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas cárcavas.

Las presas de control de azolves son estructuras que se construyen transversalmente a la dirección del flujo de la cárcava, para disminuir la velocidad del agua de escorrentía; crear condiciones favorables para el establecimiento de una cobertura vegetal que estabilice totalmente el hecho de la cárcava, y proteger obras de infraestructura rural tales como caminos y puentes.

Para su construcción se debe tener en cuenta los siguientes elementos: superficie de aporte de escurrimientos; probabilidad del suelo de la cárcava; pendiente de la cárcava; profundidad de la cárcava; material para construcción; vida útil de la obra, y costo invertido y beneficio de la obra.

Glosario

Agente erosivo. Es aquel factor o condición que facilita el proceso de erosión, puede ser por el agua o el viento.

Erosión: Desprendimiento de partículas de suelo, distinguiendo así formar deposición o sedimentación y el transporte de sedimentos. La pérdida de suelo a largo plazo, expresado como cantidad por unidad de área y tiempo, a menudo se utiliza para las pequeñas parcelas.

Erosión hídrica potencial: Es aquel tipo de erosión hídrica que se daría si no existiera ningún tipo de vegetación o cubierta vegetal.

Erosión hídrica actual: Es el tipo de erosión existente en el suelo, considerando todos los factores como cobertura vegetal, erodabilidad del suelo, longitud y grado de pendiente y erosividad de la lluvia

Perfil de suelo: Un perfil de suelo es un corte transversal del suelo con el fin de identificar los diferentes tipos de horizontes que contiene.

Recurso renovable: Elemento de la naturaleza, o recurso que puede ser regenerado para su aprovechamiento.

Intemperismo: Proceso de degradación superficial o total en las rocas dependiendo el agente que lo causa, puede ser intemperismo, químico, físico o biológico.

Ciclos biogeoquímicos: Procesos naturales de reciclaje de los elementos químicos contenidos en la naturaleza y en los ecosistemas, puede ser ciclo del agua, carbono, nitrógeno, fósforo. Se considera desde su generación, transporte, asimilación, síntesis degradación y reincorporación al ciclo, tomando en cuenta procesos de retroalimentación e intercambio de materia y energía.

Cuencas hidrológicas. Son unidades de planeación y manejo del recurso hídrico físico-naturales, delimitadas por una frontera o parteaguas.

Erosividad. Capacidad de la lluvia para provocar erosión en suelo.

Erodabilidad. Susceptibilidad del suelo a ser erosionado

BIBLIOGRAFÍA

- Andrés, M. (2006). La evaluación del impacto ambiental de proyectos y actividades agroforestales, Universidad de Castilla de la Mancha, España.
- Adame y Martínez (1999). Consultado el 15 de febrero de 2015. Investigaciones geográficas. Boletín 39
- Arnoldus, H. M. J. (1980). Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. Land and Water Development Division, FAO, Roma Italia.
- Barracck Ouma, Geert Sterk. (2006). La cuantificación de los indicadores visuales de erosión del suelo en la cuenca Gikuuri en el altiplano central de Kenia. Science direct. Consultado el 12 de noviembre de 2014, www.sciencedirect.com/science
- Becerra, Antonio. (1999). Erosión de suelos. Apuntes de la primera parte del curso de Conservación de Suelos, México, Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Área de Recursos Naturales.
- Bennet H.H. 1939. Soil Conservation. McGraw Hill. NY.
- Boardman John; Poesen Jean; Evans Robert.(2003). Factores socioeconómicos que influyen en la erosión y conservación del suelo. Science direct. Consultado el 12 de noviembre de 2014, www.sciencedirect.com/science
- Clérici, García Préchac (2009). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar las pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región del sur de la cuenca río de la Plata. Fagro. Consultado el 14 de noviembre de 2014, www.fagro.edu.uy/~agrocienza/VOL5/1/p92-103.pdf
- Colegio de Postgraduados Chapingo. (1997). Manual de conservación del suelo y del agua. México Editores, México.
- Colegio de Postgraduados. 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. Tercera edición. Editorial del Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo de México
- Contreras, Jaime. (1986). Índices de erosividad. Departamento de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

- Comisión Nacional del Agua. (1996). Pérdida de Suelo en cuencas. En Manual de Ingeniería de Ríos. Ed. Gerencia de Aguas superficiales e Ingeniería de Ríos-CNA, México, D.F. Capítulo 17.
- Edward, Tarbuck, Federick. y otros. (2005). Ciencias de la Tierra, Madrid.
- Figueroa, S.B. (1975). Pérdidas de Suelo y Nutrientes y su Relación con el uso del Suelo en la Cuenca del Río Texcoco. Tesis M.C. Colegios de Postgrados, Chapingo, México.
- Fitz Patrick; Ewart Adsil.(1996). Introducción a la ciencia de los suelos.Trillas editorial, México.
- FAO. (1980). Metodología provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos. Roma, Italia.
- Graziano, Elizalde. (2009). El suelo en la fase superficial del ciclo geológico. Redalyc UAEMEX. Consultado el 14 de noviembre de 2014, <http://redalyc.uaemex.mx/pdf>.
- Heano, Jesús. (2007). Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C.
- Hernández Téllez Marivel; García Aragón Juan Antonio; Quentin Emannuelle; Díaz Delgado Carlos. (2008). Identificación de áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma. Revista. Ergo SUM. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Hoyos, Natalia. (2005).Spatial Modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of Colombian Andes. Revista Catena
- <http://mexico.pueblosamerica.com/i/san-martin-atexcal/>
- <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/index.html>
- Hudson, Norman. (1982). Conservación del suelo. Ed. Reverté.
- Instituto Nacional de Ecología (2007). Disponible en: <http://www.ine.gob.mx>.
- INEGI,2000:http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/edomex/sombreado_ri.cfm?c=444&e=32
- Liane Elena; Marchamalo Miguel. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del

Río Birrís, Costa Rica. Redalyc Uaemex. Consultado el 12 de noviembre de 2014, Roldánredalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=4361327900

- Llerena Alberto; Sánchez Benjamin. (1992). Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del Valle de México. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Editorial Board, primera edición. p 302-308.
- López Cárdenas, F.(2003). La ingeniería en los procesos de desertificación. Grupo TRAGSA, editorial Mundiprensa.
- Matlock, H. and Reese, L. (1960). "Generalized solutions for laterally loaded piles". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers. SM 5, pp. 63-91
- Martínez Valdés, H., 2010. Desarrollo de una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa en aguas superficiales de una cuenca. Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua.. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México: s.n.
- Miranda Faustino; Hernández Efraím. (1974). Tipos de vegetación de México y su clasificación. Instituto de Biología de la UNAM. Escuela Nacional de Agricultura. Ciudad de México
- Moreno Caselles, J.; Moral Herrero, R.; Pérez Murcia, M. D. y Pérez Espinosa, A. (2000). Fundamentos de Edafología y Climatología. Editorial Universidad Miguel Hernández. España. 395 pp.
- Morgan, R.P.C. (1996). Erosión y conservación del suelo. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Nava Endara; Gabino Ángel. (2010). Bosques y Selvas del Estado de México. Edo. Comedit México. Ciudad de México.
- Núñez, Jorge. (2001). Manejo y Conservación de Suelos. Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia (EUNED), editores.
- Oropeza, M. J. L. (1980). Evaluación de la Erosión Hídrica (Sedimentos en Suspensión) en las cuencas de los Ríos Texcoco y Chapingo. Tesis M.C. Colegio de postgrado, Chapingo, México.

- Ortiz Boifacio, Ortíz Carlos Alberto. (1990).Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. Editorial V.A Gómez Cuevas, México. pág. 21-24.
- Ortiz Solorio, C.A. (1987). Elementos de la Agrometeorología Cuantitativa con Aplicaciones en la República Mexicana. Depto. De Suelos, U.A.CH. Chapingo, México.
- Plaza Orlando, Sepúlveda Sergio.(1996). Desarrollo sostenible, Metodología para el Diagnóstico Microrregional. San José Costa Rica. Serie Publicaciones Miseláneas.
- Porta Jaume; López Marta. (2005). Agenda de campo de suelos, Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundiprensa, México
- Porta Jaime; López Marta; Roquero Carlos. (2003). Edafología para la Agricultura y Medio Ambiente. Ediciones Mundi Prensa, Barcelona, España
- Porta; y otros (2008). Introducción a la Edafología, uso y protección del suelo. Editorial Mundi Prensa, Barcelona, España.
- RPC , Morgan. (1997). Erosión y conservación del suelo.Ed. Mundi prensa. Madrid, Barcelona.
- Rzedowski, J., 2006. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación,s/f. Disponible en <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Surcado%20al%20contorno.pdf> 8 de sep. 5:59.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2003. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/pdf/cap3.pdf
- Sánchez Vélez. (1987). Hidrología forestal, agua, cuenca y vegeación. División de Ciencias forestales, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Síntesis de Información Geográfica del Estado de México.(1991). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). México.

- Velásquez, I.G. (1984) Predicción de la Producción de sedimentos en la cuenca de la Laguna de Tuxpan, Guerrero. Tesis Ing. Agrónomo. Colegio Superior Agropecuario del Edo. De Guerrero.
- Roose Eric, 1996: Land husbandry-Components and Strategy.
- SARH Subsecretaría de Desarrollo y Fomento Agropecuario Forestal, 1987: La erosión y Conservación del suelo en México, México DF: Subsecretaria de desarrollo y Fomento Agropecuario Forestal.
- INETER, Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales, 2004: Proyecto MET-ALARN, Erosión Hídrica Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración: Agencia de Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE.
- Morgan y Kirkby., 1994: Erosión de Suelos, México, editorial Limusa.
- Mitchell, J. K. & Bubenzer, G. D., 1984. Estimación de pérdida de suelo. En: Kirby, M. J. y R. P. C. Morgan (compiladores).. México: Limusa.
- <http://www.abc.es/sociedad/20130929/abci-degradacion-suelo-400000millones-201309281632.html>
- GEM (1993) Atlas General del Estado de México
- Gobierno del Estado de México, Secretaría de Desarrollo Económico (1996) CARTA DE RECURSOS MINERALES. 3ª Ed. Dirección General de Industria, Minas y Promoción Minera. México
- GEM, Atlas Estatal de Riesgos: Superficie municipal según grado de susceptibilidad a la erosión
- <http://www.edomexico.gob.mx/portalgem/identidad/civica/>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Suelo>
- www.meted.ucar.edu