



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DEGRADACIÓN DEL SUELO
MEDIANTE MODELOS CON INDICADORES EDÁFICOS,
TOPOGRÁFICOS Y CLIMÁTICOS EN EL VALLE DE ZAPOTITLÁN
SALINAS, PUEBLA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
ORIENTACIÓN AMBIENTAL**

P R E S E N T A

MAYRA MÓNICA HERNÁNDEZ MORENO

DIRECTOR DE TESIS: DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS

MÉXICO, D.F.

MARZO, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTOS

Esta tesis fue realizada gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, mediante la beca con número de registro 172584, durante el período septiembre de 2002 a junio de 2004.

El Comité Tutorial que dirigió la presente tesis de maestría, estuvo conformado por los profesores:

Dr. Oswaldo Téllez Valdés, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dr. Enrique Martínez Meyer, Instituto de Biología, UNAM

Dr. Gilberto Hernández Silva, Centro de Geociencias, UNAM

A ellos, muchas gracias por su apoyo y ayuda.

DEDICATORIA

A mis grandes amores:

Humberto... por tu amor, porque la "Tierra giró" y porque:

"Más jura que este mundo
en su locura,
nunca le impedirá
darte la risa, ni la mirada dulce,
ni la caricia..."

Esas que sin saberlo te esperaron
¿milenios? ¿siglos? tal vez eras
para ser despertadas en segundos
por cantos silenciosos de unos ojos
pintados del arcoiris y de estrellas..."
(HMC, 2004)

Ana Carolina... por ser fuente inagotable de amor, enseñanza y sensibilidad!

y la tan esperada Abril (¿Sabina?)... por ser y estar ya, aquí! Te esperamos con
los brazos abiertos!

A los tres, por la fuerza y el valor que representan en mi vida...

¡LOS AMO!

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Oswaldo Téllez Valdés, por dirigir esta tesis y por su apoyo más allá de los límites de ésta. Gracias Téllez!

Al Dr. Enrique Martínez Meyer, no sólo por los comentarios que mejoraron esta tesis, sino por la ayuda incondicional y comprensión, desde el principio.

Al M. en C. Daniel Muñoz Iniestra, por todas las aportaciones hechas para mejorar este trabajo. Por su confianza y apoyo en los últimos 10 años. Gracias Jefe!

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem y al Dr. Gilberto Hernández Silva, por la revisión de este trabajo y por sus comentarios para su enriquecimiento.

Al Dr. Angel Priego-Santander, por el apoyo en la elaboración de los mapas de disección vertical y horizontal, por la formación en el campo de la Ecología del Paisaje, pero sobre todo, por ser un buen amigo!

Al M. en C. Angel Durán, por su ayuda en la elaboración de los análisis estadísticos y por sus porras y apoyo cada vez que fue solicitado.

Al Biól. Humberto Macías Cuéllar, por creer en mí y por "*creer en los ojos y las manos del pueblo en general y en TUS ojos y TUS manos en particular*". Por regresarme a la cordura cuando el desánimo me hacía su presa.

A mis padres Rosa María Moreno y Martín Hernández, que caminaron conmigo al inicio de esta etapa de mi vida, brindándome como siempre, su apoyo incondicional y su amor.

Al perro Vanesso, por este amor que trasciende tiempo y espacio. Te quiero!

A Eu, Carmen, Manu y Chulis, por los momentos de bohemia, de chisme, de recorte y de decisiones importantes para todos.

A Leobardo, por su paciencia y sus palabras de aliento.

A Diana Juárez y Alejandro Rodríguez, porque después de 15 años, aquí seguimos.

A TODOS... ¡MUCHAS GRACIAS!

Contenido

Contenido	4
Indice de tablas y figuras	6
Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Marco teórico	12
2.1. Definición y causas de la degradación de suelos	12
2.2. Tipos de degradación	14
2.3. Sistemas de evaluación de degradación de suelos	17
2.4. Calidad de suelo e indicadores	17
2.5. Unidades de paisaje	19
3. Antecedentes	20
3.1. Desertificación y degradación	20
3.2. Erosión	21
3.3. Indicadores de calidad y salud de suelo	22
3.4. Paisajes	23
3.5. Zona de estudio	24
4. Justificación	27
5. Objetivo	29
6. Localización y descripción del área de estudio	30
6.1. Localización	30
6.2. Clima	30
6.3. Fisiografía	31
6.4. Geomorfología	31
6.5. Geología	32
6.6. Suelos	33
6.7. Hidrología	34
6.8. Vegetación	35

7. Materiales y métodos	37
etapa 1. Reconocimiento y delimitación de las unidades de paisaje	37
etapa 2. Levantamiento de campo	38
etapa 3. Trabajo de laboratorio de sig	39
etapa 4. Análisis y modelaje	40
4.1. Análisis Estadístico	40
4.2. Cálculo de la Erosión Potencial Laminar	41
8. Resultados	46
8.1. Paisajes	46
8.2. Grupo de datos topográficos	57
8.3. Grupo de datos climáticos	62
8.4. Grupo de datos edáficos	65
8.5. Análisis estadísticos	67
8.5.1. Análisis discriminante	67
8.5.2. Análisis de correlación canónica	73
8.6. Estimación del índice de erosión potencial	75
8.6.1. Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (IEPLH)	76
8.6.2. Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica (IEPLE)	84
9. Discusión	90
9.1. Paisajes	90
9.2. Topografía	90
9.3. Clima	92
9.4. Suelo	93
9.5. Análisis estadísticos	95
9.6. Índice de erosión potencial	98
10. Conclusiones y comentarios finales	99
11. Referencias	102
Anexo 1	107

Índice de Figuras

FIGURA	PAG.
Figura 1. Delimitación del área de estudio	36
Figura 2. Delimitación de las unidades de paisaje	49
Figura 3. Cobertura y fotografías panorámicas de las unidades de paisaje.	51
Figura 4. Superficie del valle ocupado por cada unidad de paisaje (%)	52
Figura 5. Mapa de clases de pendiente.	58
Figura 6. Mapa de exposición u orientación del terreno.	61
Figura 7. Mapa de precipitación anual	64
Figura 8. Distancias de Mahalanobis y niveles de significancia, del análisis discriminante	69
Figura 9. Diagrama de dispersión del análisis discriminante y matriz de clasificación	71
Figura 10. Mapas básicos y derivados que se utilizaron para producir el Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (FAO (1980), modificado por SEDESOL-INE (1993)	77
Figura 11. Sobreposición de las coberturas de erosión potencial laminar hídrica y erosión hídrica según Glasod (López <i>et al.</i> , 2003).	79
Figura 12. Sitios de coincidencia entre erosión potencial hídrica alta a muy alta y erosión en canalillos, cárcavas y barrancas, que se manifiesta actualmente.	81
Figura 13. Mapa de Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica con fotografías panorámicas de las condiciones actuales	83
Figura 14. Mapas básicos y derivados que se utilizaron para producir el Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica	84
Figura 15. Sobreposición de las coberturas de Erosión Potencial Laminar Eólica y unidades de paisaje.	86
Figura 16. Mapa de Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica, con fotografías panorámicas de las condiciones actuales	89
Figura 17. Cobertura de la Precipitación del Período del Año (semana) más Húmedo (PPMH)	107
Figura 18. Cobertura de la Precipitación del Cuatrimestre más Húmedo del Año (PCMH).	108

Índice de Cuadros

CUADROS	PAG.
Cuadro 1. Variables empleadas en el análisis estadístico.	41
Cuadro 2. Leyenda del mapa de unidades de paisaje.	50
Cuadro 3A. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Norte del Valle.	53
Cuadro 3B. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Este del Valle.	53
Cuadro 3C. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Centro del Valle.	54
Cuadro 3D. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Sur del Valle.	54
Cuadro 3E. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Oeste del Valle.	55
Cuadro 3F. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Suroeste del Valle.	55
Cuadro 3G. Leyenda de las claves para clases de degradación, profundidad de disección, tipo de roca, de vegetación, de suelo e IEPL Hídrica y Eólica	56
Cuadro 4. Parámetros bioclimáticos (Mullen, 1998)	62
Cuadro 5. Sección de la base de datos del proyecto en donde se agrupan las variables utilizadas: relieve, clima y suelo.	66
Cuadro 6. Resumen del análisis discriminante	68
Cuadro 7. Matriz de correlación del análisis de correlación canónica.	73
Cuadro 8. Matriz de correlación entre grupos de datos edáficos-climáticos-Topográficos	74
Cuadro 9. Matriz de correlación entre la variable dependiente (propiedades de suelo) e independiente (parámetros climáticos y topográficos)	75
Cuadro 10. Relación de la Clase de Erosión Hídrica que podría presentar cada unidad de paisaje.	82
Cuadro 11. Relación de la Clase de Erosión Eólica que podría presentar cada unidad de paisaje.	88

Resumen

El objetivo fue evaluar la degradación del suelo del Valle de Zapotitlán Salinas, mediante el uso de indicadores edáficos, climáticos y topográficos. Se realizó la zonificación del valle en unidades de paisaje. Se elaboró una base de datos, donde se incluyeron dos variables topográficas, 19 parámetros climáticos y 115 registros de muestreo edáfico. Se realizó un análisis discriminante y uno de correlación canónica. Finalmente, se estimó la pérdida potencial de suelo, calculando índices de erosión potencial laminar hídrica y eólica. Se obtuvieron 13 unidades de paisaje diferenciadas por topografía y litología. Las unidades 2, 4, 5 y 6 son las más susceptibles a presentar degradación, debido a la conjunción de los atributos del terreno, lo que sugiere que la pérdida de suelo será mayor en los sitios con pendiente más pronunciada. Las propiedades edáficas, propuestas como indicadores, son aquellas relacionadas con la textura, conducción hidráulica, densidad y contenido de materia orgánica y carbonatos; propiedades vinculadas directamente con los aportes de la precipitación y con su distribución espacial y temporal. Más del 50 por ciento del valle podría perder de 50 a 200 toneladas de suelo por hectárea por año, por erosión hídrica. Las zonas con más riesgo a la erosión eólica son las parcelas desprovistas de vegetación, muchas de ellas presentes en el sistema terrazas aluviales. La zona es muy compleja en su composición y puede verse afectada principalmente por erosión hídrica y degradación física. La información descriptiva y cuantitativa obtenida, puede utilizarse para proponer estaciones de monitoreo de erosión.

Abstract

The main objective was to evaluate soil degradation in the Zapotitlán Salinas valley, using edafic, climatic and topographical indicators. It was carried out the zonification of the valley in landscape units. A database was elaborated, where two topographical parameters, 19 climatic parameters and 115 edafic registrations were included. It was carried out a discriminant analysis and a canonical correlation. Finally, it was estimated the potential soil loss, calculating indexes of potential laminar erosion, hydric and eolic. 13 landscape units were obtained differed by topography and litology. The units 2, 4, 5 and 6 are the most susceptible to present degradation, due to the conjunction of the attributes of the land, what suggests that the soil loss will be higher in the places with more marked slope. The edafic properties, proposed as indicators, are those related with the texture, hydraulic conduction, bulk density and content of organic matter and carbonates; properties related directly with the precipitation and with its space and time distribution. More than 50 percent of the valley could lose from 50 to 200 tons of soil per hectare per year, because of hydric erosion. The areas with more risk to the eolic erosion are the parcels lacking vegetation, many of them present in the fluvial terraces system. The area is very complex in its composition and it could be affected mainly by hydric erosion and physical degradation. The descriptive and quantitative information obtained, can be used to propose stations of erosion monitoring.

1. Introducción

Alrededor de un tercio de las tierras de América latina, 700 millones de hectáreas, corresponden a zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, de las cuales aproximadamente un 75% están afectadas por algún grado de desertificación¹. Este proceso tiene un impacto adverso sobre la calidad de vida y la seguridad alimentaria de las personas (Nieves, 2001a).

Nuestro país no es la excepción, gran parte del territorio (64%) presenta problemas de degradación de suelos debido a procesos como la erosión hídrica o eólica, salinización, contaminación e inundación, por señalar algunos. En el caso de las zonas áridas y semiáridas, éstas presentan la problemática de tener escasa vegetación, ser poco productivas (por la falta de agua) y no tener muchas posibilidades de recuperar su cubierta vegetal original (Montaño y Monroy, 2000).

A pesar de que México ha sido reportado como uno de los países latinoamericanos con problemas de degradación más severos, existe muy poca información sobre los procesos naturales que la provocan, lo que muestra la poca atención que se le ha dado a tal situación; especialmente en las zonas áridas y semiáridas (sitios con una alta riqueza y biodiversidad) (Montaño y Monroy, 2000). Por ello, el conocimiento de los procesos que provocan la degradación, así como de los mecanismos involucrados en el mantenimiento de la diversidad biológica en zonas áridas y semiáridas, es fundamental para el desarrollo y puesta en práctica de estrategias que la detengan, la prevengan e incluso la reviertan.

Las zonas áridas y semiáridas del país revisten gran importancia debido a la riqueza y biodiversidad de especies vegetales y a los niveles de endemismo tan altos que presentan; por ello son consideradas zonas con un alto potencial para la obtención de recursos naturales como materia prima para la subsistencia de los más de 25 grupos indígenas que las habitan y cuyo medio de subsistencia es la agricultura, el pastoreo y la

¹ "Disminución o destrucción del potencial biológico de la tierra, que puede conducir en último caso a condiciones semejantes a desierto. Esto es un aspecto de la extensión del deterioro de ecosistemas, que puede disminuir o destruir el potencial biológico de la tierra, es decir, la producción de plantas y animales, para propósitos de uso múltiple en periodos cuando el incremento en la productividad es necesaria para sostener el crecimiento de la población en búsqueda de desarrollo" (Verstraete, 1986 citado por Zarate, 1994)
Hernández, M.M.M.

recolección de plantas silvestres (Montaño y Monroy, 2000). Sin embargo, se ha planteado que el mal manejo de los sistemas productivos, que son la base de la subsistencia de muchas comunidades campesinas e importantes piezas para el desarrollo económico regional y nacional (Dávila, 1997), así como el desenvolvimiento defectuoso de los procesos de uso y manejo de los recursos naturales, han generado problemas ambientales como degradación de suelos y baja productividad por salinización y erosión (Velasco-Molina, 1991), lo cual pone en riesgo la integridad de la diversidad biológica y cultural, que son los elementos fundamentales que sostienen los procesos productivos (Valiente-Banuet, 1992).

La erosión es uno de los tipos de degradación que más afecta los suelos de las zonas semiáridas; por ello, si el cálculo de un índice de erosión se asocia a condiciones climáticas adversas y a cambios en el uso del suelo, o degradación en la vegetación, se tendrá una evaluación muy cercana de la degradación de tal sitio. Las condiciones climáticas extremas y la acción del hombre pueden causar desequilibrio en los ecosistemas semiáridos. La cobertura vegetal puede verse radicalmente alterada por el hombre en relativamente poco tiempo, pero los cambios físicos y biológicos dentro del suelo que afectan las tasas de erosión, pueden llevar más tiempo (Kosmas *et al.*, 2000); así pues, el equilibrio entre las fuerzas naturales del clima, la agresividad climática y la resistencia natural del suelo contra estas fuerzas, determina el riesgo natural de un área a degradarse y el efecto de la acción humana puede incrementarse o disminuir de acuerdo con la resistencia natural de la tierra (FAO, 1980).

El método GLASOD (Global Assessment of the Current Status of Human-Induced Soil Degradation) (Oldeman, 1988), es ampliamente utilizado en el mundo para obtener un diagnóstico del estado actual de la degradación (tipo, grado y velocidad) de cualquier zona. Sin embargo "pretende lograr la descripción y la cartografía de degradación a nivel cualitativo" (Zárata, 1994). Además hay quienes aseguran que la seriedad del problema es la sobreestimación y que el panorama global que presenta Glasod puede diferir considerablemente de la situación a nivel nacional y local (Crosson, 1977; Scherr, 1999 citados por Baumann, 2000). Según FAO (2000), aún faltan las herramientas analíticas

para estimar de manera confiable la severidad de la degradación y evitar incongruencias (Baumann, 2000). Por otro lado, la información que hay sobre degradación de la tierra es diversa y en algunos casos deficiente y exagerada; además, se conoce poco acerca de su intensidad y dimensión geográfica; y aún menos se ha investigado sobre las causas que la originan y las consecuencias ecológicas, económicas y sociales que provoca (Zárate, 1994).

Por lo anterior, Glasod puede usarse como un método inicial de caracterización de la degradación y complementarse con métodos que cuantifiquen e indiquen de manera real o potencial la posibilidad de ocurrencia de los diversos procesos que la provocan. Por ello el uso de indicadores de salud/calidad de suelo, entendidos como parámetros o propiedades medibles, puede ser la alternativa al reto que se tiene de cuantificar y valorar el estado real de la salud del suelo. También pueden ser utilizados los modelos que permitan conocer la tendencia del comportamiento e interacción de las propiedades edáficas, variables climáticas y topográficas que son elementos básicos de los paisajes y pueden emplearse como indicadores del estado de degradación de un sitio.

2. Marco Teórico

2.1. Definición y causas de la degradación de suelos

La degradación del suelo se refiere a procesos físicos, químicos y biológicos que disminuyen su utilidad, reduciendo su capacidad actual y/o potencial para producir bienes o servicios (FAO,1980; AG/UNEP,1987). Se refiere a procesos dinámicos que responden a un cambio en la calidad y la productividad de los suelos; dichos procesos tienen que ver con la modificación y la alteración de los suelos en relación con un estado anterior o incluso con un estado ideal del mismo (Oldeman, 1988). Propicia cambios climáticos; erosión y salinización de suelos; reducción en la disponibilidad del agua en algunos sitios e inundaciones en otros, pues modifica el ciclo hidrológico; afecta la fijación de la energía; desequilibra la capacidad biológica del ecosistema y por tanto, la permanencia de la biodiversidad; disminuye los focos de vegetación y en general de diversidad biológica, así como la capacidad presente y/o futura del suelo para sustentar vida humana" (Oldeman,1988; Zárate,1994; FAO,2000; Padilla y Albaladejo,2003)._Todo lo anterior provoca el deterioro económico y social de la población asentada en las áreas afectadas (Castillo, 2004).

Diferentes autores señalan diversos procesos y fenómenos como promotores de la degradación de suelos, entre ellos: 1) deforestación y remoción de la vegetación natural, que implica la eliminación de la vegetación a fin de introducir agricultura, la comercialización de la madera o la construcción de infraestructura; 2) sobrepastoreo, con consecuencias como compactación del suelo y disminución de la cobertura vegetal; 3) mal manejo de la tierra, como puede ser la incorporación de zonas agrícolas en sitios con pendientes pronunciadas, donde el suelo tiene condiciones físicas desfavorables (mala estructuración, baja fertilidad, alta pedregosidad, etc) o el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, o de agua de riego de mala calidad y el uso frecuente de maquinaria pesada; 4) sobreutilización y 5) contaminación por actividades de tipo industrial, que implica una pérdida de las funciones productivas del suelo (Zárate, 1994; Baumann, 2000; Stocking y Murnaghan, 2003; Castillo, 2004).

A su vez, esto se relaciona con una compleja red de factores biofísicos, sociales, económicos y políticos de naturaleza local, nacional e incluso global, tales como pobreza, marginación, migración, la rápida transición de sociedades rurales a urbanas y las altas demandas de producción por parte de la creciente población (Pla-Sentis, 1994; Mostafa et al., 1992), Lo anterior, aunado a las condiciones ambientales extremas y escasez de agua en las zonas áridas ha llevado a un rápido empobrecimiento de los suelos.

Asimismo, Castillo (2004) señala como factores causales de degradación de suelos, diversos procesos y elementos entre los que están:

- 1) la erosión hídrica y eólica;
- 2) la erosionabilidad de suelo (susceptibilidad de las partículas del suelos a ser desprendidas y transportadas), considerando como procesos fundamentales su resistencia a la fragmentación y a la dispersión por salpicadura, su capacidad de infiltración y la tasa de escorrentía, mientras que los elementos de mayor relevancia son el agua del perfil, la textura y el contenido de materia orgánica.
- 3) el relieve, en donde se consideran la longitud y el grado de pendiente del terreno.
- 4) el viento, como uno de los principales agentes erosivos, en donde se considera como factores fundamentales la velocidad, el tipo de régimen y la dirección.
- 5) la vegetación, como agente que protege al suelo ante el impacto del agua pluvial, disminuyendo la escorrentía y aumentando la infiltración.
- 6) la sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico, disminuyendo con ello la protección del suelo.

2.2. Tipos de degradación

De acuerdo con FAO (1980), Oldeman (1988) y Zárate (1994) y Stocking y Murnaghan (2003), los principales tipos de degradación de la tierra son:

- 1) Degradación de la cubierta vegetal, definida como la eliminación o destrucción de las plantas por diversos agentes, entre los cuales se incluyen los fenómenos naturales y los provocados por las actividades humanas. Este tipo de degradación incluye:

pérdida de cobertura vegetal y diversidad de especies, aumento en la densidad y número de especies no comestibles y perjudiciales y pérdida de productividad de la tierra.

- 2) Degradación por desplazamiento de material del suelo por movimiento o desprendimiento del material del suelo, cuyos efectos se manifiestan *in situ*, afectando al lugar mismo y áreas circundantes (se incluyen los depósitos locales) y a distancia del lugar donde se originan. Los tipos de degradación por desplazamiento son:
 - a. Erosión hídrica *in situ*:
 - Pérdida del suelo superficial (erosión laminar).
 - Deformación del terreno, en forma de arroyuelos o canalillos, cárcavas o movimientos en masa del suelo.
 - b. Erosión hídrica a distancia:
 - Sedimentación y depósito del material en cuerpos de agua.
 - Inundación.
 - c. Erosión eólica *in situ* con:
 - Pérdida del suelo superficial (deflación).
 - Deformación del terreno: formación de depresiones profundas y dunas.
 - d. Erosión eólica a distancia:
 - Depositación e invasión de arena. Se puede manifestar en forma laminar, de huecos o por formación de otros rasgos como pedestales.

La erosión es un "proceso en el que las partículas del suelo son transportadas, rodadas y arrastradas por diversos agentes, como la fuerza de gravedad, que actúan en forma directa sobre las masas sólidas y semilíquidas del suelo y la roca, o bien por agentes como el agua y el viento que intervienen en la disolución y ruptura de tales partículas" (Hudson, 1990 In: Montaña y Monroy, 2000). El efecto que el agua y el viento (agentes del intemperismo) provocan al actuar sobre la superficie del suelo, son la erosión hídrica y eólica, respectivamente (Colegio de Postgraduados, 1977; ASCE, 1975). La primera es el resultado del desgaste o disgregación del suelo en partículas terrosas debido al impacto de las gotas de lluvia y su transporte por escorrentía; mientras que la segunda, se refiere a la disgregación, remoción y transporte de las partículas del suelo por efecto del viento (TRAGSA, 2003). Una diferencia entre ambos procesos es el efecto del relieve, pues para que se de la erosión eólica no es preponderante que la pendiente del sitio sea pronunciada, mientras que para que se de la hídrica, sí lo es (Castillo,

2004). Existen diferentes formas de erosión eólica: corrosión, abrasión, deflación, extrusión y eflujo. También hay diferentes manifestaciones de la erosión hídrica: tracción, suspensión y solución (Hudson, 1990 In: Montaña y Monroy, 2000).

Este proceso es originado por fenómenos naturales (erosión geomorfológica) o inducido por la creciente actividad humana. Cuando se debe sólo a causas naturales puede haber una tendencia al equilibrio entre los procesos de formación y los de desgaste del suelo, pero cuando el hombre usa y/o maneja inadecuadamente este recurso, altera dicho equilibrio generando condiciones más favorables para que las partículas del suelo sean arrastradas por el agua y el viento (Montaña y Monroy, 2000); a esto se le denomina erosión inducida o acelerada. Esta última es la responsable del deterioro de más de 1500 millones de hectáreas en el planeta, de un total aproximado de 2000 millones de hectáreas desertificadas. Es uno de los tipos de degradación que más ha afectado el territorio mexicano; 80% del territorio nacional muestra diferentes grados de erosión, desde ligera hasta muy grave (Becerra, 1999). Además es uno de los procesos más importantes que denotan el estado de degradación de una región y que son relativamente fáciles de cuantificar o estimar.

3) Degradación por deterioro interno del suelo, en donde los daños no se manifiestan de forma impactante. En ella se consideran la degradación química, física y biológica, y cada una de ellas presenta ciertas características y formas de manifestarse:

- a. Degradación Química. Se refiere a deficiencias de nutrientes provocadas por lixiviación de bases, salinidad y aumento en la concentración de elementos tóxicos. Las manifestaciones son: pérdida de nutrientes o materia orgánica, contaminación, acidificación, salinización, alcalinización o interrupción de la fertilidad inducida por inundación.
- b. Degradación Física. Se refiere a los trastornos provocados sobre las condiciones físicas del suelo (porosidad, permeabilidad, densidad, estabilidad estructural, etc). La forma de manifestarse es a través de sellamiento y encostramiento del suelo

superficial, compactación, deterioro de la estructura del suelo, aumento de la pedregosidad, anegamiento, aridificación o destrucción de suelos orgánicos.

- c. Degradación biológica. Es la reducción del contenido de materia orgánica y de la actividad de la flora y fauna del suelo debido a cambios de las condiciones ambientales, lo cual provoca el desbalance de la actividad biológica del suelo superficial. Esto puede ser causado por deforestación, riego con aguas residuales, aplicación de agroquímicos y pesticidas (Oldeman, 1988). Como resultado de la reducción del contenido de materia orgánica, se provoca la disminución de la fertilidad del suelo, que involucra procesos como los cambios en la concentración de nutrientes y acumulación de sustancias tóxicas (degradación química, además de cambios en las propiedades físicas como estructura, aireación y retención de agua (degradación física).

2.3. Sistemas de evaluación de degradación de suelos

Dada la problemática mundial que representa la degradación del suelo, es de suma importancia entender los procesos que provocan dicho fenómeno. Para ello, se han hecho esfuerzos a fin de crear e implementar diversas herramientas. En 1974, en la Conferencia para la Alimentación del Mundo, FAO, UNESCO y UNEP decidieron preparar un sistema que evaluara los daños causados a los suelos bajo cultivo. En 1979, un grupo inter-agencias publicó una metodología provisional para la evaluación de degradación de suelos y mostraron una primera aproximación para la identificación de áreas con riesgo de degradación por erosión hídrica, eólica y salinización. Se generaron mapas a escala 1:5,000,000 para Africa, el norte del Ecuador y el Medio Oriente (FAO, 1979). En 1987, la UNEP reúne a un grupo de especialistas con el fin de preparar, aunque todavía se tenía poca información, un sistema de evaluación de degradación científicamente aceptable. En 1990, ISRIC (Centro Internacional de Información y Referencia del Suelo) /UNEP (Programa del Medio Ambiente de Naciones Unidas) publican el Mapa de Degradación de Suelos Inducida por el Hombre (GLASOD) a escala 1:10,000,000 (Mostafa et al., 1992). GLASOD (Global Assesment of the Current Status of Human-Induced Soil Degradation) (Oldeman, 1988), es entonces, una metodología que surge a principios de los años 90,

que plantea la evaluación de los diferentes tipos de degradación (erosión hídrica, erosión eólica, degradación química, física y biológica del suelo); la intensidad de los daños (leve, moderada, fuerte, excesiva) y las causas de la degradación (deforestación, pastoreo excesivo, mal manejo de la tierra, sobre-utilización y contaminación) a nivel global (Baumann, 2000).

En 1994, UNEP y las oficinas regionales de FAO en Asia implementan el mismo sistema en el sur y sureste de Asia, generando la "Evaluación del nivel de la degradación del suelo inducida por el hombre en el sur y sureste de Asia (ASSOD). El mapa resultante es en escala 1: 10,000,000 (van Lyden y Oldeman, 1997).

2.4. Calidad de suelo e indicadores

Para hablar de degradación de suelos es necesario entender el concepto de calidad de suelo, definida como la capacidad continua del suelo para funcionar como un sistema viviente, dentro de los límites de los ecosistemas naturales y manejados, para sostener la productividad biológica, promover la calidad del aire y del agua y mantener la salud de plantas, animales y humanos (Doran *et al.*, 1996; Wander y Drinkwater, 2000). Es un concepto que se ha visto como el balance de tres aspectos: productividad sustentable, calidad ambiental y salud de plantas y animales. A fin de medir la salud/calidad del suelo, es necesario emplear parámetros o propiedades del suelo que funcionen como indicadores de su estado. De acuerdo con (Arshad y Martin, 2000; Wander y Drinkwater, 2000; Nortcliff, 2002; Doran, 2002; Bouma, 2002; IUGS, 2001); los indicadores deben:

- 1) ser medibles por los interesados en su uso, especialmente aquellos que manejan la tierra y no deben estar limitados a los investigadores de las ciencias agrícolas o medioambientales. Por ello deben ser de fácil manejo y respuesta clara y rápida y sensible hacia los cambios ambientales.
- 2) definir la mayor cantidad de procesos ecológicos en el suelo y asegurar que las mediciones hechas reflejen las condiciones tal y como existen en el campo, bajo un

sistema dado de manejo, por lo que deben explicar claramente la relación causa-efecto.

- 3) relacionarse a la mayor cantidad de funciones y procesos de los ecosistemas y evidenciar cambios, tendencias y velocidades con la que ocurren los fenómenos. Es decir, deben ser de amplia distribución y se debe poder evaluar magnitudes, frecuencias, tasas y tendencias de los procesos.

A fin de comprender y evaluar la dinámica de los procesos degradativos en el marco de la calidad del suelo, es importante concebir cualquier área afectada como un todo que tiene que ser desmembrado o seccionado para lograr un mejor entendimiento de su dinámica. Abordar esta problemática desde el punto de vista paisajístico facilita dicha tarea.

2.5. Unidades de Paisaje

Un paisaje natural, definido por Mateo (2002) quien cita a Timashev (1999), es un "área de la superficie terrestre de cualquier dimensión, en cuyos límites los diferentes componentes naturales (la estructura geológica incluyendo la litología, el relieve, las masas de aire atmosférico, el clima, las aguas, los suelos, la vegetación y el mundo animal) tanto en estado natural, como modificados y transformados por la actividad humana, se encuentran en estrecha interacción formando un sistema integrado". Es considerado como un sistema que contiene y reproduce servicios y recursos naturales, un medio de vida y de actividad humana, un fondo genético, un laboratorio natural, e incluso fuente de percepciones estéticas y de valores éticos y culturales. Son sistemas que se conciben como entidad poliestructural, que se manifiesta en la articulación compleja entre tres formas de organización paisajística: 1) la geoestructura morfolitogénica, 2) la geoestructura hidroclimática y 3) la geoestructura biopedogénica. Por tanto, los paisajes son formaciones complejas, que se caracterizan por la heterogeneidad en la composición de los elementos que lo integran, por las múltiples relaciones que experimenta, por la variación de los estados y por la diversidad jerárquica (Mateo, 2002). En otras palabras, son escenarios que pueden ser claramente percibidos por el hombre y que están formados por elementos integrados; por lo que se les ha utilizado como herramienta de

análisis territorial o geográfico (García y Muñoz, 2002). Por ello mediante el conocimiento y análisis de los paisajes como unidad básica de estudio, puede llegarse a la evaluación del potencial y calidad de los recursos naturales y de la afectación que éstos han sufrido por procesos degradativos; con lo que puede hacerse una planeación del uso y manejo óptimo de los recursos e implementarse medidas de gestión y protección ambiental.

3. ANTECEDENTES

3.1. Desertificación y degradación

Durante la última parte del siglo XX cambió la percepción general de la importancia del suelo como un componente del ambiente, reconociéndose la necesidad de mantener o mejorar su capacidad para cumplir las diversas funciones ecológicas y económicas que tiene, ya que se ha reconocido que no es un recurso natural perdurable y que si se usa inadecuadamente o se le da un mal manejo será prácticamente imposible recuperarlo (Nortcliff, 2002). Por ello se han realizado numerosos estudios encaminados a la evaluación y conocimiento del estado de degradación en diferentes sitios.

Ejemplos importantes son los estudios de Warren y Agnew (1988) quienes presentan una revisión conceptual acerca de la evaluación de la desertificación y la degradación de tierras en zonas áridas y semi-áridas, en la que se definen ambos procesos y las causas que los propician. Además se discute la problemática asociada a su diagnosis y evaluación, se relacionan con el clima y proponen la línea a seguir en la solución de la problemática actual a nivel global.

CONAZA-SEDESOL (1994), dentro del Plan de Acción para combatir la desertificación en México plantea que el problema de la desertificación es integral y comprende diversos componentes físicos, químicos y biológicos, que interactúan con las variables sociales y económicas de cualquier área. Diversos autores muestran técnicas desarrolladas por ellos para identificar zonas con potencial y riesgo de desertificación y elaborar su cartografía, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota, en un intento para evaluar la sensibilidad ambiental de una zona (Aharoni y Ward, 1997; Basso *et al.*, 2000; Del Valle *et al.*, 1997). También utilizando los SIG se ha realizado la evaluación y cartografía de la degradación actual de los suelos mediante el uso de las metodologías propuestas por FAO para degradación química, física y biológica (GLASOD) y la Ecuación Universal de pérdida de suelo (EUPS) para erosión hídrica y eólica (FAO, 1980; Torres *et al.*, 2002; López *et al.*, 2003). De forma

aplicada, Tong *et al.* (2004) hacen una valoración de la distribución espacial y la severidad de la degradación utilizando un modelo a nivel de paisaje, en el que desarrollan un índice de degradación de praderas que integra información espacial y la severidad de la degradación. En una serie de tres publicaciones Tongway *et al.* (2003); Friedel *et al.* (2003) y Sparrow *et al.* (2003) intentan probar el impacto del pastoreo en paisajes naturales heterogéneos en una zona árida. Concluyen que el pastoreo es un factor causante de la degradación de los sitios cerca de los abrevaderos debido al cambio en la proporción y distribución del agua y los nutrientes del suelo. Además evalúan el efecto del pastoreo en la degradación de la vegetación.

Diversos autores han encontrado que las condiciones climáticas adversas, los terrenos irregulares con pendientes pronunciadas, material parental y largos períodos de mal uso y manejo del suelo, son los principales factores responsables de la degradación del suelo en zonas mediterráneas; y que los suelos derivados de diferentes materiales parentales reaccionan de forma diferente a la vegetación, a la erosión del suelo y a la desertificación (Yassoglou y Kosmas, 1990 citado por Kosmas *et al.*, 2000). Por ejemplo, las calizas producen suelos poco profundos con un régimen de humedad relativamente bajo, caracterizados por una alta erodabilidad y una baja cobertura vegetal. Finalmente Ahmed y Mansell (2000), hacen una valoración de los efectos ambientales de la degradación sobre algunos parámetros climáticos.

3.2. Erosión

La erosión hídrica sigue siendo la causa principal de degradación del suelo debido principalmente al mal manejo de los suelos, el sobrepastoreo y la deforestación (Figueroa *et al.*, 1991; Zárate, 1994; Becerra, 1999; Baumann, 2000; Montaña y Monroy, 2000; Stocking y Murnaghan, 2003). Para mitigar esta problemática una de las propuestas ha sido implementar programas de conservación de suelos a nivel local, considerando los problemas socioeconómicos que propician la degradación de los ambientes (Baumann, 2000).

A fin de generar y proponer estrategias de manejo integral de suelos diversos autores cuantifican la velocidad actual y el riesgo de erosión mediante el uso de sistemas de

información geográfica y de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) que utiliza factores de ponderación de las condiciones climáticas (erosividad), edáficas (erodabilidad), topográficas (pendiente y longitud de pendiente) y de vegetación y uso del suelo (cobertura y prácticas de manejo); en donde concluyen principalmente que las zonas más afectadas por erosión son aquellas en donde el suelo está más desprotegido y en donde ocurren las pendientes más abruptas (López-Bermúdez, 1990; Figueroa *et al.*, 1991; Centeri *et al.*, 2000; Pimentel *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2000; Hernández, 2001; Betancourt *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2002). Asimismo, hay quienes utilizan las propiedades edáficas como indicadores para medir y predecir erosión en canales y movimientos en masa (Bouma e Imeson, 2000).

Se han realizado trabajos a nivel local y de semidetalle con la finalidad de ubicar espacialmente el problema, determinar áreas y proponer niveles de erosión, para orientar acciones y obras de conservación. Para ello diversos autores han realizado esfuerzos encaminados a evaluar y cuantificar la erosión y la escorrentía superficial a nivel experimental, sugiriendo principalmente mantener la cobertura vegetal a fin de mitigar el efecto de los factores erosivos sobre el suelo (Chávez y Carmona, 1994; Becerra, 1999; Gardner y Gerrard, 2003; Gómez, 1994).

3.3. Indicadores de calidad y salud de suelo

Diversos autores discuten sobre las condiciones de cambio y mal manejo de los recursos, que han resultado en graves daños al suelo como componente natural y fundamental en el desarrollo de la vida humana. Proponen la forma en la que pueden ser seleccionados los indicadores físicos, químicos y biológicos y el procedimiento para monitorear los cambios en las tendencias de la calidad del suelo. Para ello consideran criterios de producción agrícola, pero también de conservación de la naturaleza, es decir, agroecológicos. En diversos trabajos se enfatiza la necesidad de desarrollar investigación en torno a la propuesta de indicadores que puedan ser fácilmente evaluados por los agricultores, y señalan que la materia orgánica y las propiedades relacionadas con ésta, son los indicadores más promisorios para la valoración de la calidad del suelo. Finalizan

con la idea de que, entre mas fácil sea evaluar la calidad del suelo, mas ágil será la gestión de políticas públicas que promuevan el manejo del suelo para asegurar que las actividades agrícolas e industriales, así como el medio ambiente sean sostenidos; situación en la que los agricultores, los científicos y los políticos deben mantener un lazo de comunicación in-interrumpido (Arshad y Martin, 2000; Wander y Drinkwater, 2000; Nortcliff, 2002; Doran, 2002; Bouma, 2002).

A este respecto, se han realizado numerosos trabajos en torno al uso de parámetros edáficos y otras variables de medio físico como indicadores de degradación de suelos, tales como textura, profundidad del suelo, contenido de materia orgánica, cantidad de agregados estables, densidad aparente, tipo de material parental, eliminación de cobertura vegetal, topografía y clima (Albaladejo *et al.*, 1998; Kosmas *et al.*, 2000; Sacchi y De Pauli, 2002).

3.4. Paisajes

En el presente trabajo se han utilizado las unidades de paisaje como unidad de estudio, considerando el planteamiento geoecológico propuesto por Mateo (2002); quien da los fundamentos conceptuales, teóricos, metodológicos y prácticos de la Geografía de los Paisajes, dando énfasis a los Paisajes Naturales. Realiza un análisis sistémico y holístico, que permite analizar al paisaje desde una posición sistémica, concibiéndolo como una categoría particular de geosistema natural. En un trabajo posterior, se plantea el uso de un enfoque sistémico como herramienta de análisis integral para el estudio de la degradación geoecológica del paisaje, en el que se contempla el equilibrio entre los atributos intrínsecos del medio ambiente y la interrelación entre ellos y la forma en que el hombre se apropia, usa y maneja los recursos naturales. Se presentan conceptos básicos relacionados a la degradación geoecológica; propiedades y procesos de estructuración de los paisajes y una propuesta metodológica de clasificación por niveles de degradación de paisajes, mediante la definición de criterios de evaluación. Finalmente, se presenta una propuesta para abordar la degradación geoecológica como instrumento de análisis en la planificación y gestión ambiental y de la construcción de modelos teóricos para incorporar la sustentabilidad al proceso de desarrollo (Mateo y Ortiz, 2001). Por su parte, García y

Muñoz (2002) hacen una contribución a la Geografía del Paisaje, desde el punto de vista metodológico, en donde proponen al paisaje como una "unidad espacial fenológica cuya homogeneidad es claramente reconocida y simultáneamente diferenciada de otras unidades contiguas. De esta percepción se desprende una concepción sistémica del paisajes, es decir, no sólo se analiza la estructura que lo conforma o la fisonomía; también se estudian los aspectos dinámicos y funcionales que abarcan la totalidad de los componentes ambientales incluyendo al hombre". De forma aplicada Priego-Santander (2004) utiliza el enfoque geocológico o ecológico-paisajístico para estimar la heterogeneidad del espacio geográfico con el objetivo de probar la relación entre la variabilidad de los paisajes y la distribución de la biodiversidad, así como para demostrar la viabilidad de los geocomplejos como indicadores de distribución de la diversidad biológica, en ecosistemas costeros tropicales en Cuba y México. Concluye que la riqueza florística puede ser predicha por valores de heterogeneidad geocológica. En este sentido, sugiere explorar la probable existencia de zonas de elevada biodiversidad en áreas de difícil acceso o poco conocidas, mediante análisis de heterogeneidad de paisajes físico-geográficos e incorporar estos indicadores como herramientas del ordenamiento ecológico y el diseño de áreas protegidas, además de servir para elaborar hipótesis cartográficas que pueden resultar de interés en la biogeografía histórica.

3.5. Zona de estudio

Respecto a los trabajos realizados en la zona de estudio García (1991) realiza un estudio de la influencia de la dinámica del paisaje en la distribución de las comunidades vegetales. Neri (2000), hace una caracterización hidrológica de la Subcuenca baja del Río Zapotitlán. Barrera (2001), elabora una regionalización fisiográfica y una descripción geomorfológica con la finalidad de delimitar y caracterizar las distintas unidades geomorfológicas que conforman el Valle de Zapotitlán. García (2001), realiza un mapeo y caracterización de las terrazas aluviales del Valle. Rivas (2003) y Santillán (2003) presentan el levantamiento edafológico semidetallado de la porción norte y suroeste, respectivamente.

Valiente-Banuet *et al.* (1991) presentan la relación espacial entre las cactáceas y los arbustos nodrizas en el Valle de Zapotitlán. Oliveros (2000) caracteriza la estructura de las comunidades vegetales en las terrazas fluviales del río Salado en el Valle de Zapotitlán. Paredes (2001) realiza un estudio etnobotánico de la flora útil de Zapotitlán. Morín (2003) produce un inventario florístico de las terrazas aluviales.

López *et al.* (2003) hacen una evaluación del efecto de parámetros geomorfológicos, material parental, suelos y atributos climáticos en el establecimiento de las comunidades vegetales y en la degradación del suelo a lo largo de una toposecuencia de 28 km, en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, con la finalidad de aportar información básica para diseñar estrategias de conservación y rehabilitación de sistemas naturales deteriorados del área. Mencionan que, de 270 km² evaluados, existen 86.5 km² afectados por erosión hídrica y eólica. Concluyen que el clima, la heterogeneidad fisiográfica y edáfica, conjuntamente con las actividades productivas han influido para que el proceso de degradación de suelos se manifieste de diferentes formas y grados de afectación, así como en el establecimiento de formas biológicas específicas, que se disponen en forma de gradiente o formando unidades discretas. Castillo (2004) caracteriza el impacto de la degradación de tierras y fragmentación de hábitats en el Valle Aluvial de Zapotitlán Salinas, mediante la evaluación del estado de conservación de sitios con diferente grado de deterioro. Encuentra que 1210 ha, están afectadas por erosión hídrica y 548 ha, no presentan problemas de degradación. En cuanto al estado de conservación de las terrazas aluviales, ubica a dos de los sitios evaluados, en la categoría Relativamente Estable; dos En Peligro; y uno, en situación Crítica. Puntualiza que los factores que propician la fragmentación son el desmonte para permitir uso agrícola, la extracción de materiales para la minería, la obtención de sal, la compactación, los altos índices de salinidad en el suelo, la poca actividad orgánica, el estrés hídrico y la erosión. Recomienda realizar acciones de conservación de suelo y agua, preservar los sistemas naturales relictuales, restaurar áreas degradadas con flora nativa de importancia local y tratar de mantener la conectividad entre los fragmentos del paisaje. Hinojosa (2004) define la aptitud y capacidad de uso agrícola y pecuario de las tierras de la Subcuenca baja de Zapotitlán Salinas, utilizando el criterio de Duch (1981). Encontró por un lado, que

el 45% de la zona son terrenos sin vocación agrícolas y que pueden ser destinados para prácticas de conservación de sistemas naturales. Por otro lado encontró que el 42% de la zona son terrenos de relieve irregular y pendientes pronunciadas que no permiten la movilidad del ganado, pero que sí presentan flora forrajera y que el 17.5%, no permite actividades pecuarias. Solamente el 4.2% de las tierras de la zona permiten el establecimiento de praderas cultivadas. Concluye que debido a la heterogeneidad de los materiales, del relieve y de la vegetación existente, la subcuenca presenta mayor aptitud para uso pecuario. Hernández (2005), presenta una evaluación del estado actual de degradación de tierras de la Cuenca Zapotitlán Salinas, comparando los procesos de degradación a través de un período de 33 años; a fin de proponer estrategias de manejo dirigidas a disminuir la degradación de tierras. Para definir los tipos y grados de degradación de tierras, aplicó como criterio el sistema internacional "Global Assessment of the Current Status of Human-Induced Soil Degradation (GLASOD)", complementado con la guía "The Assessment of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD)", modificados de acuerdo a la escala regional y condiciones naturales de la zona de trabajo. Encontró que los tipos de degradación que más han afectado la Cuenca son: la erosión hídrica, que en el período de 33 años, se incrementó en 7,300 ha de afectación y la degradación biológica, cuya superficie de afectación aumentó a 2500 ha. Mientras que las zonas que no presentaron procesos de degradación, disminuyeron en 8200 ha. Concluye que los procesos causativos de la degradación son: la erosión hídrica y eólica, el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola, la extracción de materiales para la minería, la obtención de sal, la compactación y los altos índices de salinidad en el suelo. Recomienda ejecutar acciones de restauración y conservación de suelo y captación de agua, preservar los sistemas naturales, reglamentando el uso del suelo y elaborando programas de conservación y manejo racional de recursos comunitarios.

4. Justificación

Las zonas áridas y semiáridas cubren más de 1/3 de la superficie terrestre, donde se halla establecida alrededor del 30% de la población mundial (FAO, 2000). Estos ecosistemas son reconocidos por su fragilidad al deterioro, pues se sabe que a nivel global al menos seis millones de hectáreas se pierden por año en zonas áridas y semiáridas y que para 1992, el 70% de las 5172 millones de hectáreas ocupadas por zonas áridas en el mundo (excluyendo a los desiertos hiper-áridos), estaban deterioradas principalmente por aridificación natural (por cambios climáticos globales) y por sobre-explotación, explotación inadecuada o por la conjunción de ambos factores. Es además, en zonas áridas en donde las estadísticas y los trabajos que contribuyen al conocimiento del proceso de deterioro son más escasas (Mostafa et al., 1992) y en donde menos se sabe de los procesos que llevan al deterioro y las formas de revertirlo. Son ecosistemas complejos con potencial natural suficiente para propiciar una buena calidad de vida para sus poblaciones si se adopta una concepción del desarrollo que sea socialmente justa, ecológicamente sustentable, culturalmente apropiada y basada en una visión holística de la ciencia y la naturaleza (Ebert, 1992). Una de las maneras para favorecer el desarrollo sustentable y la incorporación a la economía de las zonas áridas y semiáridas, es mediante los intentos que se hagan para disminuir los efectos del deterioro ambiental y la desertificación (Ezcurra, 1990).

México ha sido reportado como uno de los países latinoamericanos con procesos de degradación severa por efectos de la erosión (CONAZA-SEDESOL, 1994). Esta situación ha sido favorecida por condiciones naturales como su contrastante distribución climática y accidentado relieve, pero sin duda, acelerada por la inadecuada explotación de la tierra por parte de la creciente población nacional, la cual se ha sextuplicado en el último siglo, con consecuencias como: una deforestación excesiva de bosques y selvas, prácticas agrícolas en terrenos con fuertes pendientes y sobre todo, una ganaderización de gran parte del país con sobre pastoreo en muchos casos. Por ello se puede afirmar que alrededor del 80% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica y eólica (Becerra, 1999).

El Valle de Tehuacán-Cuicatlán es una de las zonas semiáridas del país más importantes debido a que ha sido reconocida como centro de mega diversidad biológica y endemismo a nivel mundial por la UICN (Dávila, 1997) y que presenta una gran riqueza antropológica, paleontológica y cultural (Valiente-Banuet *et al.*, 2000). Como resultado de diversos factores naturales y humanos, en la actualidad el Valle de Tehuacán-Cuicatlán es una región en donde es posible observar zonas con diversos niveles de deterioro, así como grandes extensiones de áreas conservadas, en donde el uso ha sido mínimo. Este mosaico de formas de uso y grados de conservación del paisaje, hacen de la región un modelo de estudio ideal para investigar el proceso de degradación en sus diferentes facetas y desde diversos puntos de vista. Dentro del Valle de Tehuacán-Cuicatlán existen varias zonas que permiten particularizar aún más este modelo de estudio. Una de ellas es el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla que “presenta una problemática ambiental bien definida que permite suponer la existencia de baja productividad, desertificación y desertización, alteración de los sistemas naturales, desequilibrio en los procesos e interacciones ecológicas, disminución y pérdida de la biodiversidad” (UBIPRO, Inédito).

En este sentido la presente investigación propone dar continuidad a los estudios previos que se han realizado en torno a esta problemática dentro del proyecto general de la UBIPRO-FES Iztacala, cuyo objetivo general es reconocer y caracterizar los procesos biológicos, físicos y químicos involucrados en el deterioro de la zona (UBIPRO, Inédito); con lo que se intenta tener una evaluación de los procesos de deterioro, principalmente la erosión laminar hídrica y eólica que potencialmente afectarían el Valle de Zapotitlán Salinas.

5. Objetivo

Evaluar la degradación del suelo del Valle de Zapotitlán Salinas mediante el uso de indicadores edáficos, climáticos y topográficos.

Particularmente

1. Reconocer, identificar y describir las unidades de paisajes que forman el Valle de Zapotitlán Salinas.
2. Determinar la variación de los parámetros edáficos, climáticos y topográficos, como agentes determinantes de la degradación.
3. Evaluar la erosión potencial laminar hídrica y eólica.
4. Seleccionar los mejores indicadores físicos que ayuden a la evaluación de la degradación del suelo por erosión y determinar su importancia.
5. Evaluar la participación de parámetros edáficos, climáticos y topográficos como promotores de los procesos de degradación en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla.

6. Localización y descripción del área de estudio

6.1. Localización

El Valle de Zapotitlán Salinas se encuentra en la porción occidental del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, al sureste del estado de Puebla y zonas adyacentes al noroeste de Oaxaca. Limita al este con las Sierras de Atzingo y Miahuatepec, al norte con los cerros Chacateca y Pajarito; al oeste con los cerros Gordo y Otate, y al sur con los cerros Yistepec y Acatepec (Osorio, 1996). Considerando únicamente la cuenca Zapotitlán (subcuenca baja), tiene una superficie aproximada de 270 km² y se ubica entre los 18° 12' y 18° 24' de latitud norte y los 97° 24' y 97° 36' de longitud oeste, con un rango altitudinal de 1460 a 2600 msnm (INEGI, 1984a, 1984b).

6.2. Clima

El Valle está en la parte norte del Valle de Tehuacán, en el que el clima está determinado en gran medida por la presencia de la Sierra Zongolica, perteneciente a la Sierra Madre Oriental localizada al Noreste. Debido a ello se cree que los vientos húmedos provenientes del Golfo de México, se detienen formando, con sus crestas de hasta 2,600 m, una sombra orográfica sobre el Valle (Zavala, 1980). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973), el clima de Zapotitlán Salinas corresponde a un BSohw"(w)(e)g, seco con régimen de lluvias de verano, con temperatura media anual 17.6 y 23.7°C y poca oscilación térmica que varía entre 5 y 7°. El mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano y presenta canícula bien definida a mitad del período de lluvias, la precipitación media anual es de 412.4 mm (López *et al.*, 2003).

En lo referente a la precipitación existen marcadas diferencias año con año por lo que otros trabajos reportan hasta un mínimo 380 mm de precipitación media anual; aún así, pero sin dejar de variar desde diciembre como mes más seco hasta junio como el mes más húmedo (Secretaría de Gobernación, 1988).

6.3. Fisiografía

El Valle de Zapotitlán Salinas se encuentra aproximadamente entre los 1000 y 2600 msnm (Fuentes, 1971); queda comprendido en dos regiones morfológicas; la porción Norte es parte de la Provincia del Valle de Tehuacán que forma parte de la Cuenca Alta del Río Papaloapan y el resto queda incluido en la Provincia de la Sierra de Zapotitlán que se ubica hacia el Suroeste del Valle de Tehuacán; mostrando un relieve montañoso en general, mismo que recorre el Norte, Este y Sur declinando hacia el centro-Este, donde el municipio alcanza su menor altura (Secretaría de Gobernación, 1988); el declive está definido por laderas y taludes de cerros como el Pajarito, el Calvario y el Chacateca que se encuentran al Norte, el Cerro Corral de Piedra al Sur y el Cerro la Mesa al Oeste (Zavala, 1980).

Retomando el sistema OXFORD-MEXE (1970), el Valle pertenece a la División terrestre: Sierra Madre del Sur, Región terrestre: Sierras Centrales de Oaxaca, Provincia Terrestre: Alta Mixteca, Subprovincia: Sierra de Zapotitlán y propone la existencia de 9 Sistemas Terrestres: Acatepec, Agua de Burro, Aluvión, Cipiapa, Matzitzí, Metzontla, Miahuatepec, San Juan Raya y Zapotitlán. De ellos Zapotitlán y Metzontla abarcan la mayor superficie, con el 31% y 26% respectivamente. Agua del Burro y Aluvión son los Sistemas más homogéneos debido a la relación entre la superficie del valle y el número de unidades que contiene; considera que fisiográficamente la zona es compleja y extremadamente variable, como consecuencia del origen y antigüedad del área (Barrera, 2000).

6.4. Geomorfología

El Valle presenta un relieve muy complejo, producto de la acción de múltiples procesos endógenos y exógenos y que se refleja en la variación altitudinal y en las fluctuaciones de las pendientes, así como en sus formas. Las principales formas mayores del relieve, mismas que han sido determinadas por distintos eventos tectónicos, tecto-volcánicos y morfodinámicos (erosión-denudación) son: elevaciones, piedemontes, planicies denudativas y estructurales, elevaciones menores y terrazas fluviales. Las elevaciones son

de origen tectónico con estructuras plegadas y con modelado erosivo, que definen formas como lomas, cerros y sierras, de cimas redondeadas, cuevas y laderas convexas. En la base están los piedemontes la mayoría denudativos. Las planicies son superficies rebajadas, cuyo aplanamiento fue ocasionado por erosión diferencial que desgasta irregularmente materiales de distinta dureza, las terrazas son las principales formas de acumulación. La mayoría de las formas son estables, sin embargo hacia el noreste de la cuenca se detectó una franja de inestabilidad con frecuentes movimientos en masa. La complejidad y variabilidad de las formas del relieve se ve reflejada en la formación de múltiples meso y microambientes, las combinaciones entre los gradientes térmicos de humedad, las distintas litologías, formas del relieve y suelos son muy grandes, esto ha determinado la formación de un sinnúmero de hábitats lo que seguramente ha favorecido la gran biodiversidad que presenta el sitio (Muñoz *et al.*, 2004). Además, esta diversidad de unidades geomorfológicas es producto del efecto de diversos procesos geológicos como plegamientos, tectonismo regional y fenómenos de erosión remontante, así como del efecto de las variaciones climáticas y de la sucesión de medios ambientes en el pasado (Valiente-Banuet *et al.*, 2000; López *et al.*, 2003).

6.5. Geología

De acuerdo con Brunet (1967), Fuentes-Aguilar (1971), Calderón (1956), Nava (1965) y López-Ramos (1981) citados por García (1991) y Valiente-Banuet *et al.* (2000) la historia geológica del Valle de Zapotitlán puede resumirse en los acontecimientos siguientes:

- 1) La formación del "Complejo Basal" que data del Paleozoico y principios del Mesozoico (Jurásico), compuesto por rocas metamórficas (mármoles, esquistos, pizarras, gneisses, cuarcitas), sedimentarias (areniscas y lutitas) y volcánicas (diques). La mayoría de las rocas son de origen continental y se agrupan dentro de la Formación Matzitzi. Afloran las Sierras Zapotitlán, Miahuatepec y Atzingo debido a deformaciones tectónicas e intrusiones magmáticas.
- 2) Al principio del Cretácico inferior, la cuenca sufre una inmersión formándose el Portal de Balsas.

3) A finales del Cretácico inferior y hacia el Terciario, una serie de plegamientos terminan de conformar las principales sierras de la cuenca, que con el último evento tectónico (formación Ciciapa), pierde su conexión con la Depresión del Balsas, dando como resultado una cuenca endorreica.

4) A principios del Cuaternario, la cuenca endorreica fue seccionada por fenómenos tectónicos (neotectónicos), drenando los escurrimientos y entonces el Río Santo Domingo, afluente del Río Papaloapan, captura por erosión remontante al Río Salado y sus tributarios, entre ellos el Río Zapotitlán; drenándose de esta forma hacia la Cuenca del Papaloapan.

5) Del Cuaternario tardío (Pleistoceno-Holoceno) se tienen muy pocos datos y sólo se sabe que tuvieron lugar importantes variaciones climáticas, del orden de 1×10^5 a 1×10^3 años antes del presente, que dieron como resultado la formación y evolución de suelos, abanicos aluviales, piedemontes y depósitos fluviales y aluviales; por lo que se considera que este último período es quizá el más importante en la configuración geomórfica, pedológica y biótica actual del Valle.

La litología superficial del área está dominada por asociaciones de rocas sedimentarias como: calizas, lutitas, conglomerados y areniscas. Una parte del valle pertenece a la formación Zapotitlán, que consiste en una serie de lutitas con bancos margosos que afloran en los alrededores de Zapotitlán, pertenecientes al Barremiano Superior, que descansan sobre rocas metamórficas del complejo basal en las localidades del arroyo Carrizal y al Sureste de Acatepec. Ahora bien, hacia el Oeste y Norte de los Reyes Metzontla, Norte y Este de San Francisco Xochiltepec y al Este de San Luis Atolotitlán y Santiago Coatepec el basamento lo constituyen rocas continentales del Jurásico (Díaz, 1991).

6.6. Suelos

La Subcuenca de Zapotitlán presenta cinco grupos mayores de suelo (FAO-UNESCO, 1994): Leptosoles, Regosoles, Fluvisoles, Feozem y Calcisoles. Los Leptosoles y Regosoles son los que cubren mayor extensión; los primeros se localizan en geoformas

antiguas y erosionadas (zona oeste), asociándose también con los Feozem. Los Regosoles se encuentran principalmente hacia el noroeste en paisajes más recientes sobre relieves accidentados con fuerte abarrancamiento. Rumbo al noroeste, se distribuye una pequeña área de suelos maduros identificados como Calcisoles que muestran el desarrollo de horizontes con acumulación de arcilla saturados con carbonatos. En las partes de menor altitud del valle, sobre geoformas de terrazas aluviales, se encuentran los Fluvisoles, suelos formados por la depositación del material transportado como resultado de la erosión. Particularmente en esta zona, las unidades de suelo predominantes son Fluvisoles y Regosoles calcáricos (Muñoz *et al.*, 2001; García, 2001; Rivas, 2003; Santillán, 2003)

6.7. Hidrología

El Valle de Zapotitlán pertenece en su mayor parte a la Región Hidrológica (RH 28) de la Cuenca del Río Papaloapan (A); sólo el extremo Suroeste corresponde a la Cuenca del Río Balsas y particularmente a la Subcuenca del Río Salado (e). La Cuenca Hidrológica de Zapotitlán en su parte Alta, en su límite Suroeste, en donde se encuentra el cerro Otate y el cerro Gordo, presenta numerosos arroyos intermitentes que bajan en varias direcciones y se concentran en un arroyo principal ubicado en el Centro-Oeste, llamado Agua la Iglesia, (junto al poblado de San Juan Raya), principal afluente del Río Zapotitlán, y que una vez viaja a la Subcuenca Baja atravesando el parteaguas, pasando por el poblado de Zapotitlán de las Salinas. En dirección Este, sale de la Subcuenca Baja donde se une al Río Tehuacán en el valle del mismo nombre, para formar el Río Salado, uno de los principales afluentes del Río Papaloapan (Secretaría de Gobernación, 1988). La Cuenca del Río Zapotitlán tiene un área de 396 km². El río principal es maduro con pendiente suave y planicies de inundación a sus lados. Estas se encuentran formadas por material de arrastre, determinando que la vegetación de las partes más bajas sea de matorral espinoso, con algunas especies freatofitas, tal como *Prosopis laevigata*; a diferencia de las partes altas, donde los suelos son someros y la vegetación es matorral crasicaule de condiciones más xerófilas en donde dominan las cactáceas columnares. La subcuenca baja del río Zapotitlán se subdivide en 12 microcuencas, de diferentes

dimensiones, perímetro, longitud de su cauce principal y diferente patrón de escurrimiento; esto se debe a las diferencias de constitución y características de la estructura geológica, pendientes y tipo de suelo. Es por ello que se presentan patrones de drenaje de tipo dendríticos, paralelos y enrejados. Cada microcuenca tiene características propias que determinan un funcionamiento particular (Neri, 2000).

6.8. Vegetación

La vegetación se considera como un relictos del matorral xerófilo que alguna vez imperó en todo el Valle de Tehuacán, destacando que el 29.1% del total de las especies encontradas corresponde a especies endémicas, lo que concuerda con el 28% de endemismos encontrado por Rzedowski para las zonas áridas de México (Zavala, 1980). Oliveros (2000), retomando el sistema de clasificación de Valiente-Banuet *et al.* (2000), reporta cinco asociaciones vegetales para la región de las terrazas dentro de la subcuenca de Zapotitlán: Tetechera de *Neobuxbaumia tetetzo*, que se establece en las numerosas colinas que existen dentro del valle; Cardonal de *Cephalocereus columna-trajani*, Candelillar de *Euphorbia antisyphilitica*, Selva Baja Perennifolia con espinas laterales (Mezquital) con predominancia de *Prosopis laevigata* y Matorral espinoso con espinas laterales con dominancia de *Cercidium praecox*. En su trabajo sobre la vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Valiente-Banuet *et al.* (2000), presenta dos transectos dentro del Valle de Zapotitlán; el primero (transecto Zapotitlán-Cerro Viejo) "comprende un gradiente altitudinal de 1100 m, abarcando un total de ocho variantes de vegetación, entre las que dominan los bosques de cactáceas columnares, hasta el Mexical hacia la cota de los 1800 msnm". El segundo (transecto Zapotitlán – Cima del Cerro Cutá), "abarca una diferencia de 400 m de altitud y representa los cambios de vegetación que es posible encontrar en la cuenca de Zapotitlán, partiendo de Mezquital sobre depósitos aluviales profundos en las partes más bajas, Bosques de cactáceas columnares y, finalmente, Selvas Bajas Caducifolias en las partes más altas. Asimismo, en cerros de cima plana de alrededor de 1500 msnm se encuentran matorrales espinosos con espinas laterales en los que es notoria la dominancia de arbustos espinosos caducifolios y una drástica disminución de la dominancia de cactáceas columnares que

ocupan zonas adyacentes" (Valiente-Banuet *et al.*, 2000). Otros elementos florísticos importantes son: *Fouquieria formosa* (ocotillo), *Beaucarnea gracilis* (sotolín) (Osorio, 1996).

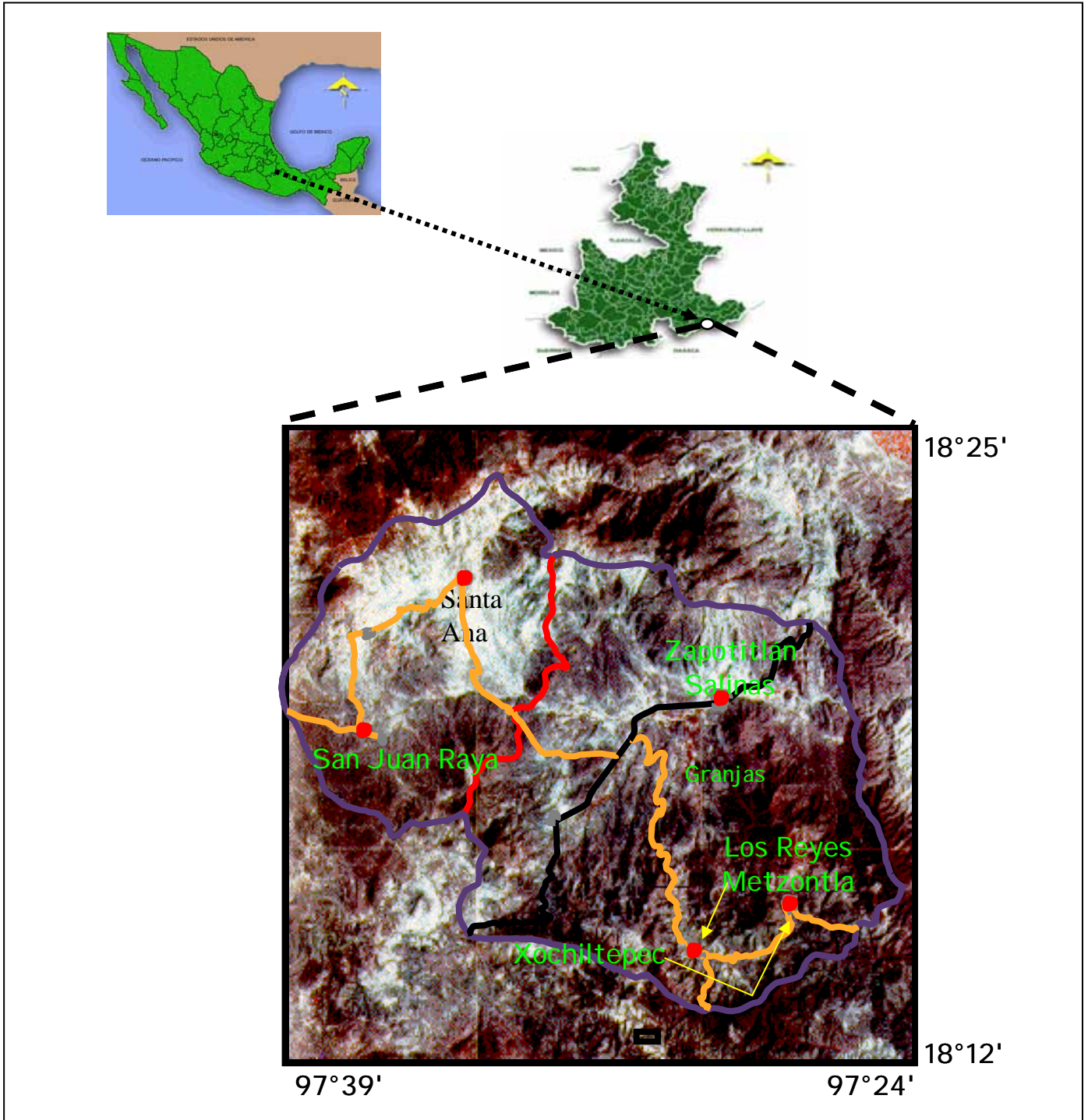


Figura 1. Delimitación del área de estudio

7. Materiales y Métodos

Para lograr los objetivos planteados, se siguió la presente metodología en 4 etapas:

Etapa 1. Reconocimiento y delimitación de las unidades de paisaje

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica, cartográfica y aerofotográfica para hacer el reconocimiento general de la zona, así como para delimitar las unidades de paisaje como unidades de estudio. Se tomó como base el estudio geocológico de los paisajes fundamentado en la comprensión de la organización paisajística, que incluye la clasificación y taxonomía de las estructuras paisajísticas, así como el conocimiento de los factores que las forman y transforman. Para el caso del presente trabajo el enfoque empleado fue el estructural que emplea el método cartográfico, de clasificación y tipología de los paisajes (Mateo, 2002).

Los materiales fotográficos empleados fueron ortofotos digitales rectificadas con auxilio de puntos de control geodésico y Modelo Digital de Elevación escala 1:20,000 del Valle de Zapotitlán tomadas en 1995 (INEGI,1999). La cartografía temática básica utilizada es la generada por López *et al.* (2003), Neri (2000) y Muñoz *et al.* (2001); y complementada con la de INEGI.

El procedimiento mediante el cuál se generó el mapa de paisajes está basado en la metodología que propone Mateo (2002), quien menciona que *"el contenido del mapa de paisajes, se pasa al banco de datos, mediante clasificadores especiales, que de una forma determinada permite codificar las leyendas del mencionado mapa"*. La codificación de la leyenda del mapa de paisajes, se lleva a cabo, generalmente, de acuerdo a los siguientes 4 grupos de criterios que reflejan al mismo tiempo, las características cualitativas y cuantitativas de los paisajes:

- 1) la geoestructura morfolitogénica (la base litogénica y el relieve)
- 2) la geoestructura hidroclimatogénica (las condiciones hidroclimáticas)
- 3) la geoestructura biopedogénica (los suelos y los biocomponentes)
- 4) la jerarquía y la taxonomía

Para obtener cada una de las geoestructuras se realizó una sobreposición de mapas temáticos básicos a escala 1:50,000 en el programa ArcView versión 3.2 (ESRI, 1992). La secuencia fue la siguiente: sobreposición de los mapas de disección vertical¹, generado a partir del MDE (INEGI, 2003a y b) y el de litología (López *et al.*, 2003); posteriormente se sobrepuso el de tipos climáticos, el de uso del suelo y tipos de vegetación (modificado de Neri, 2000) y finalmente el edafológico (Muñoz *et al.*, 2001). La leyenda se fue construyendo conforme se iban realizando los cruces de mapas con la respectiva generalización conceptual y espacial, respetando un mínimo cartografiable de 4x4 mm. Esta leyenda contiene la caracterización geográfica de los paisajes.

Posteriormente, se sobrepusieron los puntos de verificación de campo, utilizando como información básica los levantamientos fisiográficos y edafológicos que se han realizado para la zona (Barrera, 2000; García, 2001; Rivas, 2003; Santillán, 2003), cuyo método se basa en la fotointerpretación y se apoya en el principio del reconocimiento de unidades morfoedáficas, en donde cada una se representa con dos o tres puntos de muestreo (Muñoz *et al.*, 2001).

También se seleccionaron los indicadores de salud/calidad de suelo y las variables climáticas y topográficas que se utilizaron para la evaluación de la degradación de acuerdo con lo que proponen Arshad y Martin (2000), Nortcliff (2002), Doran *et al.* (1996), Doran (2002) y Bouma (2002).

Etapas 2. Levantamiento de campo

Se utilizó con una base de datos del medio físico que consiste en información generada durante 4 años. Contiene 115 registros o puntos de muestreo con datos de ubicación geográfica, litología, geomorfología, parámetros edáficos físicos y químicos, especies dominantes fisonómicas y uso del suelo (López *et al.*, 2003; Muñoz *et al.*, 2001; Muñoz *et al.*, 2002; Barrera, 2000; García, 2001; Rivas, 2003;

¹ Grado de profundización alcanzado por las corrientes de agua superficiales en su acción erosiva sobre la superficie terrestre. Es un indicador del trabajo erosivo realizado por el escurrimiento concentrado de las aguas superficiales (Seco, 2003). También se le denomina profundidad de disección.

Santillán, 2003). Además se incorporaron datos de conductividad hidráulica calculados a partir del % de arenas, % arcillas y % de materia orgánica mediante el programa Soil Water Characteristics v. 6.1.5 (Saxton, 2001). Es por ello que se decidió retomar esta información para realizar los análisis que permitieron conocer la interacción entre variables topográficas, climáticas y edáficas.

Etapas 3. Trabajo de laboratorio de SIG

Durante el desarrollo del proyecto, se elaboró una base de datos topográficos, climáticos y edáficos. Cada punto de muestreo contiene información de las tres variables y está asociado a la unidad de paisaje correspondiente.

De las variables **topográficas** se tienen pendiente y exposición, generadas a partir del Modelo Digital de Elevación 1:50,000 (INEGI, 2003a y b). Se extrajeron los datos de cada uno de estos atributos del terreno para cada punto de muestreo.

Con relación al **clima**, se hizo la caracterización climática mediante el análisis de los datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas. Con estos datos se generaron por interpolación archivos digitales raster o superficies climáticas de valores promedios mensuales de precipitación y temperatura máxima y mínima. El método de interpolación utilizado fue el del paquete ANUSPLIN (Hutchinson 1991, 1995^a, 1995^b, 1997; Hutchinson y Gessler 1994), conocido como *thin plate smoothing spline*.

Posteriormente con los programas ESOCLIM y BIOCLIM (Houlder et al., 2000), se estimaron y produjeron superficies de promedios mensuales de temperatura máxima y mínima, de precipitación. De la combinación de éstos, se produjeron adicionalmente las coberturas raster para los 19 parámetros climáticos con significado biológico (Cuadro 3). Con esta información se realizó la caracterización climática de la zona.

Se hizo la representación cartográfica en el programa ArcView versión 3.2 (ESRI, 1992) y se extrajeron los datos de cada una de las variables y parámetros antes mencionados

para cada punto de muestreo. Dicha información se incluyó en la base de datos del proyecto.

Respecto a la variable **suelo**, se consideraron 18 parámetros físicos y químicos de cada punto de verificación, mismos que ya están en la base de datos del proyecto.

Estos son los tres grupos de datos con los que se analizó la interacción de cada uno de sus respectivos parámetros: el grupo de datos edáficos, el grupo de datos climáticos y el grupo de datos topográficos, que son componentes elementales de los paisajes de Zapotitlán.

Etapas 4. Análisis y Modelaje

4.1. Análisis Estadístico

Con todos los datos se realizó un análisis discriminante y uno de correlación canónica, utilizando el programa Statistica v. 5.1. El primero con la finalidad de discriminar entre los diferentes paisajes, así como conocer las variables que contribuyen más en la diferenciación de los mismos y finalmente conocer la proporción de sitios de muestreo que pertenecen a cada unidad en base a las variables analizadas.

El análisis de correlación canónica se utilizó para conocer de qué manera se correlacionan las propiedades edáficas con las variables climáticas y topográficas y saber específicamente cuáles de ellas son las que tienen mayor correlación.

Para ello se reajustó la base de datos del proyecto con 18 propiedades edáficas, 5 variables climáticas y la pendiente. El Cuadro 1 muestra todas las variables empleadas en el análisis.

Cuadro 1. Variables empleadas en el análisis estadístico. Las abreviaciones entre paréntesis al final de cada variable refieren, al nombre de la columna en la base de datos y de las tablas resultantes en los análisis estadísticos.

GRUPO DE DATOS	VARIABLES
Climáticos	Precipitación anual (PA) Precipitación de los tres meses mas húmedos (PCMH) Precipitación del Período (semana) mas húmedo (PPMH) Temperatura Promedio Anual (TPA) Precipitación Promedio del mes de Junio-mes mas lluvioso (PREC6)
Topográficos	Pendiente (Pend)
Edáficos	Profundidad total en cm (PROFTOT) Profundidad del horizonte superior en cm (PROF_Hsup) % arena ⁽¹⁾ % limo ⁽¹⁾ % arcilla ⁽¹⁾ Densidad aparente en g/cm ³ (BD) ⁽¹⁾⁽²⁾ Densidad real en g/cc ⁽¹⁾ %Porosidad ⁽¹⁾ Porcentaje del Punto de marchitez permantente (WP) ⁽²⁾ Porcentaje Capacidad de Campo (FC) ⁽²⁾ Porcentaje de Saturación de Humedad (Sat) ⁽²⁾ Agua disponible en cm/cm (AW) ⁽²⁾ Conductividad Hidráulica en cm/hr (SatCond) ⁽²⁾ pH Porcentaje de materia orgánica (MO) Capacidad de Intercambio Catiónico en cmol(+) ¹ kg ⁻¹ (CIC) Contenido de potasio en cmol(+) ¹ kg ⁻¹ (K) Porcentaje de carbonatos (CO3)

⁽¹⁾ Propiedades de partícula

⁽²⁾ Propiedades hidráulicas del suelo calculadas a partir del contenido de arena, arcilla y materia orgánica, (Saxton, 2001).

4.2. Cálculo de la Erosión Potencial Laminar

La **erosión** es uno de los procesos más importantes involucrados en la degradación del suelo; el 32.36% de la zona está afectado por erosión hídrica y eólica, con grados de medianos a severos de acuerdo con la metodología GLASOD (López *et al.*, 2003). Por ello y para complementar los modelos de distribución de las variables analizadas, se realizó la estimación de la pérdida potencial de suelo (ton/ha/año). Para este fin se calcularon los **índices de erosión potencial laminar hídrica y eólica**, de acuerdo con el criterio de la FAO (1980) modificado por SEDESOL-INE (1993), a través de operaciones algebraicas con el módulo "Cálculo de Mapas" del programa del ArcView versión 3.2 (ESRI, 1992). Con los datos climáticos generados en este proyecto, específicamente con la cobertura de precipitación anual, se calcularon los índices de agresividad de lluvia (IALLU) y vientos (IAVIE). Con el mapa edafológico (Muñoz *et al.*, 2001) se estimaron los

índices de erodabilidad² (CAERO) y textura (CATEX) asignando una calificación a cada unidad. Con la carta de uso del suelo y tipos de vegetación (Neri, 2000) se midió el efecto de la cobertura vegetal, asignando un valor de uso (CAUSO). Con el MDE (INEGI, 2003a y b) se generó el mapa de clases de pendiente para medir el efecto del relieve, asignando una calificación de topografía (CATOP). Finalmente, se generaron los mapas de índice de erosión potencial laminar hídrica (IEPLH) y eólica (IEPLE).

Estos cálculos, así como la ponderación de los datos para la asignación de calificaciones se realizaron de la siguiente manera:

- 1) **Definición del área como zona de influencia de erosión hídrica o eólica.** Esto se realizó mediante el cálculo del PECRE (período de crecimiento o número de días al año con disponibilidad de agua y temperatura favorable para el desarrollo de un cultivo) mediante la siguiente fórmula:

$$\text{PECRE} = 0.2408 (\text{precipitación}) - 0.0000372 (\text{precipitación})^2 - 33.1019$$

El cálculo se hizo considerando la cobertura raster de precipitación anual con resolución de 50x50m, generada para conformar el grupo de datos climáticos de este trabajo, a la que se le aplicó la fórmula mencionada para producir la cobertura PECRE. Con el PECRE obtenido para cada celda, se calculó el índice de agresividad de la lluvia (IALLU) y el índice de agresividad del viento (IAVIE), mediante los siguientes algoritmos:

$$\text{IALLU} = 1.1244 (\text{PECRE}) - 14.7875$$

$$\text{IAVIE} = 160.8252 - 0.7660 (\text{PECRE})$$

Se obtuvieron los mapas respectivos.

- 2) El criterio de calificación del área con alta probabilidad de presentar erosión hídrica o eólica fue la siguiente: si el IALLU es mayor de 50, se considera zona de influencia para el estudio de la erosión potencial hídrica; si el IAVIE es mayor de 20, se considera como zona de influencia para el estudio de la erosión potencial eólica. Con esta información, se pudo definir si la zona presentaba alta probabilidad de ser afectada por los dos tipos de erosión.

² Susceptibilidad del suelo a ser erosionado por los agentes erosivos (Figuerola et al., 1991).

- 3) **Evaluación de la erosión potencial laminar hídrica (EPLH).** Una vez definida el área como zona de erosión hídrica, se procedió a la obtención de distintos factores que, junto con el IALLU, fueron multiplicados para determinar las toneladas de suelo por hectárea por año que potencialmente se perderían en la zona por efecto de la erosión hídrica.

Para ello, se consultó la información sobre las unidades de suelo, fases y clases texturales.

- 5) Cada unidad de suelo presenta un grado de **erodabilidad** o susceptibilidad a erosionarse, en función de sus propiedades texturales. En el caso de asociaciones cartográficas de suelo, se realizó un promedio ponderado por el porcentaje de ocurrencia de cada unidad edáfica. La calificación que se asignó fue la siguiente:

UNIDAD DE SUELO (Abreviaturas convencionales de las unidades de suelo FAO/UNESCO, 1994)	CAERO (Calificación de erodabilidad)
RGe (Regosol éútrico)	1.0
RGc (Regosol calcárico)	1.0
PHc (Feozem calcárico)	0.5
LPk (Leptosol réndzico)	0.5
LPq (Leptosol lítico)	2.0
FLc (Fluvisol calcárico)	0.5

- 6) Se obtuvo la calificación de textura (**CATEX**) para cada unidad de suelo. En el caso de las asociaciones, se realizó un promedio ponderado por el porcentaje de ocurrencia de cada unidad. Los valores asignados van de acuerdo con el cuadro siguiente:

UNIDAD DE SUELO (Abreviaturas convencionales de las unidades de suelo FAO/UNESCO, 1994)	CATEX (Calificación de textura)
RGe (Regosol éútrico)	0.3
RGc (Regosol calcárico)	0.3
PHc (Feozem calcárico)	0.3
LPk (Leptosol réndzico)	0.2
LPq (Leptosol lítico)	0.2
FLc (Fluvisol calcárico)	0.3

- 7) Se obtuvo la calificación de topografía (**CATOP**) por medio del cálculo de la pendiente. Se asignó la calificación del factor topográfico de acuerdo con el cuadro siguiente:

CATOP (Calificación de topografía)	Intervalo de pendiente (%)	Clase de pendiente
0.35	0-8%	a
3.50	8-30%	b
11.00	>30%	c

- 8) Se obtuvo la calificación por uso del suelo (**CAUSO**) En el caso de las asociaciones cartográficas, se realizó un promedio ponderado por el porcentaje de ocurrencia de cada tipo de vegetación. Los valores asignados están de acuerdo con el cuadro siguiente:

Tipo de vegetación/uso del suelo	CAUSO (Calificación de uso del suelo)
Agrícola	0.80
Selva Baja	0.10
Matorral	0.15
Pastizal inducido	0.12

- 9) Finalmente, se obtuvo el mapa de **índice de erosión potencial laminar hídrica (IEPLH)** en toneladas por hectárea por año mediante la multiplicación de los mapas con los valores de IALLU, CAERO, CATEX, CATOP y CAUSO. Los valores de este mapa obedecen a los criterios de FAO (1980) modificado por SEDESOL-INE (1993) de acuerdo con el cuadro siguiente:

EROSION LAMINAR HIDRICA	
Ligera	Menor de 10 ton/ha/año
Moderada	De 10 a 50 ton/ha/año
Alta	De 50 a 200 ton/ha/año
Muy Alta	Mayor de 200 ton/ha/año

Dado que el IAVIE mostró que la zona podría ser afectada también por erosión eólica, se procedió al cálculo del índice de erosión laminar eólica de la siguiente manera:

- 10) **Evaluación de la erosión potencial laminar eólica (EPLE).** Se obtuvieron los valores que fueron multiplicados para conocer la cantidad de suelo perdido por este tipo de erosión y su correspondiente mapa.
- 11) Se determinó que todas las unidades de suelo de la zona son suelos calcáreos.
- 12) Se obtuvo la calificación de textura (**CATEX**) para cada unidad de suelo. En el caso de las asociaciones cartográficas, se realizó un promedio ponderado por el porcentaje de ocurrencia de cada unidad. Los valores asignados están de acuerdo con el cuadro siguiente:

CATEX PARA SUELOS CALCAREOS	TEXTURA
3.5	1 (gruesa)
1.75	2 (media)
1.85	3 (fina)

13) Se obtuvo la calificación por uso del suelo (**CAUSO**) En el caso de las asociaciones, se realizó un promedio ponderado por el porcentaje de ocurrencia de cada tipo de vegetación. Los valores asignados van de acuerdo con el cuadro siguiente:

Tipo de vegetación/ uso del suelo	CAUSO (Calificación de uso del suelo)
Agrícola	0.70
Matorral, Selva Baja	0.15
Pastizal inducido	0.30

14) Se multiplicaron los mapas de valores obtenidos de IAVIE, CATEX y CAUSO para obtener el mapa de **índice de erosión laminar eólica (IEPLE)** en toneladas por hectárea por año, el cual se clasificó de acuerdo con el cuadro siguiente:

CLASE DE EROSION	VALOR DE LA EROSIÓN EÓLICA
Sin Erosión	Menor de 12 ton/ha/año
Ligera	De 12 a 50 ton/ha/año
Moderada	De 50 a 100 ton/ha/año
Alta	De 100 a 200 ton/ha/año
Muy Alta	Mayor de 200 ton/ha/año

A fin de lograr los objetivos planteados en el presente trabajo, los procesos de degradación física, química y biológica caracterizados por López *et al.* (2003) y Hernández (2005), se consideraron como parte complementaria de la discusión del trabajo a partir de los resultados que se obtuvieron con la evaluación de la erosión potencial laminar hídrica y eólica.

8. Resultados

8.1. Paisajes

Para abordar el problema de la degradación del suelo desde el punto de vista paisajístico, es necesario realizar una evaluación de la interacción entre los elementos físicos, biológicos, climáticos y humanos (Del Valle *et al.*, 1997). En el caso del presente trabajo se analizó el estado de los elementos físico-geográficos, principalmente relieve, clima y suelo utilizando como base el mapa de unidades de paisaje.

Se obtuvieron 13 unidades de paisaje en el nivel jerárquico de localidad (Priego-Santander, 2004) que se diferenciaron principalmente por el criterio topográfico y litológico y que contienen a los elementos biótico y edáfico como atributos secundarios. Cada unidad de paisaje está diferenciada por su condición topográfica muy particular dada por la disección del relieve, asociada al tipo litológico. Así podemos encontrar desde las zonas de montaña fuertemente disecadas (unidades de paisaje 1 a 6), hasta las llanuras colinosas moderadamente disecadas (unidad de paisaje 13). La profundidad de disección depende, principalmente, de la dureza de las rocas, y de su resistencia al modelaje por el paso del agua. Así, tenemos que las areniscas son las menos resistentes y las calizas son elementos más duros que las lutitas; mientras que la dureza de los conglomerados va a depender del material cementante del que estén formados.

La pendiente (grado de inclinación) del terreno también es importante en la diferenciación de las unidades de paisaje, ya que de ésta depende la velocidad e intensidad con que pueden actuar los diferentes elementos responsables del modelado de las formas. El componente litológico comprende rocas ígneas (principalmente basaltos), que solamente cubren el 2.2% de superficie y rocas sedimentarias, que son las más abundantes en la región; entre las que encontramos a las calizas (cz), lutitas (lu), conglomerados (cg) y areniscas (ar) como elementos únicos o intercalados. En la parte Sur de la subcuenca, hacia Metzontla y Xochiltepec, también se encuentran materiales metamórficos,

concretamente cuarcitas en asociación con areniscas como dominantes (ar-C), cubriendo un 8.6% de la zona. Con esto se complementa la geoestructura morfolitogénica. En cuanto a la geoestructura climatogénica está representada por un sólo tipo climático, el seco semicálido con lluvias de verano (BSohw), por lo que se tomó como una constante para toda la subcuenca y no se hizo el cruzamiento de este mapa con el resto. Finalmente, cada uno de los paisajes está conformado por diferentes coberturas vegetales, soportadas por diferentes unidades de suelo, con lo que se obtiene la geoestructura biopedogénica.

De acuerdo con los criterios de INEGI (1990), las coberturas vegetales identificadas son: Matorral, con los subtipos Espinoso (ME), de *Prosopis laevigata*; Crassicaule (MC), formado por cactáceas columnares, principalmente *Neobuxbaumia tetetzo* y *Cephalocereus columna-trajani* y Subinerme (MB), compuesto por plantas espinosas o inermes, como *Celtis pallida*. También se encuentra al Mexical (Ch), cuya especie dominante es *Quercus sp.*; y al Izotal (Iz) de *Yucca periculosa* y *Beaucarnea gracilis*. Además se tiene Selva Baja Caducifolia (SB) y Agricultura de Temporal de especies anuales (TA) (Neri, 2000).

Las unidades de suelo encontradas en las diferentes unidades de paisaje son: Leptosoles (LP), suelos muy delgados y pedregosos; Regosoles (RG), suelos poco evolucionados, inestables e indiferenciados; Feozem (PH), suelos más desarrollados y diferenciados, ricos en materia orgánica; y Fluvisoles (FL), suelos muy jóvenes, con propiedades flúvicas, formados a partir de materiales minerales y orgánicos que fueron producto del transporte y depositación, en este caso fluvial (FAO, 1990 en Muñoz, 1999). Hacia la parte Norte de la subcuenca, la heterogeneidad topográfica y de relieve determinan que los Regosoles y Leptosoles sean las unidades dominantes, ubicándose principalmente en geoformas de cerros, lomas, laderas con pendientes fuertes y escarpadas limitando el desarrollo de estos suelos. La mayoría de los Fluvisoles se localizan al centro de la subcuenca y al Oeste del poblado de Zapotitlán, en las orillas de los escurrimientos primarios con relieves casi planos que sirven como receptáculos de materiales frescos a intervalos regulares, presentando marcadas diferencias en sus propiedades físicas dentro del perfil (Muñoz *et al.*, 2001).

La Figura 2 presenta el mapa de las unidades de paisaje y los puntos de verificación, así como la información asociada a la base de datos ambiental. La información de esta base de datos es: ubicación geográfica, altitud, tipo de suelo, litología, tipo de vegetación, especies dominantes, uso del suelo, sistema fisiográfico y geoforma.

Unidades de Paisaje (nivel localidad)

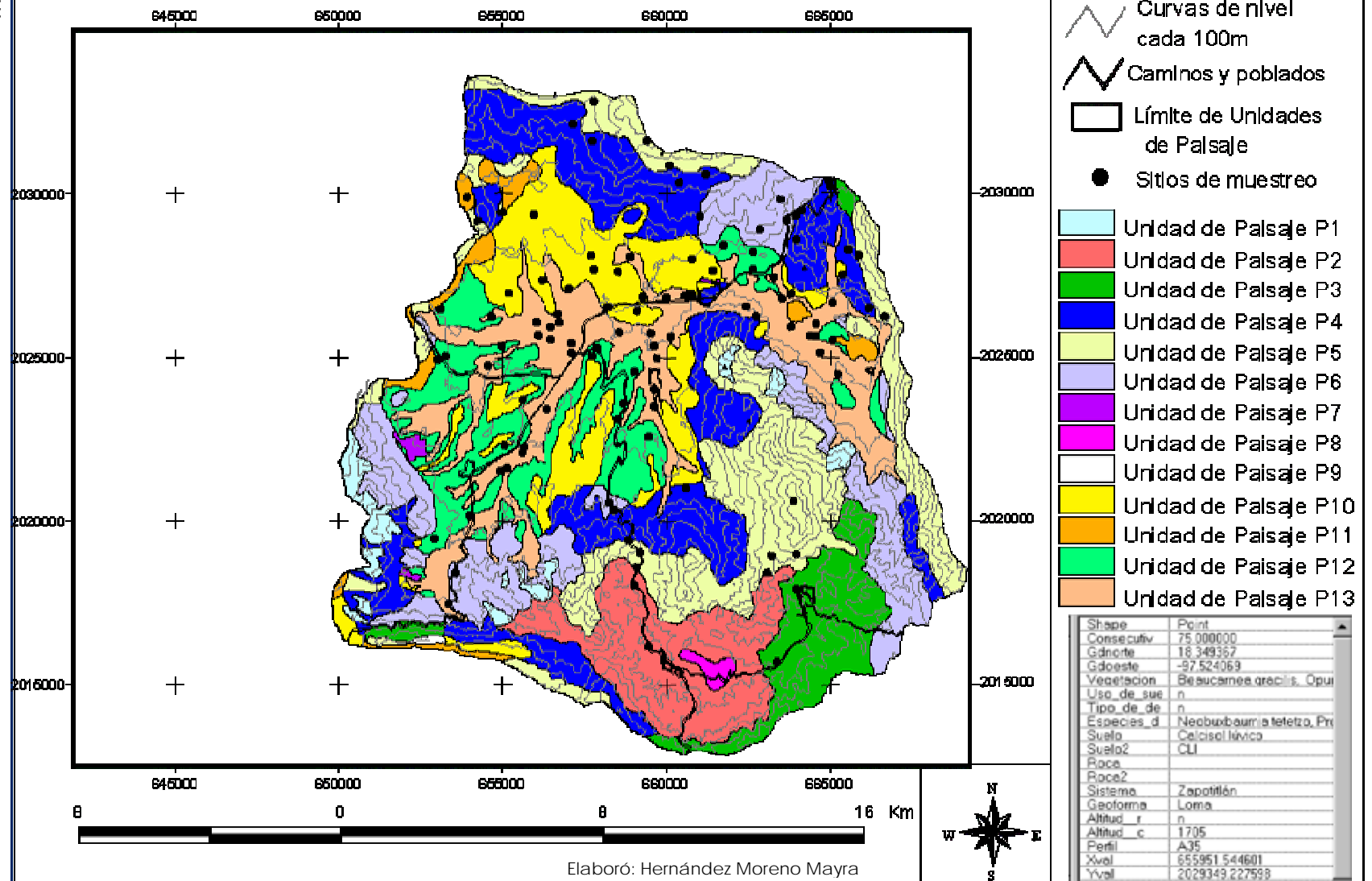


Figura 2. Delimitación de las unidades de paisaje.

Cuadro 2. Leyenda del mapa de unidades de paisaje. La columna de la derecha marca los porcentajes de superficie que ocupan en la cuenca.

No.	Unidad de Paisaje (Nivel jerárquico de Localidad)	%
Montañas:		
P1	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por basaltos con matorrales sobre Leptosoles	2.0
P2	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por areniscas cuarcíticas con matorrales, selva y cultivos sobre Regosoles	8.4
P3	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por areniscas con conglomerados y areniscas con lutitas con matorrales, selva y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	6.5
P4	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con matorrales, selva y cultivos sobre Regosoles, Feozem y Leptosoles	17.4
P5	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por calizas con matorrales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Feozem y Leptosoles	16.3
P6	Ligera a medianamente disecadas (100-500m), formadas por lutitas con matorrales e izotal sobre Regosoles y Leptosoles	11.5
Lomeríos y colinas:		
P7	Mediana a fuertemente disecadas (60-100 m), formadas por basaltos con matorral sobre Leptosoles	0.2
P8	Fuertemente disecadas (80-100 m), formadas por areniscas cuarcíticas con matorrales y cultivos sobre Regosoles	0.4
P9	Fuertemente disecadas (80-100 m), formadas por lutitas con areniscas con matorrales sobre Leptosoles	0.1
P10	Mediana a fuertemente disecadas (60-100 m), formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con matorrales e izotal sobre Leptosoles y Regosoles	11.2
P11	Mediana a fuertemente disecadas (60-100 m), formadas por calizas con matorrales sobre Leptosoles y Regosoles	2.0
P12	Ligera a fuertemente disecadas (40-100 m), formadas por lutitas con matorrales y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	10.2
Llanuras colinosas:		
P13	Mediana a fuertemente disecadas (20-40 m), formadas por depósitos aluviales con matorrales y cultivos sobre Regosoles, Fluvisoles y Leptosoles	13.8

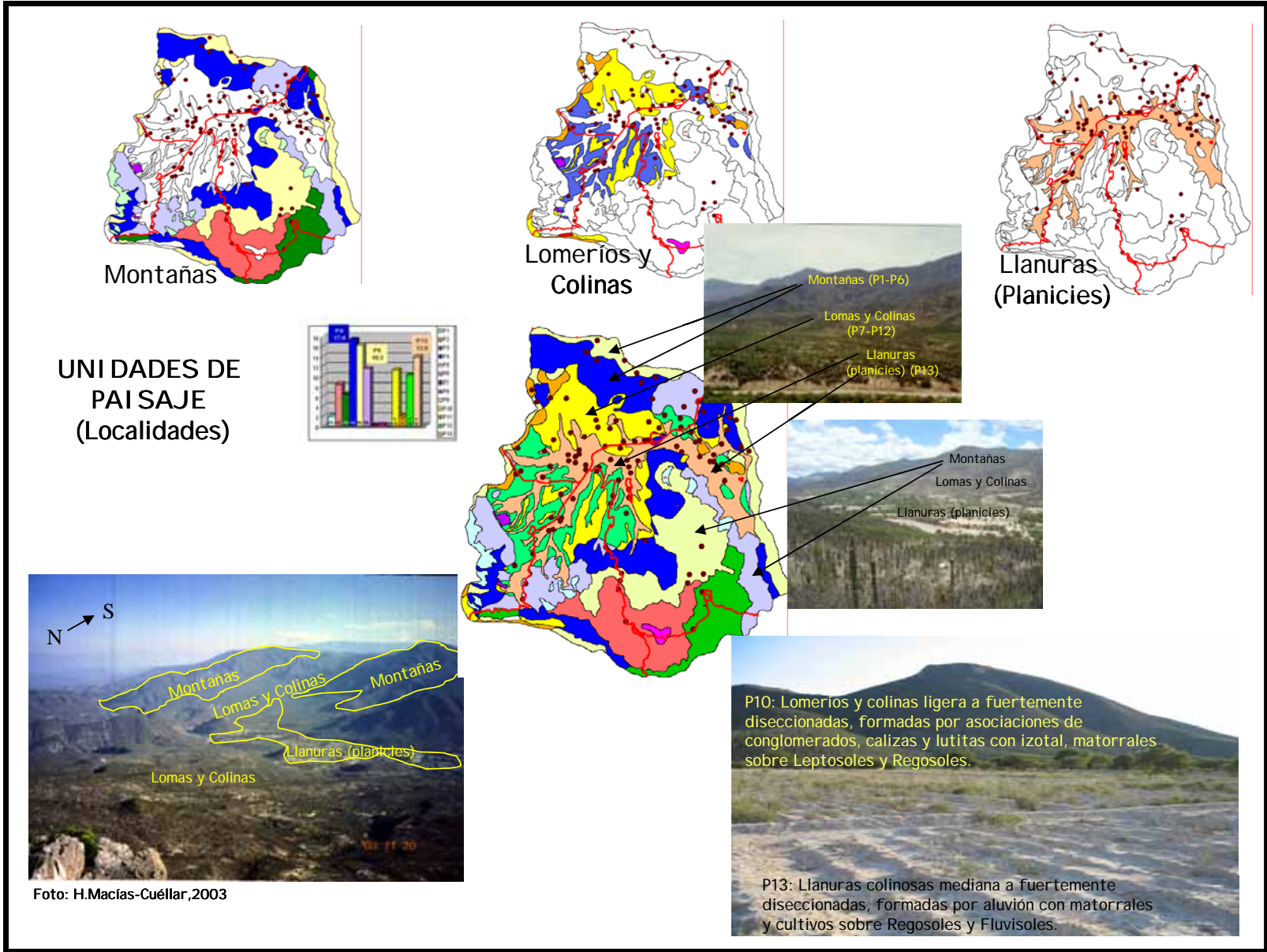


Figura 3. Cobertura y fotografías panorámicas de las unidades de paisaje.

De las 13 unidades, las 5 primeras corresponden a paisajes de montaña, que se caracterizan por presentar relieves pronunciados, y pendientes abruptas desde medianamente inclinadas (15° - 20°) hasta muy fuertemente inclinadas (30 - 45°), lo cual se aprecia claramente con el dibujo de las curvas de nivel. De estas las P4, P5 y P6 resultaron las más extensas con 17.4%, 16.3% y 11.5%, de la superficie total de la subcuenca, respectivamente.

La Figura 4 muestra los porcentajes de la superficie de la subcuenca que ocupan cada una de las unidades de paisaje.

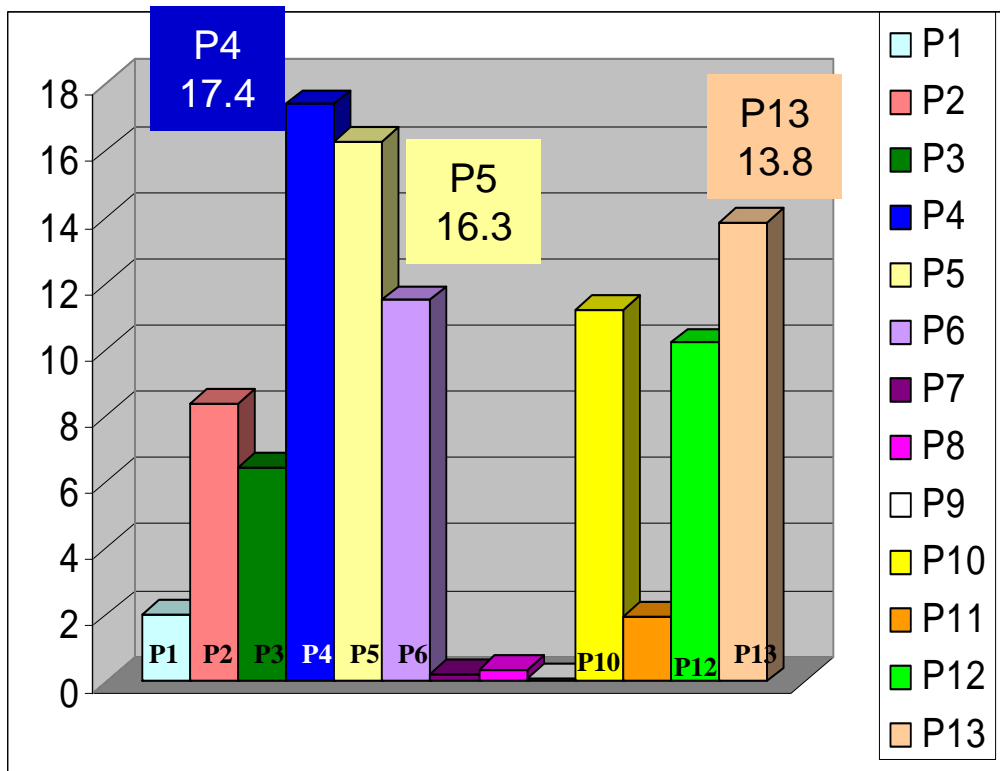


Figura 4. Superficie del valle ocupado por cada unidad de paisaje (%).

En los Cuadros 3A - 3G se presentan las características y atributos de cada una de las unidades de paisaje, así como la zona geográfica dentro del Valle, en donde se encuentran distribuidas y la clase de erosión potencial hídrica y eólica que pueden presentar. Para la interpretación de las claves, véase la leyenda (Cuadro 3G).

Cuadro 3A. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Norte del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMOFOLÓGICA Y	NORTE			USO SUELO TIPO VEG.	CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUENCA	SITIO
				TIPO ROCA	TIPO SUELO	TIPO SUELO						
P1	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerados y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	11	Ladera Convexa con Diseción Fuerte Barranca	ar-cg	E	SB	Pu, Wd3, Sn	Alta	Ligera a Moderada	Mahuatpec	Las Ventas, Entradas Cuernavaca, AL N de Zapotitlán	
P4	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Leptosoles	11	Ladera cóncava con diseción ligera	cz-cg, lz-cg, cz-lz	RfC	MC, ZU	Wd3, Wd3, Wd3	Alta	Ligera	Venes	AL N de Zapotitlán	
P5	Montañas ligeras a moderadamente disecionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, total y selva sobre Regosoles, Foztem y Leptosoles	11	Escarpe tectónico Ladera convexa con diseción ligera	cz	PHc	MC, lz, Ch	Wd3, Sn, Wd3	Moderada a Alta	Ligera	Calera, Parícutin, Mahuatpec	C. Terribilita, C. Papantla	
P6	Montañas ligeras a moderadamente disecionadas, formadas por lutitas con material e izotal, sobre Regosoles y Leptosoles	11	Ladera Convexa con diseción fuerte	lu	RfC	MC	Sn, Sn, P14	Alta	Ligera	El Parícutin, Cutzac	Ladera de C. Lacuimeria, C. Viscarado	
P7	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por basaltos con material sobre Leptosoles	9	Elevación aislada	B	LPk	MC-ME	Sn	Moderada	Moderada	El Parícutin	Conito de la Iglesia, al N de Zapo	
P8	Lomeríos y colinas fuertemente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P9	Lomeríos y colinas fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P10	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales e izotal sobre Leptosoles y Regosoles	9	Planicie acumulativa con diseción ligera	zg	LPq-RfC-PHc	MC	Sn, Sp, Wd3, Cp	Moderada a Alta	Ligera	Agua El Temisote, La Calera, El Parícutin	Al E del C. Tototpec	
P11	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por calizas con materiales sobre Leptosoles y Regosoles	10	Ladera convexa con diseción ligera / Planicie rodeada con remoción ligera	cz	RfC	MC, MB, ZU, TA	Sn, Wd3	Alta	En TA (Muy Alta)	Cutzac, Mahuatpec	Barranca Tangaxa, La Calera, Zona N de Zapotitlán	
P12	Lomeríos y colinas ligeras a fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P13	Llanuras colinosas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluvisoles y Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro 3B. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Este del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMOFOLÓGICA Y	ESTE			USO SUELO TIPO VEG.	CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUENCA	SITIO
				TIPO ROCA	TIPO SUELO	TIPO SUELO						
P1	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerados y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4	Montañas ligeras a medianamente disecionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Leptosoles	12	Ladera cóncava con diseción fuerte	cg	RGe	MB	Ed / Et3	Alta a Muy Alta	Ligera	El Castillo	Al E Barranca, El Castillo	
P5	Montañas ligeras a moderadamente disecionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Foztem y Leptosoles	12	Ladera cóncava con diseción fuerte	cz	LPk	MC	Sn	Moderada a Alta	Moderada	Mahuatpec, El Castillo	Sierra Mahuatpec	
P6	Montañas ligeras a moderadamente disecionadas, formadas por lutitas con material e izotal, sobre Regosoles y Leptosoles	11 y 12	Escarpe erosivo Ladera cóncava con diseción fuerte	lu	LPk	MB-MC	Sn	Moderada	Moderada	Salinas	Lad E del C. Tierra Amanita	
P7	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por basaltos con material sobre Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P8	Lomeríos y colinas fuertemente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P9	Lomeríos y colinas fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Leptosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P10	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales e izotal sobre Leptosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P11	Lomeríos y colinas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por calizas con materiales sobre Leptosoles y Regosoles	9	Elevación Aislada	cz	RfC	MC	Sn	Alta	Ligera	Salinas	C. Tocorito	
P12	Lomeríos y colinas ligeras a fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	9	Elevación Aislada	cz	RfC	MC	Sn	Alta	Ligera	Salinas	C. Tondoto	
P13	Lomeríos y colinas ligeras a fuertemente disecionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles y Leptosoles	9	Ladera convexa con diseción fuerte	lu	RfC	MC, ME	Sn	Alta	Ligera	El Parícutin	Al N de Zapo y Jardín Botánico	
P13	Llanuras colinosas medianas a fuertemente disecionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluvisoles y Leptosoles	-	Planicie, ladera recta	lu	LPq, LPk	SB, MB-lz	R, Sn	Moderada	Moderada	Salinas, Castillo	Salinas San Pedro y Rinconada	

Cuadro 3C. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Centro del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMORFOLOGICA Y	CENTRO			USO SUELO TIPO VEG.	CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUCIENCA	SITIO
				TIPO ROCA	TIPO SUELO	TIPO VEG.						
P1	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Leptosoles	11 y 12	Ladera Convexa con Disección Fuerte	Basaltos	LPk	MC-MB	>Sn	Moderada a Alta	Moderada	Salinas	Cerro Grande C. Tierra Amarilla	
P2	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P3	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por areniscas con conglomerados y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P4	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Leptosoles	11 y 12	Ladera Convexa con Disección Fuerte	lu-cz	LPk, Rge LPq-RGc	MB MC, TA	>Sn >W2, A, Wd3, PC4	Moderada a Alta	Moderada Ligera	Metzontla	C. La Nopalera, Los Viveros, A/E de Las Granjas y al W de C. Grande	
P5	Montañas ligera a moderadamente diseccionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Feozem y Leptosoles	11 y 12	Ladera Convexa con Disección Fuerte	cz	LPk, Rge LPq-RGc	MB MC	>Sn, Srv <W3, Wd2	Moderada a Alta	Moderada Ligera a Moderada	Salinas Metzontla, El Castillo	Ladera de C. Grande, C. Tierra Amarilla, C. Quemado	
P6	Montañas ligera a moderadamente diseccionadas, formadas por lutitas con material izotal, sobre Regosoles y Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P7	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por basaltos con material sobre Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P8	Lomeríos y colinas fuertemente diseccionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P9	Lomeríos y colinas fuertemente diseccionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P10	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con material izotal sobre Leptosoles y Regosoles	10	Planicie inclinada con remoción	cg	LPq-RGc	ME-MC	Wd3, Cn	Moderada a Alta	Ligera	Metzontla	A/E de Granjas	
P11	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por calizas con materiales sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P12	Lomeríos y colinas ligera a fuertemente diseccionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
P13	Llanuras colinosas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluvisoles y Leptosoles.	6 7	Trazas fluvial Planicie inclinada con remoción ligera Planicie estructural	af af af	RGc, Flc Rq, Flc LPq	ME, TA, VS MC, ME, TA, VS ME	W3, Shc, Sn, W2 Shc, Srv, Wd3y4, Cp, B R	Ligera Ligera a Moderada Ligera a Moderada	Ligera y en zonas de TA es Muy Alta Ligera y en zonas de TA es Muy Alta Moderada	--	En la parte mas baja de la cuenca a los lados del cuace del rio	

Cuadro 3D. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Sur del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMORFOLOGICA Y	SUR			USO SUELO TIPO VEG.	CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUCIENCA	SITIO
				TIPO ROCA	TIPO SUELO	TIPO VEG.						
P1	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P2	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	11 y 12	--	--	ar-C	RGe	TA, SB, MB, D, ZU	Wd4, Srv, Wd3, Cn4, Shp, Wd2, Sn, W2	Alta a Muy Alta	Ligera	Sur de Metzontla	Los Reyes Metzontla
P3	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por areniscas con conglomerados y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	11 y 12	--	--	ar-cg	RGe	SB Cn4, Shp	E3	Alta a Muy Alta	Ligera	SE de Metzontla	Metzontla y Xochitlapeoc
P4	Montañas ligera a medianamente diseccionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Leptosoles	--	--	--	ar-lu	RGe	TA, ZU	--	Muy Alta	Muy Alta	Metzontla	A/E Sureste
P5	Montañas ligera a moderadamente diseccionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Feozem y Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P6	Montañas ligera a moderadamente diseccionadas, formadas por lutitas con material izotal, sobre Regosoles y Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P7	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por basaltos con material sobre Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P8	Lomeríos y colinas fuertemente diseccionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	10	--	--	ar-C	RGe	MC TA, ZU	Cn4	Alta a Muy Alta	Ligera Muy Alta	Metzontla	Los Reyes Metzontla
P9	Lomeríos y colinas fuertemente diseccionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Leptosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P10	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por asociaciones de conglomerados, calizas y lutitas con material izotal sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P11	Lomeríos y colinas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por calizas con materiales sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P12	Lomeríos y colinas ligera a fuertemente diseccionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Leptosoles y Regosoles	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
P13	Llanuras colinosas mediana a fuertemente diseccionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluvisoles y Leptosoles.	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Cuadro 3E. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Oeste del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMORFOLOGICA Y TIPO ROCA	OESTE			CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUCIENCA	SITIO
				TIPO SUELO	TIPO VEG.	USO SUELO					
P1	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Lepatosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P5	Montañas ligera a moderadamente disecionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Fozzen y Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P6	Montañas ligera a moderadamente disecionadas, formadas por lutitas con material e izotal, sobre Regosoles y Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P7	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por basaltos con material sobre Lepatosoles	10	Piedemonte denudativo Ladera convexa con dirección fuerte	B	LPq-RGc-PHc	MC	Wd3 W3	Alta	Ligera	San Martín Chuchuca	Al W de San Martín, antes de Barranca Tempequaste Al W del C. Volcancillo
P8	Llanuras y colinas fuertemente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P9	Llanuras y colinas fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P10	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado, calizas y lutitas con material e izotal sobre Lepatosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P11	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por calizas con materiales sobre Lepatosoles y Regosoles	9 10	Ladera cóncava con diseción ligera Escarpe tectónico	cz	RGc LPq-RGc-PHc	MC MC-ME	Wd3, Wt3 Sn	Alta Muy Alta	Ligera	Agua El Temolote	B. Temolote C. Tolotepec, C. Xertile
P12	Llanuras y colinas ligera a fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Lepatosoles y Regosoles	9,9 10	Planicie inclinada con remoción ligera Llanuras de denudación	lu	LPq-RGc-PHc	MC, ME, MB, TA, VS, ZU	Wd4, Sn, Shp, Wd2 Sn, Wt3, Wd2	Moderada a Alta Moderada	Ligera y en zonas de TA Ligera	San Martín, Chuchuca Coahuila, Mezitorta	Llanos San Martín hasta Colonia San Martín Barranca Chuchuca y Coahuila, B. Rosa al Sur de Granjas
P13	Llanuras colinosas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluviales y Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro 3F. Características y atributos de las unidades de paisaje que se encuentran en la porción Suroeste del Valle.

UNIDAD DE PAISAJE	LEYENDA	PROF. DISECCION	UNIDAD GEOMORFOLOGICA Y TIPO ROCA	SUROESTE			CLASE DEGRADACION	CLASE IEPLH	CLASE IEPLE	MICROCUCIENCA	SITIO
				TIPO SUELO	TIPO VEG.	USO SUELO					
P1	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por basaltos con materiales sobre Lepatosoles	11 y 12 11 y 12	Ladera convexa con diseción fuerte Ladera convexa con diseción fuerte y Lomeríos	B	LPk-LPq	MC	Sn	Alta	Moderada	San Martín	Ladera E. C. Ometepéc
P2	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado y areniscas con lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Lepatosoles y Regosoles	11 12	-	lu-ar lu-ar	LPk-LPq LPk-LPq	MC	-	Alta Alta	Moderada	Chuchuca	Al NE de Santiago Acatepec
P4	Montañas ligera a medianamente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado, calizas y lutitas con materiales, selva y cultivos sobre Regosoles y Lepatosoles	11	Ladera convexa con diseción fuerte	cg-cz	LPk-LPq	MC	Wt3	Alta	Moderada	Chuchuca	Al NE de Santiago
P5	Montañas ligera a moderadamente disecionadas, formadas por calizas con materiales, chaparral, izotal y selva sobre Regosoles, Fozzen y Lepatosoles	11	Lomas y colinas	cz	LPk-LPq	MC	Pd4	Alta	Moderada	Chuchuca	Al NE de Santiago
P6	Montañas ligera a moderadamente disecionadas, formadas por lutitas con material e izotal, sobre Regosoles y Lepatosoles	12, 11 11	Ladera convexa con diseción fuerte y Piedemonte denudativo Llanuras y Planicie	lu	LPk-LPq	MC	Sn, Wt3, Wd4 Pd4, Pc3, Sn	Moderada a Alta Alta	Moderada	San Martín Chuchuca	Ladera del C. Campanario y C. Ometepéc Ladera del C. Volcancillo
P7	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por basaltos con material sobre Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P8	Llanuras y colinas fuertemente disecionadas, formadas por areniscas cuarcíticas con materiales y cultivos sobre Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P9	Llanuras y colinas fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con areniscas con materiales sobre Lepatosoles	10	-	lu-ar	LPk-LPq	MC	Pd4	Alta	Moderada	Chuchuca	Llegando a Acatepec
P10	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por areniscas con conglomerado, calizas y lutitas con material e izotal sobre Lepatosoles y Regosoles	9	Planicie y piedemonte Elevación aislada	cg	LPk-LPq	MC	Pk, Pd4 Wd4	Alta	Ligera a Moderada	Al S de San Martín C. Mogote León	Chuchuca San Martín
P11	Llanuras y colinas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por calizas con materiales sobre Lepatosoles y Regosoles	10	-	cz	LPk-LPq	MC	Pk, Pd4	Alta	Moderada	Chuchuca	Al N de Santiago Acatepec
P12	Llanuras y colinas ligera a fuertemente disecionadas, formadas por lutitas con materiales y cultivos sobre Lepatosoles y Regosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P13	Llanuras colinosas mediana a fuertemente disecionadas, formadas por depósitos aluviales con materiales y cultivos sobre Regosoles, Fluviales y Lepatosoles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro 3G. Leyenda de las claves para clases de degradación, profundidad de disección, tipo de roca, de vegetación, de suelo e IEPL Hídrica y Eólica

CLASES DE DEGRADACION (según Glasod, modificado por López et al., 2003):	
S	Tierras estables
Sn / Snv	Tierras estables con vegetación natural
Sh	Tierras estabilizadas por intervención humana, con prácticas de conservación
Shp	Tierras estables con eliminación parcial de la vegetación natural, con introducción de cultivos perennes y anuales
Shc	Terraceo de las zonas aluviales con barreras físicas estabilizadoras, complementadas con barreras biológicas (Mezquites, Agaves u otros)
R	Rehabilitación
P	Degradación Física (Los subíndices indican un grado ascendente de afectación: 1=ligero, 2=moderado, 3=severo, 4=extremo)
Pd	Tierras inestables, propensas a derrumbes y colapsamiento
Pk ₁₋₄	Encostramiento y sellamiento de la capa superficial
Pc ₁₋₄	Compactación, causada por maquinaria pesada trabajando sobre suelos con estabilidad y estructura débil, o sobre suelos en los que existe poco humus
Pu	Pérdida bioproductiva
C	Degradación Química
Cn	Contaminación por pérdida de nutrimentos, lo que comúnmente conduce a una reducción significativa de la producción (lavado acelerado de suelos)
Cp	Contaminación por aporte de residuos sólidos municipales
W	Erosión Hídrica (Los subíndices indican un grado ascendente de afectación: 1=ligero, 2=moderado, 3=severo, 4=extremo)
Wt ₁₋₄	Pérdida del suelo superficial
Wd ₁₋₄	Deformación del terreno
E	Erosión eólica (Los subíndices indican un grado ascendente de afectación: 1=ligero, 2=moderado, 3=severo, 4=extremo)
Et ₁₋₄	Pérdida superficial, que es un desplazamiento uniforme causado por deflación
Ed ₁₋₄	Deformación del terreno, es un desplazamiento heterogéneo caracterizado por hoyos mayores, hummocks o dunas
	Suelos con limitantes severas
A	Afloramiento
BI	Tierras Malas
Mm	Movimientos en masa

USO DEL SUELO Y VEGETACION: (INEGI, 1990)	
MB	Matorral Subinerme
MC	Matorral Crassicaule
ME	Matorral Espinoso
Ch	Chaparral
Iz	Izotal
SB	Selva Baja
TA	Agricultura de Temporal
VS	Vegetación secundaria
PI	Pastizal inducido
ED	Erosión y Desmontes
S	Salinas
ZU	Zona Urbana

TIPO DE SUELO (FAO, 1994)	
FLc	Fluvisol calcárico
RGc	Regosol calcárico
RGe	Regosol éutrico
LPk	Leptosol réndzico
LPq	Leptosol lítico
PHc	Feozem calcárico

TIPO DE ROCA (INEGI, 1990a):	
1. al	= aluvión
2. ar-C	= areniscas-Cuarcitas
3. ar-cq	= areniscas-conglomerado
4. ar-lu	= areniscas-lutitas
5. cq	= conglomerado
6. cq-ar	= conglomerado-areniscas
7. cq-cz	= conglomerado-calizas
8. cq-lu	= conglomerado-lutitas
9. cz	= calizas
10. cz-cq	= calizas-conglomerado
11. cz-lu	= calizas-lutitas
12. E-Gn	= Esquistos-gneis
13. lge	= Igneas extrusivas (basalto)
14. lu	= lutitas
15. lu-ar	= lutitas-areniscas
16. lu-cq	= lutitas-conglomerado
17. lu-cz	= lutitas-calizas

PROFUNDIDAD DE DISECCION:	
LANURAS COLINOSAS	
6.	Llanuras colinosas medianamente diseccionadas (20-30m)
7.	Llanuras colinosas fuertemente diseccionadas (30-40m)
LOMERIOS Y COLINAS	
8.	Lomeríos y colinas ligeramente diseccionadas (40-60m)
9.	Lomeríos y colinas medianamente diseccionadas (60-80m)
10.	Lomeríos y colinas fuertemente diseccionadas (80-100m)
MONTAÑAS	
11.	Montañas ligeramente diseccionadas (100-250m)
12.	Montañas medianamente diseccionadas (250-500m)
13.	Montañas fuertemente diseccionadas (>500m)

Indice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (IEPLH) (ton suelo/ha/año)	
Clase	Pérdida Potencial
Ligera	Menor de 10
Moderada	De 10 a 50
Alta	De 50 a 200
Muy Alta	Mayor de 200

Indice de Erosión Potencial Laminar Eólica (IEPLE) (ton suelo/ha/año)	
Clase	Pérdida Potencial
Sin Erosión	Menor de 12
Ligera	De 12 a 50
Moderada	De 50 a 100
Alta	Mayor de 100 a 200
Muy Alta	Mayor de 200

8.2. Grupo de datos topográficos

Se emplearon variables topográficas por la relación tan estrecha con el suelo, considerando que el relieve es uno de los factores que lo forman (Jenny, 1961 citado por Birkeland, 1999). Los mapas de pendiente y exposición de laderas se presentan con la cobertura de puntos del muestreo edáfico y con la información de la variable del terreno correspondiente.

La Figura 5 presenta el mapa de clases de pendiente. Se generaron 3 clases que se requieren para el cálculo de los índices de erosión potencial laminar hídrica y eólica (FAO, 1980 modificado por SEDESOL-INE, 1993). Los intervalos son 0-8%, 8-30% y >30%.

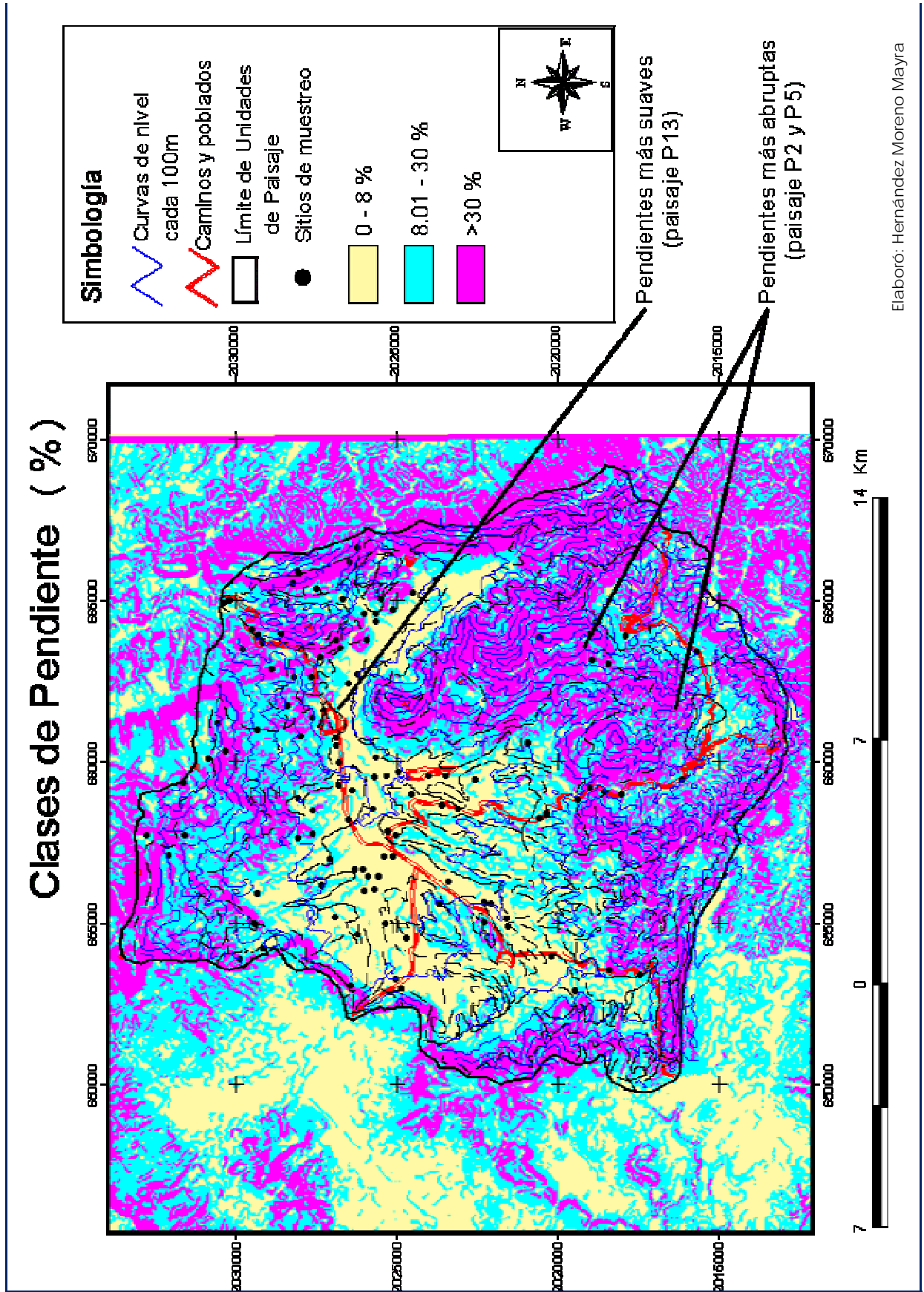


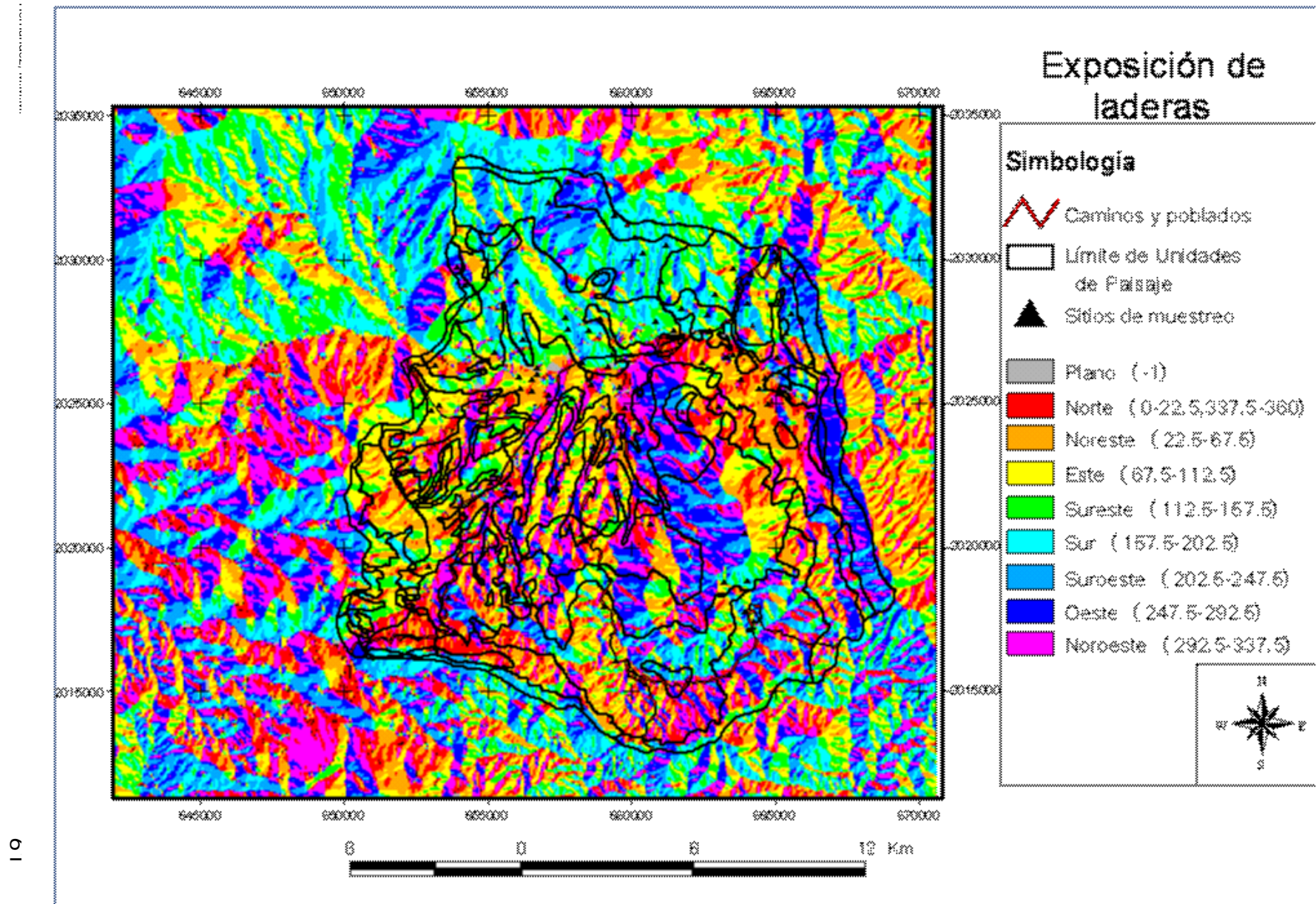
Figura 5. Mapa de clases de pendiente. Los puntos en color azul presentan el dato extraído de la variable. También se observa la delimitación de las unidades de paisaje.

Como se puede apreciar, las pendientes más abruptas (mayores de 30%), se encuentran distribuidas hacia los parteaguas de la subcuenca. Las microcuencas Metzontla y El Castillo (Neri, 2000) presentan los relieves más accidentados de la zona que coinciden con los paisajes P2 y P5, "montañas ligera a medianamente disecadas (100-500m) con areniscas cuarcíticas y calizas", respectivamente. Las pendientes más suaves (menores de 8%), se presentan en las partes más bajas, en donde se encuentran las terrazas aluviales en la unidad de paisaje P13, "llanuras colinosas mediana a fuertemente disecadas (20-40m) formadas por depósitos aluviales".

La Figura 6 presenta el mapa de orientación de laderas. Como se puede observar, hacia el Norte de la subcuenca (de la carretera y hacia el Norte del poblado Zapotitlán), se encuentran principalmente laderas con exposición Sur y Suroeste, en las unidades de paisaje P10, P4, P5 y P6, en donde se establecen comunidades de matorral crasicaule y el riesgo de presentar erosión hídrica y eólica es alto y bajo, respectivamente. Lo anterior coincide con lo que plantean López *et al.* (2003) y Hernández (2005) de acuerdo con la caracterización hecha empleando la metodología Glasod, que dicen que estas zonas presentan erosión hídrica por deformación del terreno en grado severo (Wd_3). En el área de Colonia San Martín, hacia el parteaguas Oeste de la Cuenca, en los paisajes P4, P6 y P12 se tienen lomeríos cuyas laderas presentan exposición Este y Noroeste, también con matorral crasicaule como vegetación dominante y un IEPLHídrica moderado e IEPLEólica alto en las zonas agrícolas. En este caso los procesos de degradación reportados por López *et al.* (2003) y Hernández (2005) son erosión hídrica por deformación del terreno (Wd_2) y por pérdida superficial de suelo (Wt_3) en grados de moderado a extremo. La Sierra de Miahuatepec (parteaguas Este de la Cuenca y unidad de paisaje P5), presenta laderas con exposición Oeste y Suroeste, matorral crasicaule e índice de erosión potencial moderado, pues de acuerdo con Glasod son zonas estables con vegetación natural (Sn). Al Centro, el Cerro Quemado y Cerro Tierra Amarilla presentan una parte con exposición al Este, en el P4 y otra con exposición al Oeste y Suroeste en el P5, con matorral subinermes y zonas agrícolas, erosión

potencial hídrica moderada a alta y eólica moderada. Los procesos de degradación reportados según Glasod son erosión hídrica por deformación en grado severo y áreas con degradación física por compactación del suelo en grado severo (Pc_4). Hacia la parte Sur de la Cuenca se presentan laderas con exposición Este, en la zona de Metzontla en el paisaje P2 y Noroeste en Xochiltepec (paisaje P3), con zonas agrícolas como principal cobertura del suelo e índice potencial de erosión hídrica alta a muy alta y eólica desde ligera, hasta alta. Glasod plantea: erosión hídrica por pérdida del terreno y deformación en grados severos a extremos (Wt_3 y Wd_4); erosión eólica por pérdida superficial de suelo en grado severo (Ed/Et_3) y degradación química extrema por pérdida de nutrimentos debido a un lavado acelerado de los suelos (Cn_4). Finalmente, al Suroeste de la cuenca las unidades P3, P4 y P6 presentan laderas con exposición al Norte y matorral crasicaule, en donde el potencial de presentar erosión hídrica es alto y eólica moderado. Glasod plantea: degradación física extrema por ser zonas inestables, propensas a derrumbes y colapsamiento (Pd_4), así como erosión hídrica por pérdida del suelo y deformación en grados severo a extremo (Wt_3 y Wd_4).

En términos generales el 40.5% de la cuenca presenta zonas con exposición al Este y Noreste en donde el índice de erosión potencial hídrica va de moderada a muy alta y eólica de moderada a muy alta, principalmente en zonas dedicadas a la agricultura. Los procesos de degradación que presentan de acuerdo con Glasod (López *et al.*, 2003; Hernández, 2005) son: erosión hídrica por pérdida del suelo superficial (Wt_3) y por deformación del terreno en grados severos a extremos ($Wd_{3,4}$), así como compactación extrema y pérdida severa de nutrientes por lavado (Pc_4). El 39% de la cuenca presenta zonas con exposición al Sur y Suroeste con índice de erosión potencial hídrica alta a muy alta y eólica muy alta en las zonas agrícolas. Los procesos de degradación de acuerdo con Glasod que se manifiestan son: Wt_3 , Wd_3 y Pd_4 . Finalmente el 20.5% de la cuenca, presenta zonas con exposición al Oeste y Noroeste con índice de erosión potencial hídrica alta a muy alta y eólica muy alta. Los procesos de degradación que presentan, según Glasod son: Ed/Et_3 , Wt_3 , Wd_2 , Cn_4 .



la variable. También se observa la delimitación de las unidades de paisaje

8.3. Grupo de datos climáticos

Otro de los factores formadores de suelo es el clima y por ello es que también ha sido de considerable importancia para este trabajo conocer su variación en el espacio, para saber cómo está influyendo en la variación edáfica y cuál es la relación con los procesos de degradación del suelo, específicamente los erosivos. Las coberturas de los promedios mensuales de temperatura máxima y mínima, precipitación y de los 19 parámetros climáticos con significado biológico nos muestran la variación del clima en la subcuenca. A continuación se mencionan los 19 parámetros generados (Mullen, 1998).

Cuadro 4. Parámetros bioclimáticos (Mullen, 1998)

No.	CLAVE	PARAMETRO
1.	TPA	Temperatura Promedio Anual
2.	ODT	Oscilación Diurna de la Temperatura
3.	ITER	Isotermalidad
4.	ESTT	Estacionalidad de la Temperatura
5.	TMAXPPMC	Temperatura máxima promedio del período más caliente
6.	TMINPPMF	Temperatura mínima promedio del período más frío
7.	OSCAT	Oscilación anual de la temperatura
8.	TPCMH	Temperatura Promedio del cuarto ¹ más húmedo
9.	TPCMS	Temperatura Promedio del cuarto más seco
10.	TPCMC	Temperatura Promedio del cuarto más caliente
11.	TPCMF	Temperatura Promedio del cuarto más frío
12.	PA	Precipitación Anual
13.	PPMH	Precipitación del período más húmedo (semana más lluviosa)
14.	PPMS	Precipitación del período más seco
15.	ESTP	Estacionalidad de la precipitación
16.	PCMH	Precipitación del cuarto más húmedo
17.	PCMS	Precipitación del cuarto más seco
18.	PCMC	Precipitación del cuarto más caliente
19.	PCMF	Precipitación del cuarto más frío

De acuerdo los 19 parámetros climáticos con significado biológico, la subcuenca de Zapotitlán Salinas presenta una temperatura promedio anual que va de los 15.1 a los 21.5°C; una oscilación diurna de la temperatura entre 13.3 y 15.3°C; una isotermalidad de 0.65 a 0.69°C; una estacionalidad de la temperatura entre 0.47 y 0.68°C; una temperatura máxima promedio del período (semana) más caliente entre 24.9 y 32°C; una temperatura mínima promedio del período (semana) más frío entre 5.8 y 9.3°C; una oscilación anual de la temperatura de 19.7 a 22.7°C; una temperatura promedio

¹. Entiéndase como cuarto: tres meses consecutivos.

de los cuatrimestres más húmedo entre 16.3 y 21.6°C; más seco entre 13.9 y 18.4°C; más caliente de 18.1 a 23.2°C; y más frío entre 13.8 y 18.2°C; una precipitación anual entre 421 y 660 mm; una precipitación del período más húmedo (semana más lluviosa) entre 27 y 35 mm; durante el período más seco no hay precipitación; una estacionalidad de la precipitación de 93 a 105%; una precipitación de los cuatrimestres más húmedo de 213 a 346 mm; más seco entre 0 y 27 mm; más caliente entre 148 y 226 mm y finalmente, más frío entre 10 y 30 mm.

Los valores de los 19 parámetros climáticos, precipitación mensual, temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual se insertaron en la base de datos del proyecto. De todos estos, se eligieron los parámetros que tienen que ver con la precipitación por su relación más estrecha con los fenómenos de degradación: 12, 13, 14, 16, 17, además la precipitación del mes más lluvioso que resultó ser junio, con un intervalo de precipitación media entre 85.8 y 156.8 mm.

La Figura 7 presenta el mapa de precipitación anual (parámetro número 12), en donde la distribución espacial muestra valores desde los 421 mm en las zonas más bajas de la Subcuenca en el paisaje P13; hasta los 660 mm, valor máximo encontrado en la región del parteaguas Sureste en el cerro La Cuesta, perteneciente a la microcuenca El Castillo, en el paisaje P5.

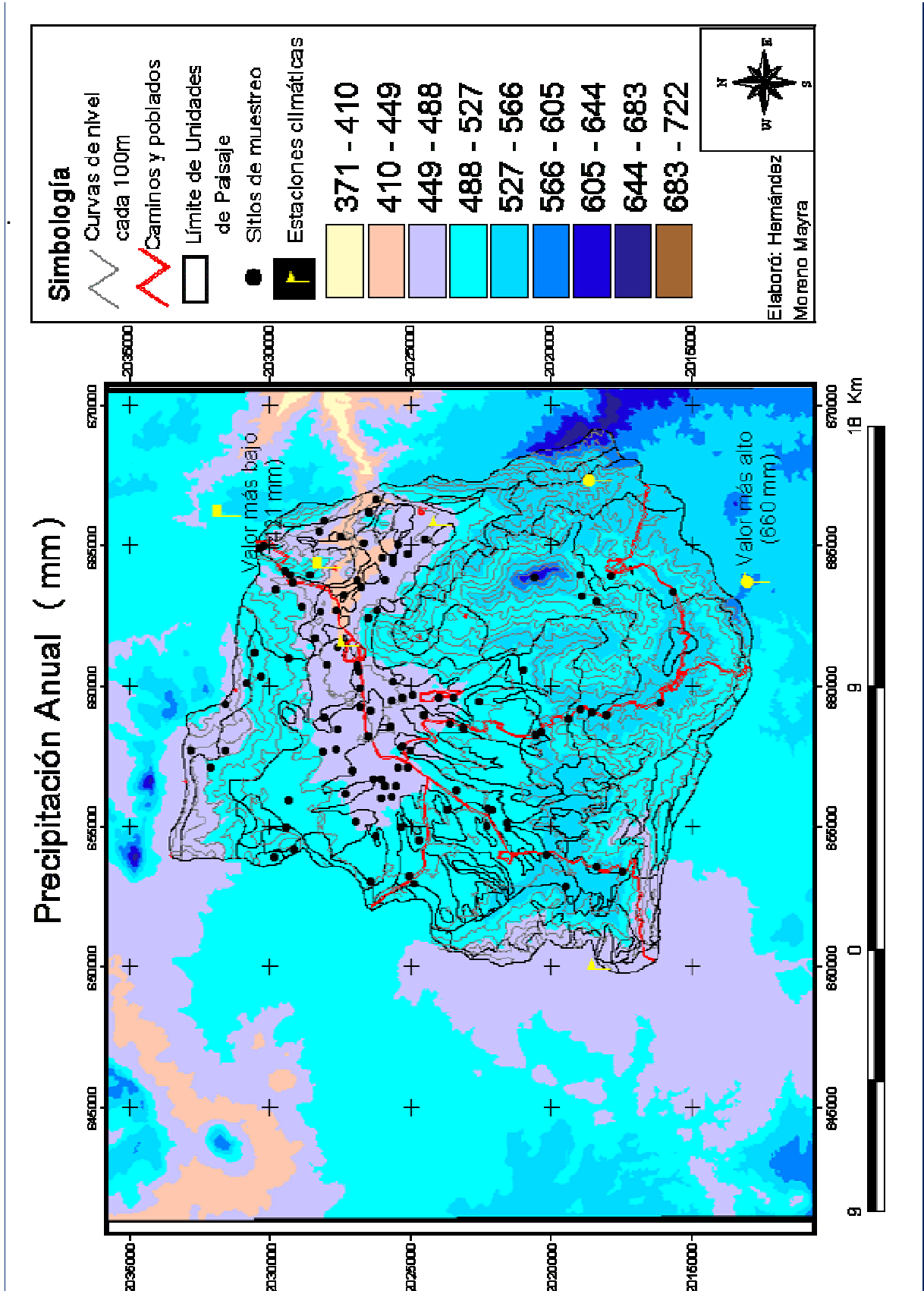


Figura 7. Mapa de precipitación anual, en donde se indican el valor más bajo identificado para la subcuena (421 mm) y el más alto (660 mm).

8.4. Grupo de datos edáficos

Respecto al suelo, se obtuvieron los datos de los parámetros físicos y químicos para cada punto muestreo, los cuales se insertaron en la base de datos del proyecto. Se añadió una columna a la base de datos para identificar el número de paisaje al que pertenece cada punto de muestreo. Los parámetros edáficos considerados son: profundidad total del perfil, profundidad del horizonte superficial, % de arena, % de limo, % de arcilla, densidad aparente, densidad real, % de porosidad, pH, % de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de potasio y de carbonatos; todos éstos para el horizonte superficial. También se incorporaron datos de conductividad hidráulica calculados mediante el programa Soil Water Characteristics v. 6.1.5 (Saxton, 2001): punto de marchitamiento permanente (WP-pmp), capacidad de campo (FC-cc), % de saturación de humedad (Sat-psh), cantidad de agua disponible (AW) y conductividad hidráulica (WatCond). Asimismo se cuenta con los datos ambientales de los 115 registros de la base de datos que se retomó del trabajo de Lopez *et al.* (2003).

El Cuadro 5 presenta una sección de la base de datos del proyecto.

Cuadro 5. Sección de la base de datos del proyecto en donde se agrupan las variables utilizadas: relieve, clima y suelo.

PERFIL	PAISAJE	PA	PCMH	PPMH	TPA	PREC6	Pend	PROFTOT	PROF_Hsup	ARENA	LIMO	ARCILLA	BD	DR	POR	WP(pmp)	FC(cc)	Sat(psh)	AW(aguadisp)	SatCond(condhid)	PH	MO	CIC	K	CO3
16BIS	13	468	235	28	20.4000	109.1542	4.472	116	8	54	32	14	1.5	2.08	58.20	10.6	23	44.7	0.12	1.97	7.64	0.96	29.98	5.3	n_d
A1	5	430	218	27	20.8000	98.4825	54.425	15	15	52	22	26	1.3	2.22	55.40	16.1	28.6	51.6	0.13	1.62	8.56	2.370	35.67	2.94	36.05
A10	4	519	258	30	18.6000	118.5056	36.070	74	9	36	28	36	1.2	2.29	55.45	20.3	33.9	53.9	0.14	0.96	8.63	2.200	21.73	2.99	n_d
A11	4	515	256	30	18.7000	117.2646	0.000	110	10	30	32	38	1.2	2.51	58.16	21.4	35.8	54.7	0.14	1.05	8.25	2.340	18.00	1.92	38.62
A12	4	495	247	29	19.5000	111.8505	16.279	100	20	38	28	34	1.2	2.65	62.64	19.5	33.3	54.5	0.14	1.51	8.25	2.710	29.68	2.30	n_d
A13	12	466	233	28	20.3000	106.9400	48.755	100	26	38	30	32	1.3	2.35	54.04	18.1	31.4	51.2	0.13	0.56	8.95	1.380	23.47	1.66	58.15
A14	6	494	247	29	19.5000	112.9722	30.676	100	18	18	38	44	1.3	2.55	40.00	24.9	40.3	52.1	0.15	0.16	7.96	0.340	58.90	1.79	n_d
A15	6	478	239	29	20.0000	108.4817	15.264	80	7	20	30	50	1.2	2.43	53.90	28.7	43	55.3	0.14	0.47	8.79	1.670	33.04	1.90	n_d
A16	12	457	228	28	20.5000	104.5172	8.062	46	46	48	18	34	1.3	2.2	46.81	19.3	30.8	52.2	0.12	0.67	8.74	1.950	32.56	1.15	n_d
A17	10	455	228	28	20.5000	104.6765	21.955	15	15	56	14	30	1.1	2	44.00	18.8	32	57.5	0.13	4.89	8.39	5.520	20.09	8.66	n_d
A18	10	465	232	28	20.4000	106.9274	11.180	160	25	52	24	24	1.4	2.12	46.69	14.6	26.1	48	0.11	0.69	8.43	1.030	29.02	4.48	n_d
A19	4	503	249	30	17.5000	116.0896	13.602	29	10	60	26	14	1.3	2.34	57.26	13	29.7	52.7	0.17	13.73	8.29	4.160	27.04	2.05	52.00
A2	5	476	239	29	20.0000	107.6037	42.802	110	18	30	30	40	1.2	2.07	51.20	22.4	36.4	54.2	0.14	0.69	8.76	1.940	21.12	1.66	n_d
A20	4	506	251	30	17.8000	117.2366	27.659	40	16	52	24	24	1.2	2.3	54.34	16	30.5	54.3	0.15	4.65	8.74	3.740	27.14	2.80	47.21
A20BIS	5	491	243	29	17.3000	113.6969	37.122	78	13	58	24	18	1.2	2.15	57.67	14.9	31.9	55.6	0.17	13.47	8.11	7.300	33.47	2.17	40.36
A21	10	472	235	28	20.0000	109.9841	5.000	108	18	60	20	20	1.3	2.27	54.62	13.8	26.1	49.7	0.12	2.44	8.12	2.240	33.47	5.46	n_d
A22	5	506	255	31	19.6000	118.9212	18.974	82	41	52	18	30	1.1	2.15	52.55	18.7	2.6	57.7	0.14	5.43	8.57	5.890	27.19	3.20	40.50
A23	4	477	237	29	17.2000	111.5475	21.840	80	12	38	36	26	1.3	2.3	54.78	15.2	29	49.4	0.14	0.69	8.02	1.090	25.40	3.17	30.10
A24	4	494	246	30	17.8000	115.5163	32.558	120	22	52	28	20	1.3	2.1	45.23	13.7	27.3	50.2	0.14	2.76	8.26	2.240	25.80	2.30	66.36
A25	11	504	253	30	19.5000	118.2936	29.206	84	14	58	30	12	1.5	2.25	57.44	10.2	22.7	44.5	0.13	3.24	7.14	1.270	20.91	2.90	n_d
A26	11	508	256	31	18.8000	120.4626	31.891	136	21	58	22	20	1.4	2.19	47.48	13.2	24.5	47.1	0.11	1.19	7.56	1.240	18.59	2.56	46.99
A27	5	502	253	31	18.4000	119.6262	54.645	110	36	30	34	36	1.2	2.07	51.20	20.3	35.1	54.3	0.15	1.09	6.99	2.250	20.49	2.82	n_d
A28	12	501	253	31	20.0000	118.6521	21.024	103	26	36	28	36	1.1	2.2	56.36	20.7	35.1	57.4	0.14	3.26	8.39	4.070	27.93	1.79	n_d
A29	13	490	247	30	20.2000	115.4235	0.000	120	7	22	58	20	1.3	2.33	57.51	13.2	32.3	52.2	0.19	5.05	8.33	2.380	21.88	4.61	n_d
A3	4	467	235	28	20.3000	105.9992	35.129	25	25	40	24	36	1.2	2	51.50	20.3	33.2	53.9	0.13	0.95	8.32	2.340	33.25	2.43	41.16
A30	10	485	244	29	20.0000	113.6334	4.000	28	28	60	30	10	1.3	2.18	59.17	12.4	31.5	52.9	0.19	28.4	8.35	4.790	35.44	2.43	38.62
A31	10	488	245	29	20.1000	114.0395	8.062	22	15	64	14	22	1.4	2.26	51.76	14.4	24.9	48.3	0.11	1.21	7.99	1.670	25.96	2.69	10.94
A32	10	482	242	29	20.2000	112.3741	3.000	75	18	34	32	34	1.3	2.39	51.46	19.2	33.3	52.9	0.14	0.82	8.32	1.880	25.16	3.97	n_d
A33	13	480	240	29	20.1000	111.1769	8.544	27	27	46	32	22	1.2	2.26	55.75	15.6	32.7	55.9	0.17	9.76	8.34	4.570	28.94	2.82	36.69
A34	5	478	239	29	20.2000	110.9588	28.160	125	48	56	22	22	1.2	2.23	61.43	15.6	30.6	54.8	0.15	6.65	8.57	4.270	27.93	4.10	57.93
A35	10	504	253	30	19.5000	117.9139	7.616	120	38	46	30	24	1.2	2.2	57.72	16.1	32.2	55.7	0.16	6.98	8.58	4.240	24.79	###	42.42
A4	4	466	235	28	20.2000	105.6899	49.930	88	25	24	36	40	1.2	2.05	53.17	22.5	37.6	54.9	0.15	0.93	8.86	2.120	24.24	3.71	n_d
A5BIS	13	509	253	30	19.0000	115.2040	12.207	100	12	56	26	18	1.4	2.38	46.63	12.4	24.5	47	0.12	1.66	8.63	1.360	19.21	2.82	n_d
A6	4	434	219	27	20.8000	99.2043	21.095	47	19	52	22	26	1.2	2.53	51.41	16.7	30.7	54.7	0.14	3.88	8.62	3.790	30.89	2.56	35.57
A8	4	497	248	29	19.4000	113.0680	51.923	114	30	34	28	38	1.3	2.55	60.00	21.1	34.4	51.9	0.13	0.34	8.85	1.190	20.93	1.92	n_d
A9	13	441	221	27	20.7000	101.1506	16.000	87	30	36	26	38	1.3	2.06	47.57	21.2	34.2	52.7	0.13	0.48	8.27	1.500	29.45	2.82	n_d
B1	13	455	228	28	20.4000	104.2366	4.472	200	25	50	30	20	1.4	2.28	46.61	13.1	25.9	48	0.13	1.41	8.16	1.380	25.09	6.10	91.20
B2	13	447	224	28	20.6000	102.5035	1.414	42	20	18	20	62	1.2	2.41	46.93	35	48.4	55.8	0.13	0.36	7.90	1.300	30.21	6.50	46.12
B3	13	449	225	28	20.6000	103.0412	8.246	190	15	24	50	26	1.3	2.05	44.06	15.1	31.9	51.3	0.17	1.29	8.24	1.400	33.51	6.10	29.83
B4	10	462	232	28	20.5000	107.2284	6.000	23	10	60	26	14	1.2	2.53	51.41	13.3	30.7	53.6	0.17	16.27	8.07	4.530	26.06	###	8.11
B5	13	468	235	28	20.4000	108.8321	5.000	88	10	74	20	6	1.5	2.43	45.72	8.2	20.8	42.7	0.13	12.4	8.07	2.050	18.40	3.70	28.34
B6	12	478	240	29	20.2000	111.6230	6.083	69	16	58	24	18	1.4	2	28.00	12.3	23.7	46.3	0.11	1.38	8.48	1.190	19.86	4.29	35.72
B7	13	481	242	29	20.1000	112.3352	3.606	173	5	56	28	16	1.4	2.01	42.36	11.8	24.5	47	0.13	2.49	8.06	1.510	26.40	3.60	35.72
B8	13	480	242	29	20.3000	112.5840	5.000	108	25	48	30	22	1.2	2.13	49.02	14.9	30	53.1	0.15	4.6	8.26	3.280	n_d	n_d	41.05
B9	13	501	253	31	19.9000	118.7797	2.236	109	18	34	46	20	1.4	2.45	46.68	12.6	27.9	48.3	0.15	1.32	8.52	1.010	19.36	1.37	18.94
D1(V6)	4	484	242	29	19.9000	111.3262	15.133	60	18	54	26	20	1.2	2.1	46.28	15	31.1	54.8	0.16	8.9	7.75	4.310	26.60	n_d	3.16
D2(V7)	13	454	228	28	20.5000	104.3671	0.000	30	11	76	12	12	1.4	2.53	45.76</										

8.5. Análisis estadísticos

Una vez que se tuvo la delimitación de las unidades de paisaje como unidad básica de estudio, que se generó toda la descripción físico-geográfica de éstas y la información de cada uno de los grupos de datos; se practicó el análisis estadístico con la finalidad de conocer el comportamiento y la interacción entre todas estas variables para poderlas relacionar con los procesos degradativos existentes.

Se utilizó un fragmento de la base de datos del proyecto que contiene 95 puntos de verificación, 18 propiedades edáficas, aquellas seleccionadas como indicadores de salud/calidad del suelo; 5 variables climáticas, principalmente de precipitación por ser las más relacionadas con los procesos erosivos y la pendiente (ver Cuadro 1 en materiales y métodos). A estos datos se les aplicó un análisis discriminante y un análisis de correlación canónica.

8.5.1. Análisis discriminante

Este análisis se aplicó para discriminar entre los diferentes paisajes, a fin de conocer las variables que contribuyen más en la diferenciación de los mismos y finalmente para conocer la proporción de perfiles edáficos que pertenecen a cada unidad con base a las variables analizadas.

Los resultados del análisis muestran una clara diferencia entre todos los paisajes con valores de R canónica entre 0.64 y 0.88 y valores de significancia desde 0.00 y hasta 0.03 en la tercer función discriminante. El Cuadro 6 presenta un resumen del análisis discriminante; asimismo, se muestran cuáles son las variables que mejor explican la variación y las diferencias entre los paisajes. Estas son la precipitación anual (PA), la temperatura promedio anual (TPA), la pendiente (PEND), la densidad aparente (BD) y el porcentaje de saturación de humedad (PSH) para la primera función discriminante, en la que se explica el 52% de la variación ($R=0.88$, $p=0.000$). Para la 2da función discriminante, las variables son: la precipitación del período (semana) más húmedo

(PPMH), la densidad real (DR) y la conductividad hidráulica y se explica el 72% acumulado de la variación ($R=0.75$, $p=0.00016$). La profundidad total del suelo (PROFTOT), el porcentaje de arcillas, el % de marchitez permanente (WPPMP) y la capacidad de campo (FCCC), para la 3a función discriminante en la que se explica el 82% acumulado de la variación ($R=0.64$ y $p=0.034$).

Cuadro 6. Resumen del análisis discriminante donde se muestran los valores de R, los niveles de significancia, el porcentaje acumulado de explicación y las variables que explican tal variación.

Función discriminante	R canónica	Niveles p	% explicado acumulado	variables
1	.883931	.000000	52.22	PA, TPA, PEND, BD, PSH
2	.759368	.000165	72.13	PPMH, DR, Cond. hidráulica
3	.643873	.034455	82.48	Prof. total, % arcilla, PMP, CC

PA = precipitación anual, TPA = temperatura promedio anual, PEND = pendiente, BD = densidad aparente, PSH = porcentaje de saturación de humedad, PPMH = precipitación del período (semana) más húmedo, DR = densidad real, PROFTOT = profundidad total del suelo, WPPMP = % de marchitės permanente, FCCC = capacidad de campo.

Además se cuenta con los valores de distancia de Mahalanobis, que corroboran los resultados del análisis (Figura 8), pues se observan valores muy altos en todos los casos. Esto indica que los paisajes son muy diferentes de acuerdo con las 24 variables analizadas. Además con los niveles de significancia mencionados se explica hasta un 82.5% de la variación.

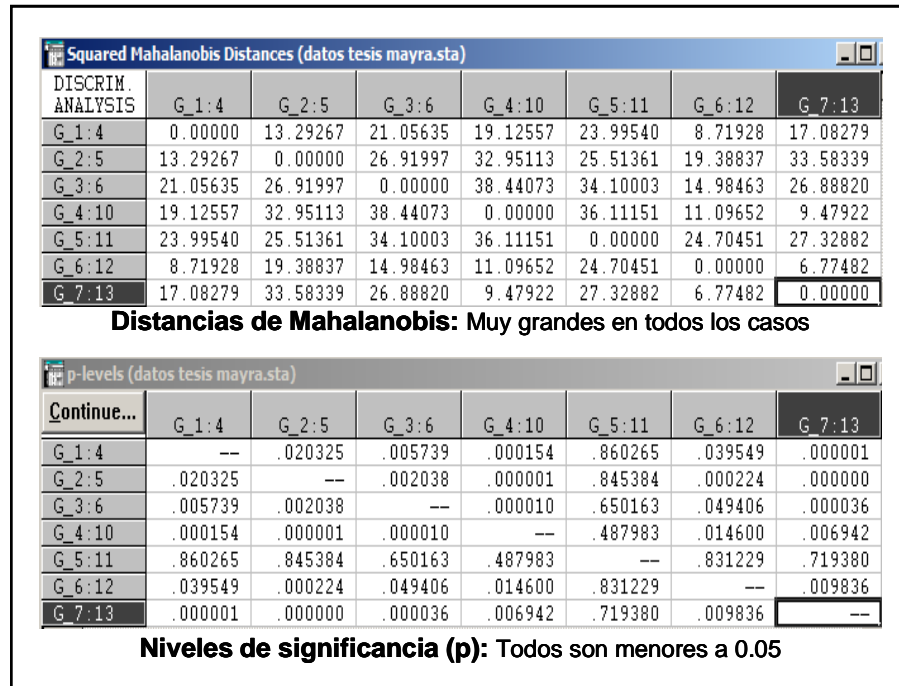


Figura 8. Distancias de Mahalanobis y niveles de significancia, producto del análisis discriminante aplicado.

Lo que antes se explicó matemáticamente se muestra gráficamente en el diagrama de dispersión, en donde se observa cómo se agrupan los puntos de muestreo de cada paisaje. La Figura 9 presenta claramente estas agrupaciones así como una matriz de clasificación, que indica la proporción de puntos de muestreo de cada unidad de paisaje que podrían pertenecer, de acuerdo con las variables analizadas, a otro paisaje. Esto es, del paisaje P4, un punto de muestreo podría ser más afín con las características de la unidad P5; dos, con P12 y uno, con P13. Por ello es que la matriz de clasificación marca que el 69.32% de los puntos están correctamente ubicados como pertenecientes y discriminantes de la unidad de paisaje P4.

De la unidad P5, dos podrían ser más afines con las características de la unidad P4 y uno con la P12. El porcentaje de pertenencia a la unidad es 66.66%. En cuanto a la unidad P6, el 100% de los puntos de muestreo presentan características de la unidad. De la unidad de paisaje P10, 3 puntos podrían ser más afines con las características de la unidad P13. El porcentaje de pertenencia a la unidad es 72.72%. De la unidad de paisaje P12, 2 puntos podrían ser más afines con las características de la unidad P4 y 4 puntos con la unidad P13. El porcentaje de pertenencia a la unidad es 62.50%. Finalmente, de la unidad P13, un punto podría ser más afín con las características de la unidad P4; 3 con la P10 y uno con la P12.

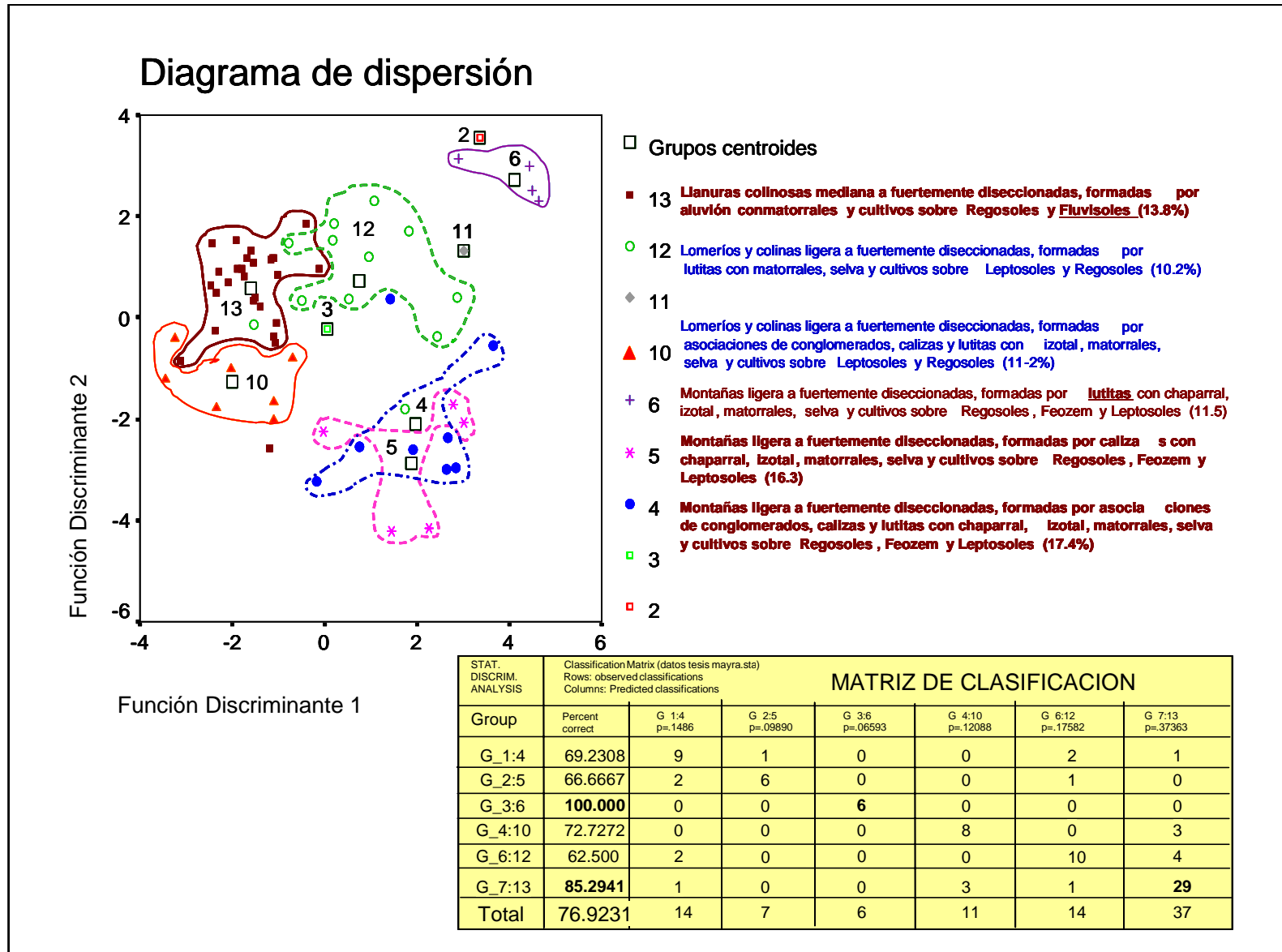


Figura 9. Diagrama de dispersi3n del an3lisis discriminante, en donde se aprecian las distancias entre los puntos de muestreo de cada unidad de paisaje. Adem3s se presenta la matriz de clasificaci3n que indica qu3 proporci3n de puntos de muestreo de cada unidad podr3a pertenecer, de acuerdo con las variables analizadas, a otra unidad de paisaje.

Complementando lo anterior, la Figura 9 muestra, en el diagrama de dispersión, que las unidades de Paisaje P4 y P5 (círculos rellenos y asteriscos) están espacialmente muy cercanas y entremezcladas; esto se debe a que son contiguas y la única diferencia es que en el Paisaje 5 las calizas no están en asociación; sin embargo, el análisis muestra una distancia de 13.29, estadísticamente significativa ($p=0.02$); por lo que se corrobora la diferencia que se observa geográficamente. Es por ello también que de acuerdo con la matriz de clasificación, un punto de muestreo del P4, podría ser más afín con las características de la unidad P5 y dos del P5 con el P4.

En contraste, el Paisaje 6 (cruces) es muy distinto al resto. La distancia más corta que hay es con el P12 (14.98) con una $p=0.049$; sin embargo siguen siendo diferentes, pues P5 son montañas y P12 son lomeríos. Lo anterior puede deberse a la presencia de las lutitas como único elemento litológico en P6. Además según la matriz de clasificación, este paisaje muestra el 100% de los puntos de muestreo bien clasificados de acuerdo con las variables analizadas.

El Paisaje 10 (triángulos) se observa cercano al Paisaje 13 (cuadros rellenos), aunque la distancia que hay entre ellos es de 9.47 con una $p=0.006$, con lo que se corrobora la diferencia entre ellos; pues P10 son lomeríos y P13 son llanuras colinosas. En este caso se observan tres de los puntos de P13 que están muy cerca del grupo de P10 (ver matriz de clasificación dentro del diagrama de dispersión).

El Paisaje 12 (círculos huecos) también se encuentra muy cercano al Paisaje 13, la distancia entre ellos es de 6.77 con una $p=0.009$. El primero son lomeríos con lutitas y el segundo son llanuras de aluvión. Posiblemente la cercanía se debe a que las condiciones físicas como sería la presencia de Regosoles, permiten el establecimiento de matorral crasicaule y agricultura de temporal, lo que propicia que geográficamente se encuentren entremezclados, a pesar de las diferencias que hay en relieve. La matriz de clasificación muestra que de acuerdo con las variables analizadas, 4 puntos de muestreo podrían pertenecer al paisaje P13.

8.5.2. Análisis de correlación canónica

El análisis de correlación canónica se utilizó para reconocer de qué manera se correlacionan las propiedades edáficas, como variable dependiente, con las variables climáticas y topográficas, como independiente; y cuáles de ellas tienen mayor correlación.

En el Cuadro 7 se muestra que hay cierta tendencia de las variables señaladas a asociarse, aunque estadísticamente no de manera significativa, ya que el valor de R es relativamente alto ($R=0.75$), aunque el valor de significancia está por debajo de 0.05 ($p=0.09$). Esto probablemente se debe a un submuestreo y datos insuficientes. Debido a lo anterior se consideró solamente la primera raíz canónica.

Cuadro 7. Matriz de correlación del análisis de correlación canónica.

STAT. CANON CL ANALYSIS	Chi - Square Test s with Successive Roots Removed					
Root Removed	Canonical R	Canonical R-sqr.	Chi-sqr.	df	p	Lambda Prime
0	.742173	.550821	128.0585	108	.091681	.083195
1	.688326	.473792	86.8413	85	.424306	.185215
2	.602839	.363415	53.7753	64	.814994	.351980
3	.504225	.254243	30.5159	45	.951263	.552920
4	.448577	.201221	15.4081	28	.973767	.741421
5	.267968	.071807	3.8375	13	.992796	.928193

Además se cuenta con la matriz de correlación entre los grupos de datos edáficos (variable dependiente) y climáticos-topográficos (variable independiente) (Cuadro 8); en donde se observa que, para el grupo de datos edáficos, el % de arcilla, el % de marchités permanente (WPPMP), el % de saturación de humedad (SATPSH), el contenido de agua disponible (AWAGUAD), la conductividad hidráulica (SATCOND), el contenido de materia orgánica (MO) y el % de carbonatos (CO₃) son las variables más correlacionadas. Para el grupo de datos climáticos la precipitación anual (PA), la precipitación del cuatrimestre más húmedo (PCMH) y la precipitación de la semana más húmeda (PPMH), fueron las variables con mayor correlación. En el Anexo 1 se presentan las últimas dos coberturas.

Cuadro 8. Matriz de correlación entre grupos de datos edáficos-climáticos-topográficos.

STAT. CANONICL ANALYSIS	Canonical Weights, right set (datos tesis mayra.sta)					
variable	Root 1	Root 2	Root 3	Root 4	Root 5	Root 6
PROFTOT	.31143	.03414	-.13567	-.20104	.00996	.13222
PROHSU	-.02244	-.34345	-.16381	.18666	-.16590	-.81070
ARENA	-.07301	-.12804	-.94552	-1.66031	-1.64297	-1.92583
LIMO	.67936	-.07014	.03642	-1.48866	-.67154	.12128
ARCILLA	-1.57329	-3.98148	-1.73099	3.40051	-.67095	-2.18853
BD	-.28987	-1.81110	-.42135	.80901	.58240	.34577
DR	-.12988	.07849	-.21329	.17448	.53291	.18861
POR	.09731	-.00495	-.20047	-.01475	-.46985	.17705
WPPMP	1.08849	4.27557	.64641	-3.90916	-.46321	.79356
FCCC	-1.18647	-.46927	-.15999	-.06085	-.32197	.31559
SATPSH	1.07774	-2.29382	1.27532	1.56925	1.71614	.44257
AWAGUAD	1.45046	1.30073	-1.35504	-.31310	-.25839	-2.45411
SATCOND	.75408	-1.06770	.05080	1.35235	.13875	.28950
PH	-.27731	-.10897	-.23031	.54139	-.16092	.39287
MO	-.70838	-.59155	-.31541	-1.03109	.24309	1.21505
CIC	-.19765	-.16033	.53700	-.16714	-.77923	-.06307
K	.02509	.30145	-.01493	.43070	.16453	-.22628
CO3	-.72787	.16290	-.17486	-.03663	.29270	.37346

STAT. CANONICL ANALYSIS	Canonical Weights, left set (datos tesis mayra.sta)					
variable	Root 1	Root 2	Root 3	Root 4	Root 5	Root 6
PA	-7.75736	1.17789	-2.85260	-4.09808	4.70901	-5.97763
PCMH	9.35078	-1.61750	3.58567	11.24697	1.14923	8.48368
PPMH	-1.13720	2.53340	3.04475	-.44672	1.21824	-1.45892
TPA	-.53370	-.48978	-.39595	.25482	-.08060	-1.28769
PREC6	-.34626	-2.73530	-3.58904	-7.04814	-6.54457	-1.94275
PENDIENT	-.64671	-.85399	.10324	.09673	-.38047	.12624

WPPMP = % de marchitės permanente, SATPSH = % de saturaci3n de humedad, AWAGUAD = contenido de agua disponible, SATCOND = conductividad hidr3ulica, MO = contenido de materia org3nica, CO3 = % de carbonatos, PA = precipitaci3n anual, PCMH = precipitaci3n del cuatrimestre m3s h3medo, PPMH = precipitaci3n de la semana m3s h3meda

En el caso de la matriz que se genera como resultado de la correlaci3n entre grupos de datos, la pendiente no tuvo correlaci3n; sin embargo en las matrices de correlaci3n individual que tambi3n se generan en esta prueba estadística (Cuadro 9), se observa una mayor correlaci3n entre las variables climáticas mencionadas, la pendiente, el pH, el % de materia orgánica y el % de carbonatos. Estas últimas variables edáficas, dependen mucho del efecto de la precipitaci3n, pues son ellas las m3s relacionadas con el agua que entra al suelo, la cuál regula el contenido de carbonatos, lo que se ve reflejado en el pH del suelo, que al mismo tiempo es regulado por el contenido de

materia orgánica. Esta interacción también se ve reflejada en la correlación positiva que se da entre la precipitación de la semana más húmeda (PPMH) y el porcentaje de saturación de humedad del suelo (SATPSH).

Cuadro 9. Matriz de correlación entre la variable dependiente (propiedades de suelo) e independiente (parámetros climáticos y topográficos)

STAT. CANONICAL ANALYSIS							
Correlations, left set with right set (datos tesis mayra.sta)							
variable	PROFTOT	PROHSU	ARENA	LIMO	ARCILLA	BD	DR
PA	-.095917	.078286	.103743	-.079062	-.048531	-.148159	.113698
PCMH	-.086819	.073370	.097159	-.088274	-.032449	-.141012	.119449
PPMH	-.095120	.055413	-.009855	-.028758	.067474	-.217102	.080829
TPA	.050208	.108474	.011894	-.047197	-.001439	.142074	-.026183
PREC6	-.071850	.059859	.098440	-.078061	-.042255	-.131886	.107364
PENDIENT	-.331817	.223376	-.029456	-.065279	.086507	-.232447	-.220358

STAT. CANONICAL ANALYSIS							
Correlations, left set with right set (datos tesis mayra.sta)							
variable	POR	WPPMP	FCCC	SATPSH	AWAGUAD	SATCOND	PH
PA	.056704	-.047496	-.080409	.160594	.020927	.088284	-.264273
PCMH	.067367	-.035997	-.080721	.153985	-.004858	.066009	-.286890
PPMH	.066754	.064094	-.001442	.229247	.037785	.017846	-.298924
TPA	-.023747	-.008073	-.027124	-.143566	-.093027	-.040718	.126066
PREC6	.076715	-.045580	-.077771	.144957	.002042	.069083	-.306299
PENDIENT	.000128	.093039	.045920	.244776	.070928	.019211	.201751

STAT. CANONICAL ANALYSIS				
Correlations, left set with right set (datos tesis mayra.sta)				
variable	MO	CIC	K	CO3
PA	.281316	-.081194	-.156853	-.258007
PCMH	.258972	-.064740	-.143682	-.303513
PPMH	.255934	.069507	-.120450	-.286925
TPA	-.207304	.017819	.177749	.007891
PREC6	.255615	-.048321	-.149332	-.311797
PENDIENT	.263891	.282672	-.244534	.298894

8.6. Estimación del Índice de Erosión Potencial

México ha sido reportado como uno de los países latinoamericanos con procesos de degradación severa por efectos de la erosión (CONAZA-SEDESOL, 1994). Esta situación ha sido favorecida por las condiciones naturales del territorio y, acelerada

por la inadecuada explotación de la tierra por parte de la creciente población nacional, la cual se ha sextuplicado en el último siglo. Este incremento ha propiciado una deforestación excesiva de bosques y selvas, prácticas agrícolas en terrenos con fuertes pendientes y sobre todo, la ganaderización de gran parte del país con sobrepastoreo en muchos casos. Por ello se puede afirmar que alrededor del 80% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica y eólica (Becerra, 1999).

Figuroa *et al.* (1991) mencionan que Martínez y Fernández (1983) estiman que “la erosión promedio en México es del orden de 2.7 ton/ha/año”, utilizando datos de carga de sedimentos de los principales ríos del país. Mientras que Vázquez (1986), tomando en cuenta un factor de corrección por asolvamiento en los datos de Martínez y Fernández, calculó que “el valor medio de erosión en las cuencas del país es de 46.9 ton/ha/año”.

La erosión es uno de los procesos de degradación que más afecta a la zona de estudio; el 32.36% está afectado por erosión hídrica y eólica, con grados de medianos a severos de acuerdo con la metodología GLASOD (López *et al.*, 2003 y Hernández, 2005).

Por lo anterior y con la finalidad de tener datos cuantitativos, al menos potenciales, se consideró estimar la pérdida potencial de suelo en el Valle de Zapotitlán.

8.6.1. Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (IEPLH)

La Figura 10 presenta el seguimiento de los insumos que se utilizaron y las coberturas que se produjeron, a partir de éstos, para obtener los mapas del Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (IEPLH), De acuerdo con FAO (1980), modificado por SEDESOL-INE (1993).

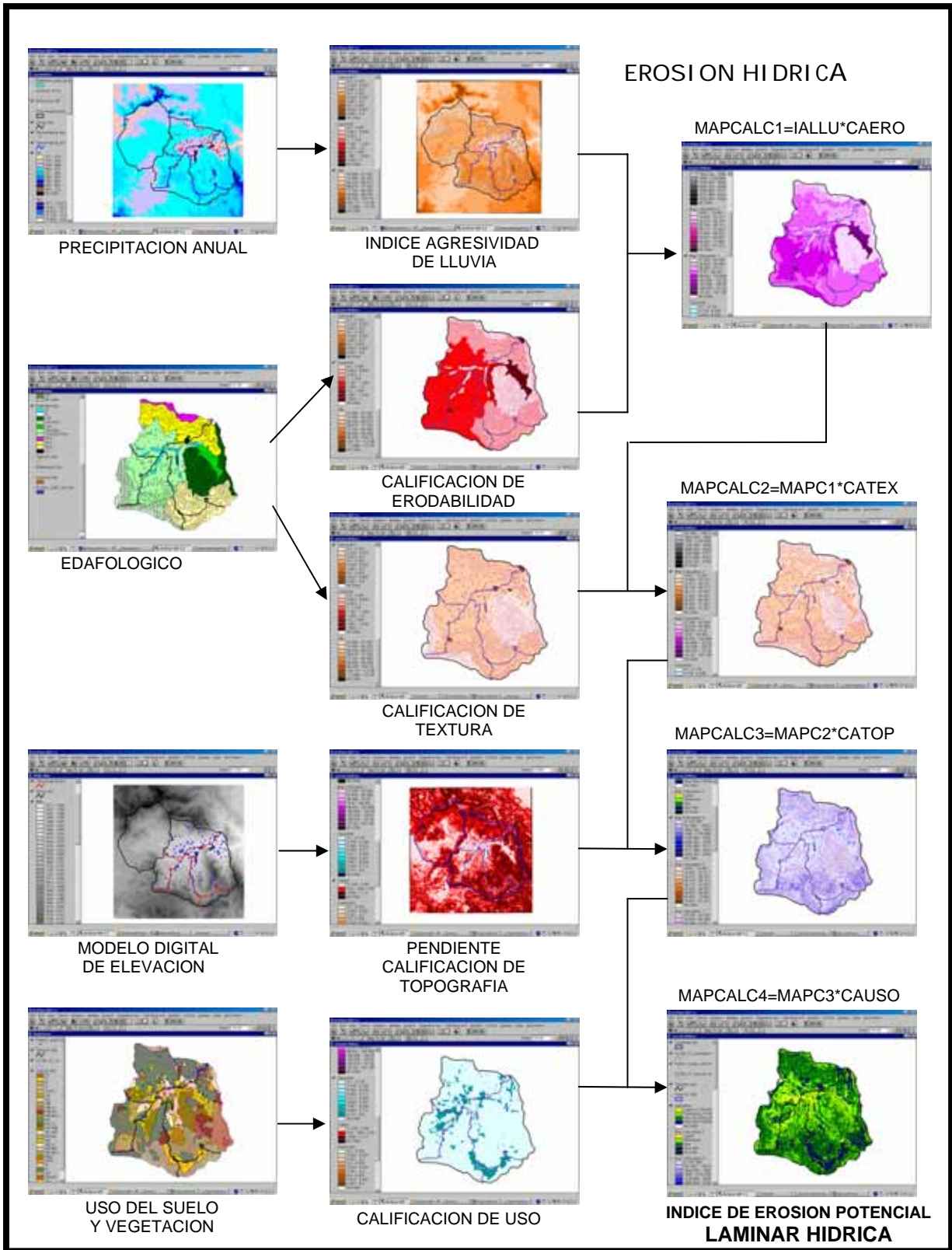


Figura 10. Mapas básicos y derivados que se utilizaron para producir el Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica (FAO (1980), modificado por SEDESOL-INE (1993).

En la Figura 11 se observa el mapa de erosión potencial hídrica con la cobertura de erosión hídrica identificada según Glasod (López *et al.*, 2003). La gráfica muestra que más del 50% de la cuenca presenta un riesgo de perder entre 50 y 200 ton de suelo/ha/año por efecto de la erosión hídrica.

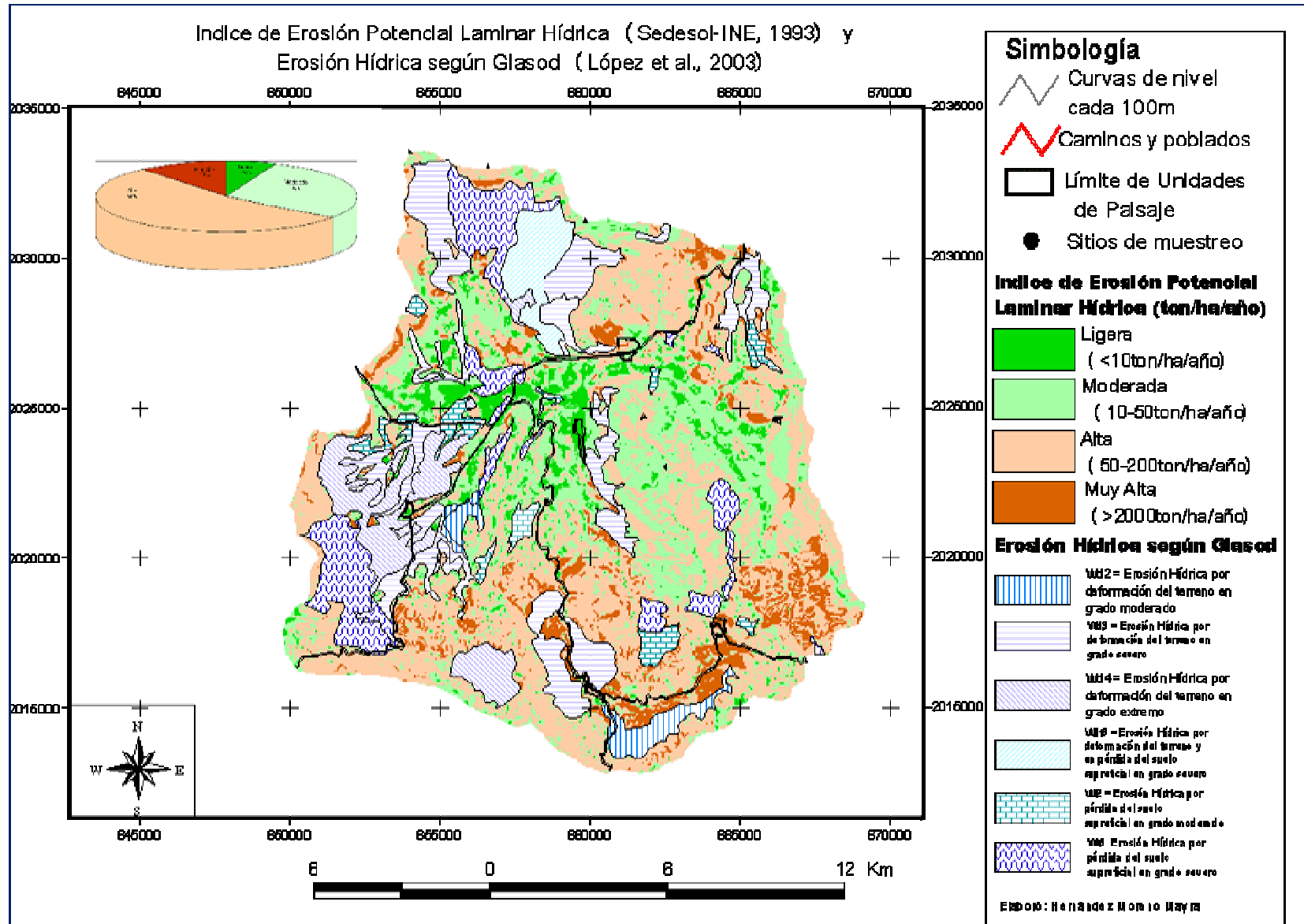


Figura 11. Sobreposición de las coberturas de erosión potencial hídrica y erosión hídrica según Glasod (López *et al.*, 2003).

Respecto a la distribución espacial de las clases de erosión potencial hídrica, es importante hacer notar que la unidad de paisaje 4 (P4) es la que se encuentra en la zona donde potencialmente se presentaría una mayor influencia de la precipitación para desprender las partículas del suelo. Lo anterior coincide con la cobertura de clases de degradación según Glasod (López *et al.*, 2003) y con los datos de propiedades edáficas y de los análisis estadísticos. La Figura 10 muestra la sobreposición de los mapas antes mencionados, en donde se observa cómo los polígonos de Glasod coinciden con las áreas susceptibles a la erosión potencial hídrica alta. En la porción Norte de la cuenca, en los Cerros Tarántula, Pajarito y Chacateca, el Paisaje 4 está conformado por laderas cóncavas y convexas, en algunas partes fuertemente disecadas, formadas por lutitas en asociación con conglomerados, con pendientes mayores al 25% y Regosoles calcáricos, suelos comúnmente inmaduros y poco estables. Lo que da la condición para que la zona sea más susceptible a erosionarse.

Lo anterior coincide con los tipos de erosión que actualmente se presentan en esa región en particular, en donde se ha observado erosión laminar o difusa que afecta las zonas en donde las pendientes son mayores al 20%, además de erosión lineal o concentrada en forma de canalillos, cárcavas y barrancas (Figura 12).

En la región Sur de la cuenca, en las inmediaciones de Metzontla y Xochiltepec, también encontramos erosión potencial alta (50-200 ton/ha/año). Se trata en este caso del Paisaje P2, que está formado por planicies inclinadas con remoción ligera, formadas por areniscas-Cuarcitas, pendientes >35%, Regosoles éutricos, también inestables. Todas estas condiciones, más el hecho de ser una zona dedicada a la agricultura, propician la alta susceptibilidad a la erosión.

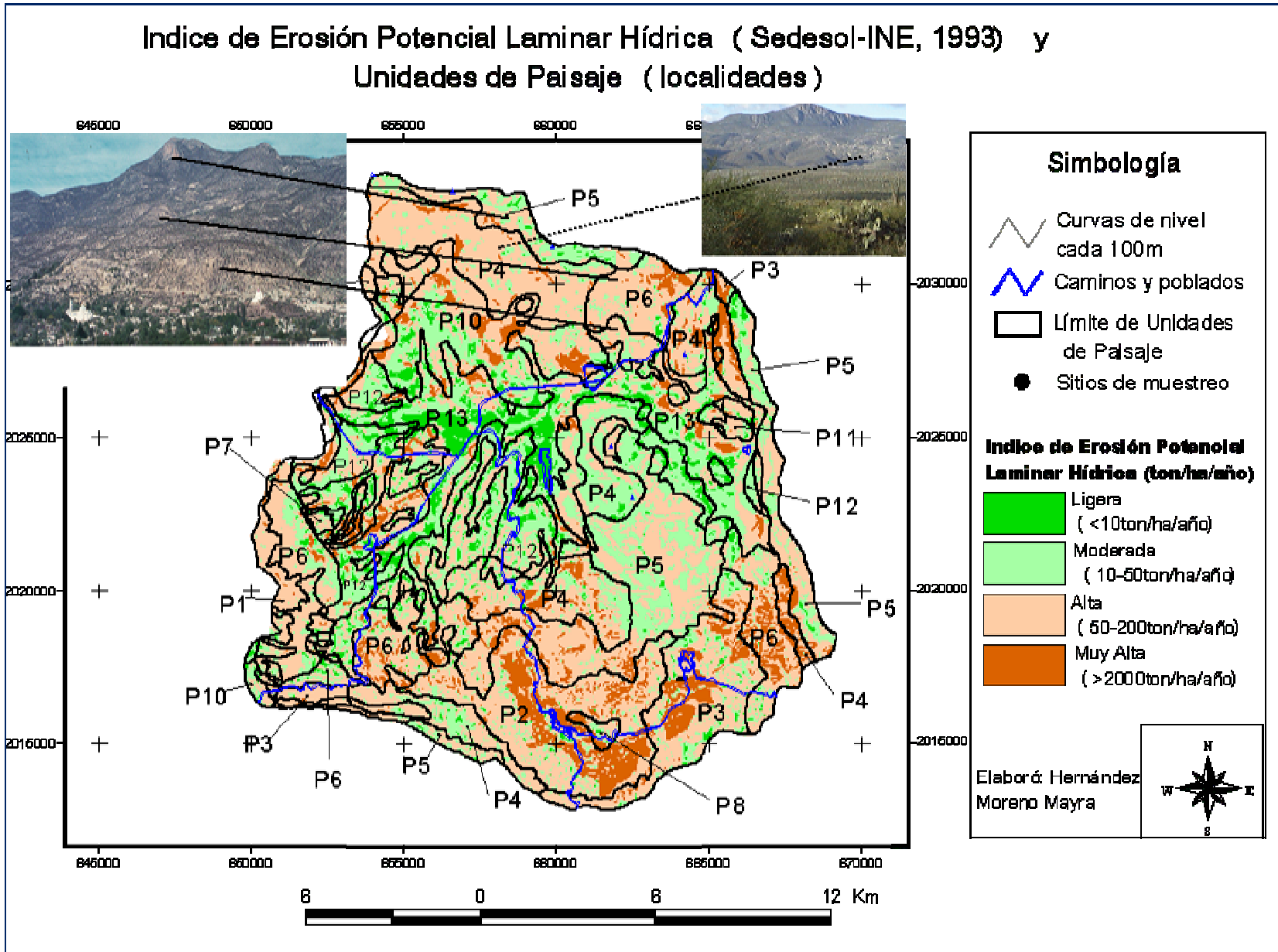


Figura 12. Sitios de coincidencia entre erosión potencial hídrica alta a muy alta y erosión en canalillos, cárcavas y barrancas, que se manifiesta actualmente.

En el Cuadro 10 se muestra una clasificación del riesgo de erosión que podría presentar cada una de las unidades de paisaje, y la cantidad de suelo que se perdería por unidad.

Cuadro 10. Relación de la Clase de Erosión Hídrica que podría presentar cada unidad de paisaje.

UNIDAD DE PAISAJE	CLASE DE EROSION HIDRICA
P2, P3, P6	MUY ALTA (50-200 ton/ha/año)
P8	ALTA – MUY ALTA (50->200 ton/ha/año)
P4, P7, P11	ALTA (50-200 ton/ha/año)
P1, P5	MODERADA A ALTA (10-200 ton/ha/año)
P13	LIGERA A MODERADA (10-50 ton/ha/año)
P12, P10	LIGERA A MUY ALTA

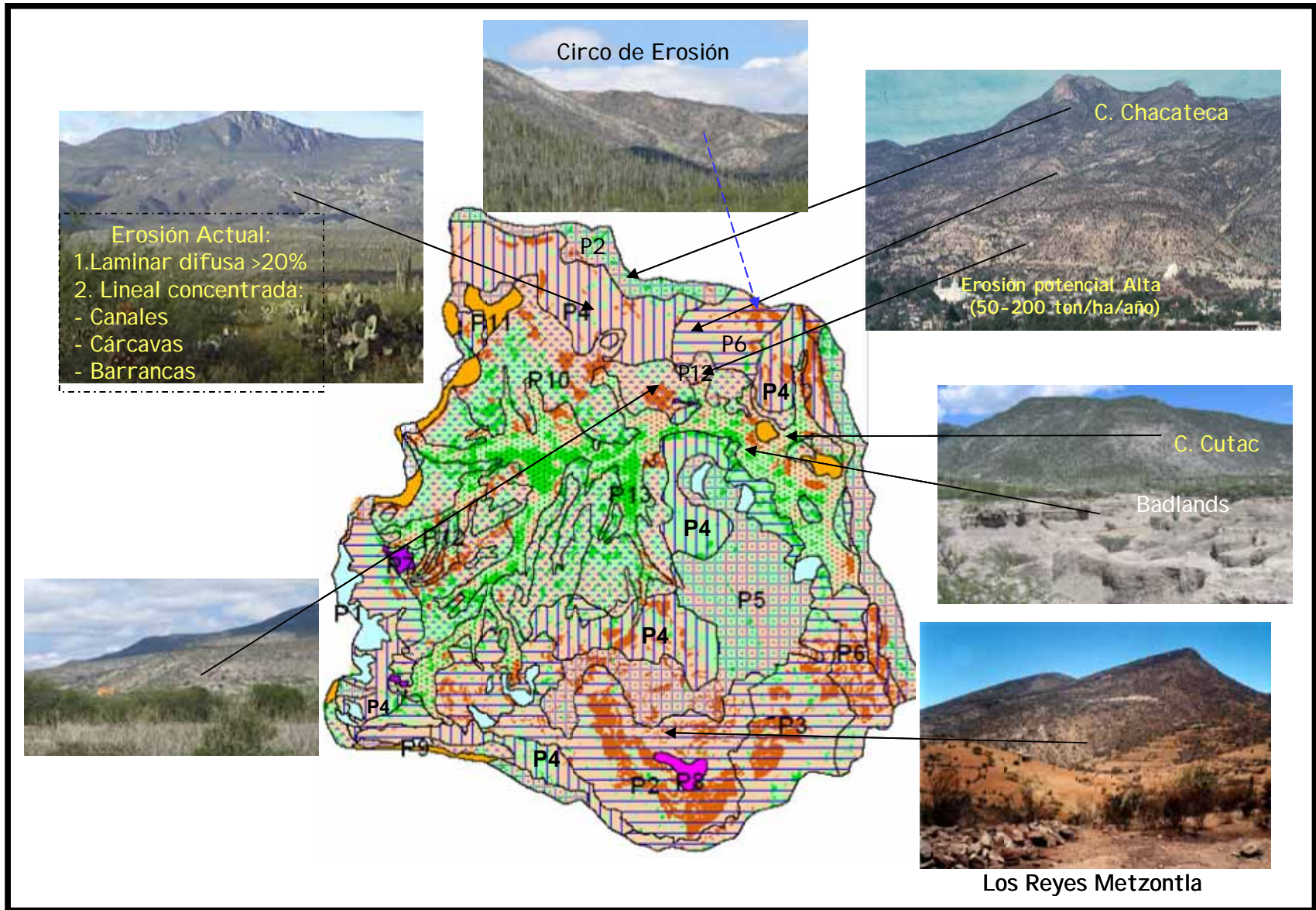


Figura 13. Mapa del Índice de Erosión Potencial Laminar Hídrica con fotografías panorámicas de las condiciones actuales

8.6.2. Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica (IEPLE)

La Figura 14 presenta el seguimiento de los insumos que se utilizaron y las coberturas que se produjeron, a partir de éstos, para obtener los mapas del Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica (IEPLE).

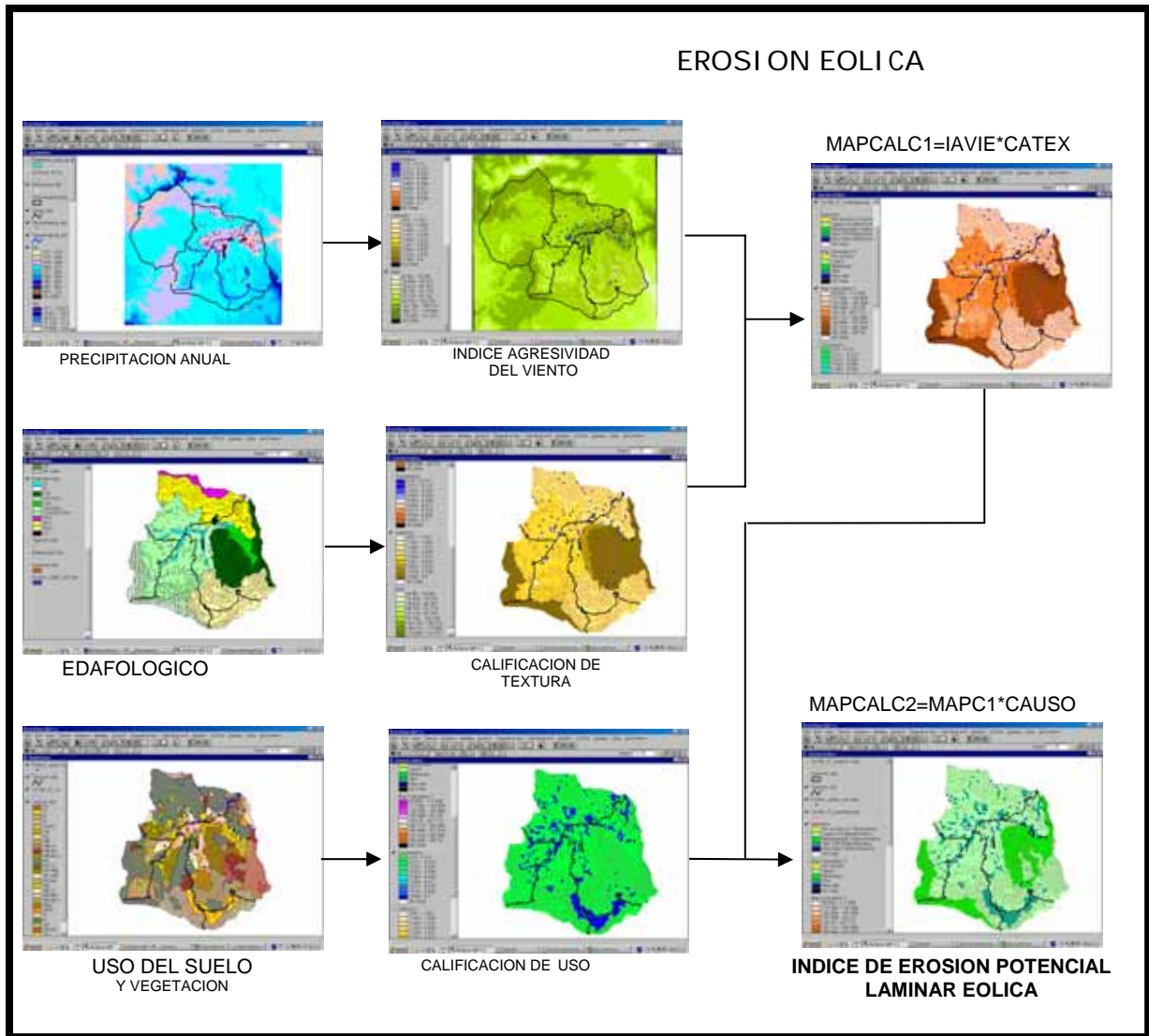


Figura 14. Mapas básicos y derivados que se utilizaron para producir el Índice de Erosión Potencial Laminar Eólica.

En la Figura 15 se observa la cobertura de las 13 unidades de paisaje con el mapa de erosión potencial eólica. El histograma muestra que la zona potencialmente perdería entre 12 y 50 ton de suelo/ha/año en casi del 70% de la cuenca por efecto de la erosión eólica ligera.

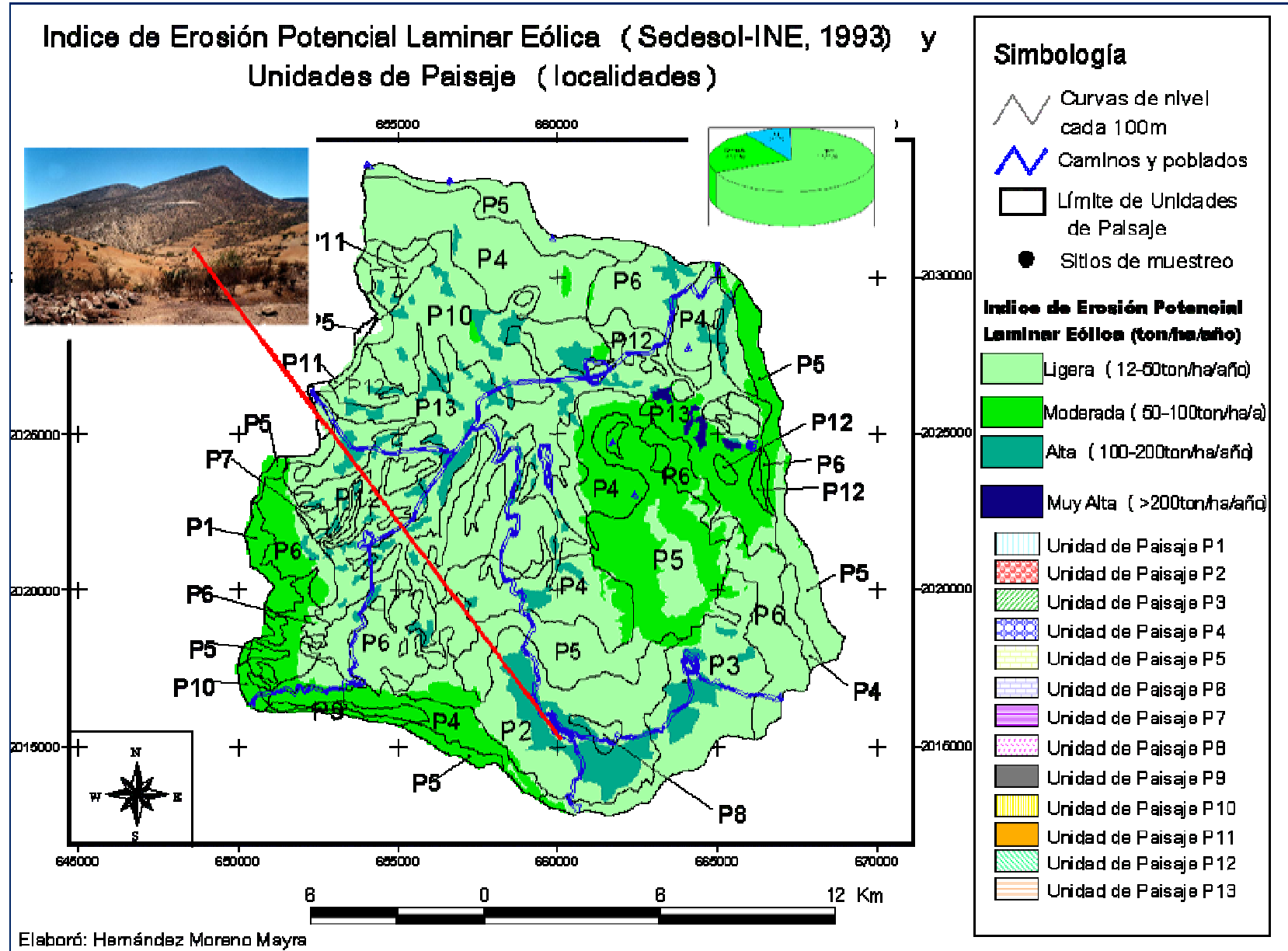


Figura 15. Sobreposición de las coberturas de erosión potencial eólica y unidades de paisaje.

En la distribución espacial de la erosión moderada (50-100 ton/ha/año), se observa un comportamiento muy peculiar, pues la encontramos al Oriente de la cuenca en la Sierra conformada por los Cerros Grande y Tierra Amarilla, formados por calizas y lutitas sobre laderas convexas con disección fuerte y Leptosoles réndzicos, suelos delgados y pedregosos. Las unidades de paisaje que se encuentran aquí son la P4 y P5. Creemos que la exposición al Este de los cerros es lo que los hace susceptibles a las fuerzas erosivas del viento, pues al ser suelos de texturas muy arenosas, con cierto contenido de limos (20% aproximadamente) y mínimo de arcillas, se favorece su pérdida. La Sierra Miahuatepec también presenta esta condición. Otra zona de la cuenca con erosión eólica moderada está al surponiente, en la sierra que forma el límite natural entre las subcuencas alta y baja; que está formada por un sistema de laderas convexas fuertemente disectadas y piedemonte denudativo, con lutitas principalmente y basaltos en la parte más alta de los Cerros Ometepec y La Yerba. Los suelos que se formaron corresponden a una asociación entre Leptosol réndzico y lítico, cuya característica principal es que son muy delgados y pedregosos, condición que los hace más susceptibles al viento, además de la posición topográfica en la que se encuentran, ya que como se mencionó antes, la cima de las elevaciones es en donde se produce una mayor evapotranspiración y esto conduce a una mayor predisposición al desprendimiento de las partículas del suelo.

La distribución de la erosión eólica alta (100-200 ton de suelo/ha/año) coincide con zonas de parcelas de temporal, que una buena parte del año están completamente desprovistas de vegetación y por tanto el suelo está desprotegido. Esta situación se presenta de forma muy evidente en las inmediaciones de la localidad de Metzontla.

Finalmente, la erosión eólica muy alta (>200 ton de suelo/ha/año) coincide con zonas completamente desmontadas en la entrada de la cuenca y expuestas a la incidencia directa de los vientos, principalmente en zonas identificadas como circos de erosión (Muñoz *et al.*, 2004), que también presentan el riesgo más alto de presentar erosión hídrica.

Los resultados que se presentan coinciden de algún modo con lo que de manera directa se ha observado en la zona, con lo que se puede decir que en la cabecera de la cuenca se presenta principalmente erosión vertical favorecida por la pendiente, mientras que en la parte media y baja de la cuenca se ha dado más erosión horizontal y ensanchamiento de ríos, por efecto de tasas de infiltración bajas y por ende de esorrentía alta; resultando en la formación de cárcavas y fragmentos de terrazas y formación de barrancos profundos (Muñoz *et al.*, En preparación).

En el Cuadro 11 se muestra una clasificación del riesgo de erosión que podría presentar cada una de las unidades de paisaje, y la cantidad de suelo que se perdería por unidad.

Cuadro 11. Relación de la Clase de Erosión Eólica que podría presentar cada unidad de paisaje.

UNIDAD DE PAISAJE	CLASE DE EROSION EOLICA
P3, P4, P5, P6, P7, P8, P10, P11, P12, P13	LIGERA (12-50 ton/ha/año)
P1, P3, P4, P5, P6, P10, P13	MODERADA (50-100 ton/ha/año)
P2, P8	ALTA (100-200 ton/ha/año)

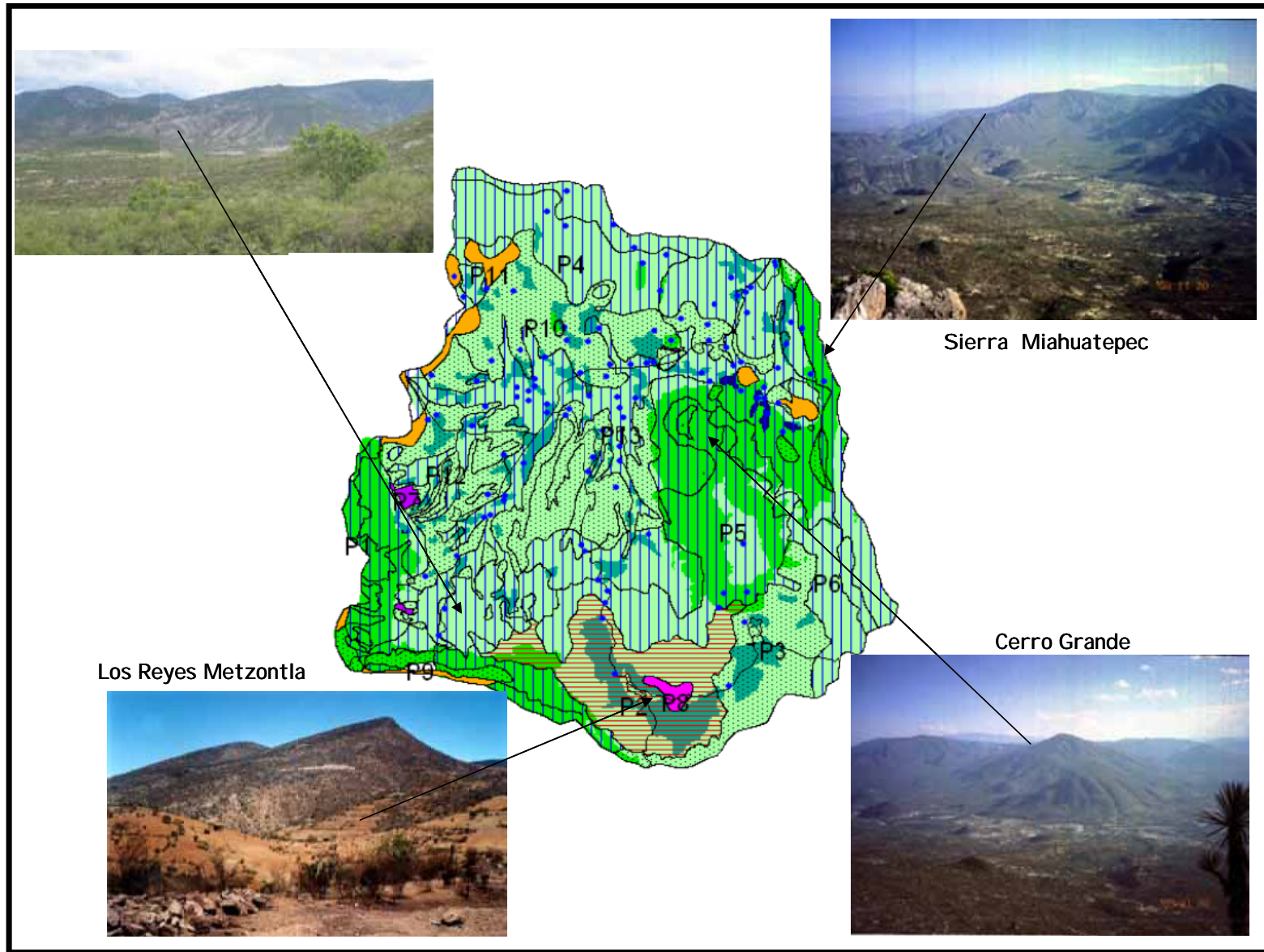


Figura 16. Mapa de Índice de Erosión Potencial Laminar Eòlica, con fotografías panorámicas de las condiciones actuales

9. Discusión

9.1. Paisajes

Para entender la estructuración de una zona desde el punto de vista paisajístico, es necesario realizar una evaluación de la interacción entre los factores físicos, biológicos, climáticos y humanos (Del Valle *et al.*, 1997). En el caso de la zona de estudio se observa una complejidad físico-geográfica relacionada con los elementos que conforman los paisajes, en donde la variación edáfica responde básicamente a la complejidad litológica y topográfica de la zona, la cuál se ve reflejada en la presencia de los diferentes tipos edáficos en cada unidad de paisaje y que al mismo tiempo se evidencia en la complejidad de las asociaciones vegetales.

A continuación se irá detallando e integrando la información obtenida para cada una de las variables consideradas en el trabajo.

9.2. Topografía

El relieve es uno de los factores formadores del suelo (Jenny, 1961 citado por Birkeland, 1999); influye en la variación climática; en la formación del suelo, así como la susceptibilidad a degradarse; además participa en el establecimiento y distribución de organismos, y condiciona las actividades humanas (Muñoz *et al.*, 2004).

El conocimiento de la variación de los parámetros del terreno influye en la variación de las propiedades edáficas, que a su vez pueden utilizarse como indicadores del estado de degradación del suelo.

Así tenemos el caso de la pendiente, uno de los atributos primarios del terreno que "mide la tasa de cambio de la elevación en dirección del escarpe del declive" (Wilson y Gallant, 2000) y que es el medio por el cual la gravedad induce flujo de agua y otros materiales, afecta la velocidad del flujo superficial y subsuperficial y por tanto el contenido de agua en el suelo y su formación, la erosión potencial, y muchos otros

procesos hidrológicos, edáficos y geomórficos importantes (Wilson y Gallant, 2000; Birkeland, 1999). El grado y longitud de inclinación de la pendiente son dos de los principales factores que determinan la susceptibilidad del suelo a ser degradado, específicamente por efecto de la erosión, considerada por López *et al.* (2003) como el principal tipo de degradación que afecta la subcuenca.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede decir que las unidades más susceptibles a ser degradadas por efecto de la erosión en función de la pendiente que tienen, son los que corresponden a paisajes de Montaña, en los que la profundidad de disección del relieve, íntimamente ligada a la pendiente, muestra la capacidad que puede tener el agua para desprender las partículas del suelo y modelar la topografía; además de que en esta zona es donde se registra la precipitación más alta. Esto coincide con lo que se mostró en el Cuadro 2 (características y atributos de las unidades de paisaje) y en la cobertura de erosión potencial hídrica (Figuras 11 y 12), pues el riesgo de presentar erosión hídrica va de alto a muy alto, principalmente en las zonas Norte, Este y Suroeste. Evidentemente esta situación está muy relacionada al tipo de suelo, a su grado de erodabilidad y a la cobertura que presenta. En este caso, hacia el Norte y Este se encuentran principalmente Leptosoles réndzicos, suelos poco desarrollados y muy delgados; y Regosoles calcáricos, suelos inmaduros, muy inestables y poco diferenciados. Mientras que hacia el Suroeste se encuentran Leptosoles réndzicos y líticos, suelos muy pedregosos y poco profundos, en donde la pendiente es el principal factor que favorece la pérdida de suelo. En todos los casos hay predominancia de matorral crasicaule, comunidad en la que la vegetación se encuentra dispersa y ofrece baja cobertura, situación que también favorece la pérdida de suelo. Más adelante se detallará respecto a la variación climática y edáfica.

Otro atributo del terreno es la exposición u orientación de laderas, que se refiere a la dirección hacia donde está orientada la cara de la ladera y generalmente se mide en grados en el sentido de las manecillas del reloj, iniciando desde el norte (Wilson y Gallant, 2000). Por ello se considera muy importante la información que puede brindar el conocer la exposición de las laderas y la pendiente, ya que tienen que ver con la

variación de las propiedades del suelo y el contenido y distribución de humedad en él, así como con la tasa de escorrentía; lo que a su vez está íntimamente relacionado con la susceptibilidad de éste a erosionarse (Brikeland, 1999).

De acuerdo con lo anterior, los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que las unidades de paisaje P2, P4, P5 y P6 son las más susceptibles a padecer procesos degradativos intensos, debido a la conjunción de los atributos del terreno pendiente y exposición, lo que nos lleva a pensar que las tasas de escorrentía serán mayores en los sitios con pendiente más pronunciada y la distribución diferencial de la humedad propiciará una mayor pérdida de suelo en las laderas debido a una mayor tasa de evapotranspiración y mayor susceptibilidad a erosionarse.

9.3. Clima

El clima, como factor formador del suelo, tiene una variación espacial importante en la zona de estudio, la cual se analizó a fin de saber cómo está influyendo en la variación edáfica y cuál es la relación con los procesos de degradación del suelo, específicamente los erosivos. De acuerdo con la revisión hecha por Jansson (1982) y Walling y Kleo (1979), citados por Yair (2002), existe una estrecha relación entre la precipitación anual (PA) y los procesos geomorfológicos fundamentales en el entendimiento de la dinámica erosiva de una región, como son la escorrentía anual y la producción anual de sedimentos. Además señalan que "hay muchos modelos que indican la existencia de dicha relación positiva entre la precipitación anual y la tasa de denudación cuando la precipitación anual sobrepasa niveles umbrales de los 300mm". De acuerdo con los resultados obtenidos, este es el caso de la zona de estudio, ya que de acuerdo con la caracterización climática que se hizo, la precipitación anual (PA) fluctúa de los 421 a los 660 mm; además de ésta variable, la precipitación de la semana más húmeda del año (PPMH) y la precipitación del cuatrimestre más húmedo (PCMH) (variables muy relacionadas con los procesos degradativos del suelo); son tres de las variables que están explicando estadísticamente la correlación entre las propiedades edáficas, climáticas y topográficas analizadas; siendo estos últimos, elementos fundamentales que conforman las unidades de paisaje. Además, como se

mencionó antes, las variables del terreno (pendiente y exposición) están muy relacionadas con las tasas de escorrentía y la distribución diferencial de la humedad del suelo, asociada directamente a la tasa de infiltración.

9.4. Suelo

Como ya se ha mencionado previamente, la formación y variación del suelo depende de 5 factores: el clima, el relieve, el material parental, los organismos que viven en él y el tiempo (Jenny, 1961 citado por Birkeland, 1999). En relación a los procesos de degradación que pueden presentarse en él, debido a la variación de cualquiera de estos factores, Yair (2002) menciona que la generación de escorrentía implica no sólo factores climáticos representados por la variación de la precipitación, sino también propiedades de superficie, ligados directamente con el clima. El autor dice que "cuando hay grandes diferencias en la tasa de infiltración, relacionada esta al tipo de suelo", y por ende a la variación de sus propiedades; "habrá una gran influencia en la tasa de transformación de la precipitación en escorrentía; resultando en una redistribución espacial de los recursos hídricos".

Lo anterior se relaciona principalmente con las propiedades del suelo que tienen que ver con la clase textural (proporción de partículas) y el contenido de materia orgánica, que a su vez están ligadas con el movimiento del agua dentro y sobre el suelo. Esto se refiere a que cuando hay un mayor contenido de materia orgánica se incrementa el espacio poroso y disminuye la densidad aparente; esto favorece el movimiento del agua en el suelo, promoviendo el aumento en la tasa de infiltración. Además, de acuerdo con lo que mencionan Muñoz *et al.* (En preparación), la granulometría es un factor determinante, ya que de la proporción de partículas del suelo (clase textural), "dependen parámetros como la densidad aparente, porosidad e infiltración, entre otros y; a pesar de que es una de las propiedades más estables del suelo, en la superficie puede haber mucha variación debido a la influencia de factores externos como el viento, agua de escurrimiento, influencia humana, etc". Por ello es tan importante la presencia de cobertura vegetal sobre el suelo que aporte materia orgánica, pues además contrarresta el efecto de las gotas de lluvia que fragmentan los agregados de

suelo y dispersan las partículas, lo que puede ocasionar un bloqueo de los poros y la formación de una capa que lo sella, provocando aumento en la escorrentía y la erosión (Muñoz *et al.*, En preparación).

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, son precisamente las propiedades asociadas al movimiento y disposición del agua [conductividad hidráulica (SATCOND), porcentaje de saturación de humedad (SATPSH), porcentaje de agua disponible (AWAGUAD) y capacidad de campo(FCCC)]; las de clase textural (% de arcillas) y las de distribución del espacio poroso y compactación del suelo [densidad aparente (BD) y % de porosidad (POR)], las que estadísticamente están más correlacionadas con las variables asociadas a la precipitación y a la pendiente.

Se puede decir entonces, que aquellos sitios en donde los suelos tengan proporciones de partículas equilibradas, contenidos moderados de materia orgánica (arriba de 2.5%) y que tengan suficiente cobertura vegetal, la tasa de infiltración será mayor y la escorrentía menor, con lo que se podrá evitar la pérdida de las partículas de suelo. Estos sitios podrían ser en donde se encuentran suelos de tipo Feozem (PH), que son los más desarrollados, diferenciados y ricos en materia orgánica en la cuenca, aunque son los que se encuentran en menor proporción en la subcuenca. En este caso se podría considerar la zona donde se encuentran los puntos de muestreo PM7, P28 y PM15, que están a orillas del camino que lleva a Colonia San Martín, al sur de los Llanos, en los piedemontes de los cerros Mogote León y Tochenga, en la unidad de paisaje P12. Sin embargo, es necesario considerar que estos sitios son de especial atención, en cuanto al uso y manejo que se les debe dar, ya que por las características de pendiente (15%), uso actual (agricultura y matorral espinoso) y cantidad de precipitación anual (500 mm), pueden presentar problemas por erosión, ya que las coberturas generadas marcan un potencial de erosión hídrica de moderado a alto y eólica alto. Otro sitio a tomar en cuenta es al Norte de la carretera que va a San Juan Raya, en donde se encuentran los puntos PA28 y P27 en las unidades de paisaje P12 y P13, respectivamente y que también presentan potencial de erosión hídrica de moderado a alto.

Por otro lado, es muy importante considerar que en el caso particular del área estudiada, la cantidad de carbonatos también juega un papel muy importante en la correlación de las propiedades edáficas con las variables climáticas y topográficas, pues es una zona semiárida, con materiales y suelos principalmente de origen calcáreo (López *et al.*, 2003). En este caso, los carbonatos del suelo interactúan directamente con el agua y los disuelve, pero al desecarse pueden contribuir a la formación de costras que propicien la degradación física del suelo por encostramiento. Sin embargo, la presencia de vegetación que proteja al suelo y le aporte materia orgánica, podría ser la diferencia, ya que como mencionan Muñoz *et al.* (En preparación), en aquellos sitios donde existe mayor cantidad de vegetación y por ende de materia orgánica, la tasa de infiltración será mayor, situación que puede favorecer la lixiviación de los carbonatos.

De acuerdo con lo anterior, se sugiere que las propiedades edáficas que pueden ser consideradas como indicadores de calidad de suelo son: densidad aparente, porosidad, % de partículas, % de saturación de humedad, contenido de agua disponible, conductividad hidráulica, capacidad de campo, pH, contenido de materia orgánica y % de carbonatos.

De aquí surge la necesidad de tener coberturas de la variación espacial de cada una de las propiedades edáficas ya mencionadas y que se proponen en el presente trabajo como propiedades indicadoras de la calidad del suelo, a fin de conocer su variación espacial más precisamente y poder modelar su comportamiento espacial.

9.5. Análisis estadísticos

Los resultados del análisis discriminante muestran una clara diferencia entre todos los paisajes de acuerdo con los valores de R canónica y los de significancia (P), lo cual se corrobora con las distancias de Mahalanobis. Las variables que mejor explican la variación y las diferencias entre los paisajes son, para el grupo de datos climáticos, aquellas relacionadas con la cantidad de lluvia estimada para los períodos de mayor

precipitación en el año; para el grupo de datos edáficos, las asociadas al movimiento y disposición del agua, íntimamente relacionadas con propiedades texturales y de la condición de distribución del espacio poroso y compactación del suelo. Asimismo, era de esperarse que la pendiente fuera una de las variables más correlacionadas ya que como se ha venido mostrando, es uno de los elementos básicos de diferenciación de las unidades de paisaje.

En la matriz de clasificación (Figura 9), se evidencia que algunos de los sitios de muestreo presentan características más similares a unidades de paisaje contiguas; esto puede ocurrir debido a que cada unidad no presenta igual densidad de muestreo, lo que indica la necesidad de más puntos en aquellas unidades que fueron escasamente muestreadas, o no lo fueron; para así, hacer más robusto el análisis.

Además, es importante mencionar que dado que, de antemano, ya se sabe cuáles son los elementos que dan sus características y atributos a los paisajes, los análisis estadísticos se realizaron para saber cuáles de las variables de cada uno de los elementos de los paisajes analizados en ese trabajo (clima-topografía-suelo), tienen un mayor peso o influencia en esa diferenciación y cómo interactúan y se correlacionan entre ellos también como variables, cuyo comportamiento nos puede servir como indicador de lo que está ocurriendo con los procesos de degradación. Si bien los principales elementos discriminantes de los paisajes son el relieve, la litología y el clima, mientras que las propiedades edáficas son atributos que nos dan información más detallada de las unidades de paisaje.

Por otro lado, de acuerdo con el análisis de correlación canónica se encontró que las variables señaladas presentan cierta tendencia a asociarse, aunque no de manera significativa, lo cual se atribuye a la falta de datos debido a un submuestreo. Sin embargo y de manera similar a lo evidenciado por el análisis discriminante, las variables que muestran la correlación entre suelos y clima-topografía son: para el grupo de datos edáficos, las relacionadas a la granulometría, aquellas asociadas al movimiento y disposición del agua y las de distribución del espacio poroso y compactación del suelo. En cuanto al grupo de datos climáticos fueron los parámetros

que tienen que ver con la cantidad de precipitación registrada y estimada para los períodos con mayor presencia de lluvia en el año y finalmente, la pendiente como atributo del terreno.

El comportamiento de estas variables en especial, son los que pueden conferir una alta susceptibilidad a la degradación del suelo en la zona; pues, los atributos del relieve (pendiente y exposición) influyen directamente sobre el microclima y la variación de las propiedades edáficas, principalmente granulometría, la distribución de poros y la distribución de humedad en el suelo; lo que a su vez condiciona la relación infiltración/escorrentía, asociado esto último a la cantidad de precipitación y su distribución y al efecto protector de la vegetación. En la zona, todo esto facilita la ocurrencia de procesos de degradación como la erosión, que en el caso de las terrazas aluviales que se encuentran en la unidad de paisaje P13, ya ha sido identificada como muy severa (Muñoz *et al.*, En preparación). Otros procesos de degradación física del suelo, que se pueden manifestar en la zona y que están asociados a la correlación de estos parámetros son: la compactación (por disminución en la cantidad de materia orgánica y la porosidad y aumento en la densidad aparente), el sellamiento (por el efecto fragmentador de las gotas de lluvia y la rápida desecación del suelo, especialmente en zonas donde la vegetación está muy dispersa o ya no existe) y el encostramiento (formación de costras de sal por efecto de la evapotranspiración).

De acuerdo con lo anterior se sugiere eliminar las variables de precipitación que son redundantes (precipitación anual, precipitación del período más húmedo, que se refiere a la semana más lluviosa del año), e incluir en la lista de indicadores a la precipitación del cuatrimestre más húmedo (PCMH) y a la pendiente; además de modelar el comportamiento espacial de todas las variables propuestas como indicadores, a fin de determinar la tendencia de los procesos de degradación y cumplir con las características que deben tener los indicadores: deben evidenciar las tendencias de los fenómenos y explicar la relación causa-efecto.

Por todo lo anterior, se puede decir que ha sido muy importante determinar la relación entre los principales elementos de los paisajes del Valle de Zapotitlán, entre los que se considera la inclinación de la pendiente, la orientación de las laderas y la disección del relieve, asociadas al sustrato geológico; el tipo de suelo y sus propiedades texturales; la intensidad y cantidad, así como el régimen de precipitación y su variación espacial; lo cuál se refleja en la complejidad de las asociaciones vegetales presentes (Valiente-Banuet *et al.*, 2000), pues esto ha permitido establecer las bases para el conocimiento de los procesos de degradación de suelo que se están manifestando en la zona.

9.6. Índice de Erosión Potencial

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede decir que el valle de Zapotitlán está siendo afectado por diversos tipos y niveles de degradación de suelo, principalmente por efecto de la erosión y de degradación física. Sin embargo, aún se cuenta con importantes extensiones de áreas conservadas, en donde la degradación del suelo puede ser mínima, aunque el riesgo de degradarse sigue existiendo y no precisamente por el efecto que pueda provocar el uso y manejo del suelo en las diferentes unidades de paisaje, sino simplemente por los procesos naturales que están ocurriendo en el valle, como parte de su evolución. Sin embargo, como es claro, estos fenómenos se dan a muy largo plazo, incluso fuera de la escala de tiempo humana y es por ello la complejidad de su medición y evaluación.

Este mosaico de formas de uso y grados de conservación del paisaje, hacen de la región un modelo de estudio ideal para investigar el proceso de degradación en sus diferentes facetas y desde diversos puntos de vista.

10. Conclusiones y comentarios finales

- ✓ La zona es muy compleja en su estructuración física, ya que se identificaron 13 diferentes unidades de paisaje cuya fuente principal de diferenciación es el relieve y la litología.
- ✓ La variación edáfica responde básicamente a la complejidad litológica y topográfica de la zona, lo cuál se ve reflejado en la presencia de los diferentes tipos edáficos en cada unidad de paisaje y que al mismo tiempo se muestra en la complejidad de las asociaciones vegetales.
- ✓ Las propiedades edáficas que explican la variación de los paisajes son aquellas relacionadas con la textura, conducción hidráulica, densidad y contenidos de materia orgánica y sales; propiedades vinculadas directamente con los aportes de la precipitación y con la distribución espacial y temporal de esta última.
- ✓ La diferenciación de unidades de paisajes resulta ser muy adecuada cuando se trata de entender la interacción que se da entre todos los elementos (bióticos y abióticos) que conforman una zona, ya que brinda la posibilidad de integrarlos y comprender su estructura y funcionalidad.
- ✓ Se considera que, conocer los paisajes de una región y entenderlos más como una interacción compleja entre todos los factores que los conforman, que como "la suma de sus partes"; permitirá tomar decisiones fundamentadas en ese conocimiento que lleven a la elaboración de propuestas de manejo y conservación de los recursos naturales.
- ✓ La complejidad de la zona conlleva a una susceptibilidad importante a ser afectada principalmente por erosión laminar hídrica. Aún falta conocer y evaluar con más detalle la relación que se da entre los elementos de cada paisaje y los

procesos de degradación que ocurren en ellos. De forma preliminar, se puede decir que la parte norte y surponiente de la cuenca son las que pueden ser afectadas más gravemente por erosión hídrica; mientras que la zona oriente y surponiente por erosión eólica. Por ello se sugiere se consideren estos sitios como prioritarios para establecer estaciones de monitoreo en campo a fin de hacer una evaluación y medición real de la pérdida de suelo, para con ello poder sugerir la implementación de prácticas de manejo y control de la erosión en esas zonas; dado que se cuenta ya con información cuantitativa de la cantidad de suelo que puede perderse, así como la información básica descriptiva y cuantitativa de las variables físico-ambientales que pueden sustentar estas propuestas.

- ✓ Dado que la erosión es un proceso difícil de evaluar y que se da en tasas de tiempo muy largas para el hombre, pues su efecto se manifiesta en cientos y miles de años, es necesario el uso de modelos que muestren su posible comportamiento.
- ✓ También falta realizar el análisis de variabilidad temporal de la precipitación en el que se analice el comportamiento espacial de las lluvias torrenciales, con la finalidad de modelar su variación en el tiempo y conocer el efecto que están produciendo sobre los procesos degradativos, específicamente los erosivos.
- ✓ Asimismo es necesario realizar el análisis de las propiedades edáficas que serán consideradas como indicadores de calidad de suelo. Se sugiere modelar la tendencia de su comportamiento mediante la aplicación de modelos de predicción de su distribución espacial, para intentar determinar de manera más específica la tendencia de los procesos de degradación.

- ✓ Una vez que se obtengan las coberturas de la distribución espacial de las variables edáficas, complementar la evaluación del estado de la degradación de forma cuantitativa con los índices y métodos paramétricos propuestos por FAO (1980, 1996).
- ✓ Es muy importante considerar que se debe realizar un monitoreo de las propiedades edáficas sugeridas en este estudio como indicadores de degradación, que permita conocer su variabilidad espacial y temporal y que sea el elemento de refuerzo y verificación de lo que indiquen los modelos. Estos monitoreos deben incluir mediciones de la relación infiltración/escorrentía.
- ✓ De igual modo es necesario hacer mediciones de la tasa de escorrentía. Se sugiere implementar experimentos de campo en las siguientes unidades de paisaje: P2, en la zona de Metzontla. P4, en la zona Norte de la cuenca, en las laderas al sur de los Cerros Tarántula, Pajarito, Chacateca y La Colmena y en la zona Centro de la cuenca en la ladera del Cerro La Nopalera, en los lomeríos donde se encuentra el paraje Los Viveros y en la ladera Oeste del Cerro Grande. En la unidad P5 en la Sierra Miahuatepec y en la Sierra conformada por los Cerros Grande, Tierra Amarilla y Quemado. En la unidad P6 en la porción de la entrada Norte de la Cuenca, en la ladera del Cerro el Volcancillo y en la zona del Vivero Cutha; al Sur el Cerro El Castillo y al Oeste de Colonia San Martín, en las laderas de los Cerros Campanario y Ometepec. Finalmente, en el paisaje P12 en los Llanos San Martín, Tempesquistle y las laderas de los Cerros Mogote León y Tochenga.
- ✓ Se considera que se requiere mayor densidad de muestreo que enriquezca este tipo de análisis, especialmente en aquellas unidades de paisaje que fueron escasamente muestreadas, o no lo fueron: P1, P5, P6, P7, P8, P9 Y P11.

11. Referencias

- AG/UNEP.** 1987 Drylands dilemma: a solution to the problem. Executive report of the drylands project. AGPS. 24, 50: 311-327.
- Aharoni, B., Ward, D.** 1997. Un nuevo instrumento de predicción para identificar áreas de desertificación: Estudio de caso en Namibia. En: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Boletín de Control de la Desertificación. Boletín de Eventos Mundiales sobre Control de la Desertificación, Restauración de Tierras Degradadas y Reforestación, 3:12-17.
- Ahmed, N., Mansell, M.** 2000. Climate impacts of environmental degradation in Sudan. *GeoJournal*, 50: 311-327.
- Albaladejo, J., Martínez-Mena, M., Rolán, A., Castillo, V.** 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use and Management*, 14:1-5.
- Asce.** 1975. Sedimentation Engineering. Ed. V.A. Vanoni. American Society of Civil Engineering. Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54. 745 p.
- Arshad, M.A., Martin, S.** 2000. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88: 153–160.
- Barrera, C.C.** 2001. Descripción y regionalización fisiográfica del Valle de Zapotitlán, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México Campus Iztacala. México. 90 p.
- Basso, F., Boce, E., Dumontet, S., Ferrara, A., Pisante, M., Quaranta, G., Taberner, M.** 2000. Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: an example covering the Agri basin (Southern Italy). *Catena*, 40:19-35.
- Baumann, J.** 2000. La degradación de suelos – procesos, causas y su combate. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds.). 2000. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 145-154.
- Becerra, M.A.** 1999. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. 376 p.
- Betancourt, Y.P., Oropeza, M.J.L.** 2000. Erosión hídrica, escurrimiento superficial e infiltración en suelos con pastizales. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds.). 2000. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 175-180.
- Birkeland, P.W.** 1999. Soils and Geomorphology. Oxford University Press. 3a. ed. New York, USA. 430 p.
- Bouma, N.A., Imeson, A.C.** 2000. Investigation of relationships between measured field indicators and erosion processes on badland surfaces at Petrer, Spain. *Catena*, 40:147-171.
- Bouma, J.** 2002. Land quality indicators of sustainable land management across scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88: 129–136.
- Castillo, L.M.C.** 2004. Caracterización e impacto de la degradación de tierras y fragmentación de hábitats en el valle aluvial de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM. México. 79 p.
- Centeri, C., Barcsi, A., Pataki, R.** 2000. GIS applied in desertification and soil erosion assessment. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds.). 2000. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 145-154.
- Chavez, H.Y.; Carmona, G.** 1994. Efecto de los incendios forestales sobre la erosión, la escorrentía superficial y la infiltración en los suelos. Centro Regional de Investigación Pacífico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Folleto de Investigación No. 1. pp 29.
- Colegio de Postgraduados.** 1977. Manual de Conservación del suelo y agua. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. 559 p.

- CONAZA-SEDESOL.** 1994. La desertificación en México. En: FAO-CONAZA-SEDESOL. Plan de acción para combatir la desertificación en México. 73-102.
- Dávila, P.** 1997. Tehuacán-Cuicatlán Región de México. In: Davies, S.D. *et al.* (Eds.) Centres of plant Diversity. The World Wide Fund of Nature (WWF) and The World Conservation Union (IUCN). 139-143.
- Del Valle, H.F., Elissalde, N.O., Gagliardini, D.A., Milovich, J.** 1997. Cartografía y Evaluación de la Desertificación en las Regiones Áridas y Semiáridas de la Patagonia (Argentina). En: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Boletín de Control de la Desertificación. Boletín de Eventos Mundiales sobre Control de la Desertificación, Restauración de Tierras Degradadas y Reforestación, 3:6-11.
- Díaz, M.P.G.** 1991. Efectos dependiendo de la densidad de una cactácea columnar (*Neobuxbaumia tetetzo* Coulter) del Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Tesis de licenciatura. Fac. de Ciencias. UNAM. México D. F. pp. 103.
- Doran, J.W., Jones, A.J., Arshad, M.A., Gilley, J.E.** 1996. Determinants of soil quality and health. En: Arshad, M.A. (ed.) Soil quality and soil erosion. Rattan Lal, Boca Raton, FL, pp. 17-36.
- Doran, J.W.** 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice Agriculture, Ecosystems and Environment, 88: 119–127.
- Ebert, F.** 1992. Foro global ONG'S Río 92. Tratados de México.
- ESRI.** 1992. ArcView GIS, versión 3.2.
- Ezcurra, E., Montaña, C.** 1990. Los recursos naturales renovables en el norte árido de México. En: Leff, E. Medio ambiente y desarrollo en México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades. UNAM, México. 297-327.
- FAO.** 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italy. 161 p.
- FAO-UNESCO.** 1994. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Reference and Information Centre. Rome, Italy. 161 p.
- FAO.** 2000. 26ª Conferencia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Desarrollo sostenible en zonas montañosas. Mérida. México, 2000. LARC/00/INF/6.
- Figueroa, S.B., Orozco, A.A., Cortés, H.G., Pimentel, J., Osuna, E.S., Rodríguez, J.M., Morales, F.J.** 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de Posgraduados. México. 150 p.
- Friedel, M.H., Sparrow, A.D., Kinloch, J.E., Tongway, D.J.** 2003. Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 2: vegetation. Journal of Arid Environments, 55:327-348.
- Fuentes, A.L., López, R.R., Soto, M.C.** 1971. Metodología para el análisis geográfico de la zona de San Juan Raya (Municipio de Zapotitlán, Puebla). Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. No. 4. UNAM. México. pp. 323 y 368.
- García, E.** 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía UNAM, México. 246 p.
- García, M.M.G.** 2001. Mapeo y caracterización de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM. México. 78 p.
- García, O.F.** 1991. Influencia de la dinámica del paisaje en la distribución de las comunidades vegetales en la cuenca del río Zapotitlán, Puebla, México. Investigaciones Geográficas, 23:53-70.
- García, R.A., Muñoz, J.** 2002. El paisaje en el ámbito de la Geografía. Serie: Temas Selectos de Geografía de México. III. Métodos y técnicas para el estudio del territorio. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Gardner, R.A.M., Gerrard, A.J.** 2003. Runoff and soil erosion on cultivated rainfed terraces in the Middle Hills of Nepal. Applied Geography, 23:23-45.
- Gómez Tagle, R.A.** 1994. Tres niveles de erosión en la Cuenca de Pátzcuaro, Michoacán como base para acciones y obras de conservación. Centro Regional de Investigación Pacífico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Folleto Técnico No. 26. pp 28.
- Hernández, M.M.M.** 2001. Caracterización y evaluación del recurso suelo mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica en el Alto Mezquitil, Hidalgo. Tesis de Licenciatura en Biología. FES Iztacala UNAM. México.

- Hernández, A.I.** 2005. Evaluación del estado actual de la degradación de tierras de la cuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM. México. 71 p.
- Houlder, D., Hutchinson, M.F., Nix, H.A., McMahon, J.** 2000. ANUCLIM 5.1 User's Guide. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, 90 p.
- Hutchinson, M.F.** 1991. The application of thin-plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. In: Jasper, J.D. (ed.), BMRC Research Report Series, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia, pp. 104-113.
- Hutchinson, M.F.** 1995a. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International J. of Geographic Information Systems* 9: 385-403.
- Hutchinson, M.F.** 1995b. Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology* 73: 237-264.
- Hutchinson, M.F., Gessler, P.E.** 1994. Splines— more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62: 45-67.
- INEGI.** 1981. Carta Fisiográfica, Hoja México, escala 1:1,000,000. Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- INEGI.** 1984a. Carta: topográfica Atzumba, E14 B85, escala 1:50,000. Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- INEGI.** 1984b. Carta: topográfica Tehuacán, E14 B75, escala 1:50,000. Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- INEGI.** 1990. Guía para la interpretación de cartografía. *Uso del Suelo*. INEGI, México.
- INEGI.** 2003a. Modelo Digital de Elevación. Carta E14 B75, Tehuacán. Escala. 1:50,000. INEGI, México.
- INEGI.** 2003b. Modelo Digital de Elevación. Carta E14 B85, Atzumba. Escala. 1:50,000. INEGI, México.
- IMTA.** 1999. Extracto Rápido de Información Meteorológica v. 2.0. IMTA. México.
- IUGS.** 2001. Geoindicators: Tools for assessing rapid environmental changes. The U.S. Global Change Research Information office. www.gcrio.org/geo/title.html
- Kosmas, C., Danalatos, N.G., Gerontidis, St.** 2000. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena*, 40: 3-17.
- López-Bermudez, F.** 1990. Soil erosion by water on the desertification of a semi-arid Mediterranean fluvial basin: the Segura basin, Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 33:129-145.
- López, G.F., Muñoz, I.D., Hernández, M.M., Soler, A.A., Castillo, L.C., Hernández, A.I.** 2003. Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LVI-1:19-41.
- Mateo, R.J.M., Ortiz, M.** 2001. La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica. *Serie Varia, Nueva Época, Número 1*. Instituto de Geografía. UNAM.
- Mateo, R.J.M.** 2002. Geografía de los paisajes. Primera parte. Paisajes Naturales. Ministerio de Educación Superior. Universidad de la Habana, Cuba. 211 p.
- Mostafa, K., Osama, T., El-kholi, A., El-Hinnawi, E., Holdgate, M.W., McMichael, D.F., Jun, R.E.** 1992. *The World Environment 1972-1992: Two Decades of Challenge*. Chapman y Hall. pp. 884.
- Montaño, A.N.M., Monroy, A.** 2000. Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*, XXVI(154):26-37.
- Morín, V.C.A.** 2003. Estudio florístico de las terrazas aluviales del Río Salado en e Valle de Zapotitlán, Puebla, México. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM, FES Iztacala. México.
- Muñoz, I.D.** 1999. Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 106 p.
- Muñoz, I.D., Mendoza, A., López, F., Soler, A., Hernández, M.** 2000. Manual de prácticas de Edafología. Laboratorio de Edafología. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México.
- Muñoz, I.D., García, M.G., Rivas, R.A., Hernández, M.M., Soler, A.A.** 2001. Estudio de los Suelos de la Porción Norte del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla. 1º Simposio Interno de la UBIPRO. Marzo de 2001. FES Iztacala UNAM. Manuscrito no publicado.

- Muñoz, I.D., Soler, A.A, García, M.G.** 2002. Las Terrazas Aluviales de la Cuenca Baja de Zapotitlán, Puebla, desde una Perspectiva Geomorfo-edafológica. 2do. Simposio interno UBIPRO. FES Iztacala, UNAM
- Muñoz, I.D., López, G.F., Hernández, M.M.M., Soler, A.A.** 2004. Estudio Geomorfológico de la Cuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. Informe Anual 2004, Proyecto General de la Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO). FES Iztacala, UNAM. México.
- Muñoz, I.D., López, G.F., Soler, A.A., Hernández, M.M.M.** En Preparación. Monitoreo de propiedades físicas y químicas de un suelo aluvial, para la búsqueda de indicadores del estado de la conservación y/o degradación del suelo en un ambiente semiárido. (Manuscrito no publicado).
- Neri, G.D.M.** 2000. Caracterización Hidrología de la Subcuenca baja del Río Zapotitlán, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM. México. 78 p.
- Nieves, J., García, J. Cardoza, L.** 2001a. La degradación de los suelos en México. En: Proceedings of the international symposium on Land Degradation and Desertification, May 7-14, 2001. Mexico City – Patzcuaro, Michoacán, Mexico. p. 11.
- Nieves, J., García, J. Cardoza, L.** 2001b. Los procesos de degradación de suelos y contribución a la desertificación y aridificación en México. En Proceedings of the internacional symposium on Land Degradation and Desertification, May 7-14, 2001. Mexico City – Patzcuaro, Michoacán, Mexico. p. 41.
- Nortcliff, S.** 2002. Standarization of soil quality attributes. Agriculture, Ecosystems and Environment, 88:161-168.
- Oldeman, L.R.** (ed.). 1988. Gobal Assessment of Soil Degradation (GLASOD): Guidelines for general assesment of the status human-induced soil degradation. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 12 p.
- Oliveros, G.O.** 2000. Descripción estructural de las comunidades vegetales en las terrazas fluviales del río El Salado, en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM, FES Iztacala. México.
- Osorio, B.O.** 1996. Tipos de vegetación y diversidad en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México. Bol. Soc. Bot. México. 59: 35-38.
- Padilla, C., Albaladejo, J.** 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 173 p.
- Paredes, F.M.** 2001. Contribución al estudio etnobotánico de la flora útil de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. UNAM, FES Iztacala. México.
- Pimentel, E., Vela, C.G., Flores, R.D.** 2000. Estimación de la erosión en el parque nacional “El Tepeyac”, Distrito Federal. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds.). 2000. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 175-180.
- Pla-Sentis, I.** 1994. Soil Degradation and climate-induced risks of crop production in the tropics. Trans. ISSS 15th. Congr., Acapulco, México. 1:163-188.
- Priego-Santander, A.G., Bocco, G.** 2003. Curso de Ecología del Paisaje, Notas de Clase. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, 78 p.
- Priego-Santander, A.G.** 2004. Relación entre la heterogeneidad geoecológica y la biodiversidad en ecosistemas costeros tropicales. Tesis Doctoral. Instituto de Ecología, A.C. México. 117 p.
- Rivas, R.A.** 2003. Levantamiento edafológico semidetallado de la porción norte del Valle de Zapotitlán, Puebla. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM. México.
- Sacchi, G., De Pauli, C.** 2002. Evaluación de los cambios en las propiedades físicas y químicas de un Argiustol údico por procesos de degradación. Agrociencia, vol. VI, 2:37-46.
- Santillan, H.M.** 2003. Levantamiento edafológico semidetallaado de la porción suroeste del valle de Zapotitlán Salinas, Puebla. Tesis de licenciatura en Biología. FES Iztacala UNAM. México. 63 p.
- Saxton, K.E.** 2001. Soil Water Characteristics, v. 6.1.5. Agricultural Research Service, USDA and Department of Biological Systems Engineering. USA.
- SEDESOL-INE.** 1993. Ordenamiento Ecológico General del Territorio Nacional, Memoria Técnica y Metodológica. Secretaría de Desarrollo Social. México. 202 p.
- SEMARNAP.** 1996. Ordenamiento Ecológico. Términos de Referencia Generales.

- Secretaría de Gobernación.** 1988. Los Municipios de Puebla. Enciclopedia de los Municipios de México. pp. 1136 - 1139.
- Sparrow, A.D., Friedel, M.H., Tongway, D.J.** 2003. Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 3: implications at landscape scale. *Journal of Arid Environments*, 55:349-360.
- Stocking, M., Murnaghan, N.** 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. Traducción española y edición técnica: Padilla, C., Albaladejo, J. Ediciones Mundi-Prensa, España. 173 p.
- TRAGSA (Ed.).** 2003. La ingeniería en los procesos de desertificación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. pp.329-423.
- Tong, C., Wu, J., Yong, S., Yang, J., Yong, W.** 2004. A landscape-scale assessment of steppe degradation in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 59:133-149.
- Tongway, D.J., Sparrow, A.D., Friedel, M.H.** 2003. Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 1: soil and land resources. *Journal of Arid Environments*, 55:301-326.
- Torres, C.L., Noriega, A.G., Torres, B.E., Cortés, B.J.** 2002. Evaluación de la erosión potencial y actual en la microcuenca Betania-Ayotlán, Municipio de Ayotlán, Jalisco. En: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds.). 2000. La edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 200-204.
- Torres, B.E., Cortés, B.J., Mejía, S.E., Exebio, G.A., Santos, H.A.L., Delgadillo, P.M.E.** 2002. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Josefino", Jesús María, Jalisco. *Terra* 21: 117-126.
- UBIPRO.** Evaluación del deterioro ambiental, restauración, conservación ecológica y manejo sustentable de recursos naturales en la subcuenca baja de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Breve recapitulación del Proyecto General de la UBIPRO (Inédito).
- Valiente-Banuet, A.** 1991. Dinámica del establecimiento de cactáceas: patrones generales y consecuencias de los procesos de facilitación por plantas nodrizas en desiertos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Valiente-Banuet, A.** 1992. Bases Ecológicas del desarrollo sustentable en zonas áridas, el caso de bosques de cactáceas columnares en el Valle de Tehuacán y Baja California Sur, México.
- Valiente-Banuet, A., Casas, A., Alcántara, A., Dávila, P., Flores-Hernández, N., Arizmendi, M.C., Villaseñor, J.L., Ortega, R.J.** 2000. La vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Bol. Soc. Bot. México*, 67:24-74.
- van Lyden, G.W.J., Oldeman, L.R.** 1997. The assessment of the status of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD). International Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen.
- Velasco-Molina, A.** 1991. Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo. Limusa. México. 725 p.
- Wander, M.M., Drinkwater, L.E.** 2000. Fostering soil stewardship through soil quality assessment. *Applied Soil Ecology*, 15:61-73.
- Warren, A., Agnew, C.** 1988. An assessment of desertification and land degradation in arid and semi-arid areas. International Institute for Environment and Development paper no. 2. London: Ecology and Conservation Unit, University Collage.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C.** 2000. Terrain Analysis. Principles and applications. John Wiley & Sons Inc. Canada. 478 p.
- Zárate, Z.R.** 1994. Estado de la degradación de la tierra inducida por el hombre: un manual para su cartografía. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. México. 79 p.
- Zavala, H.J.A.** 1980. Estudios ecológicos en el Valle semiárido de Zapotitlán de las Salinas, Puebla; clasificación de la vegetación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Zavala, H.J.A.** 1982. Estudios Ecológicos en el Valle semiárido Zapotitlán, Puebla. *Biología* 7 (1) 88-117.

Anexo 1

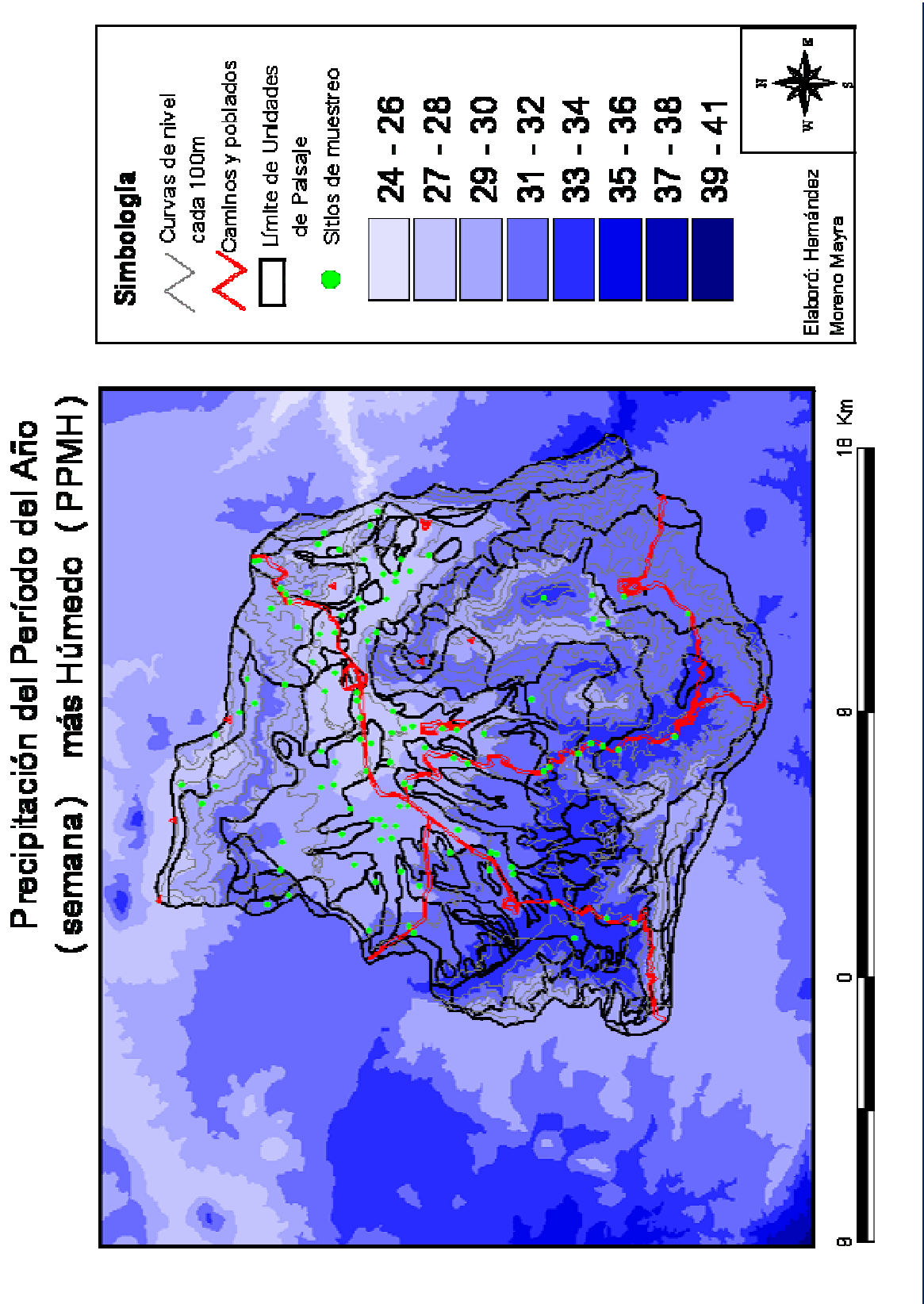


Figura 17. Cobertura de la Precipitación del Período del Año (semana) más Húmedo (PPMH).

Precipitación del Cuatrimestre más Húmedo del Año (PCMH)

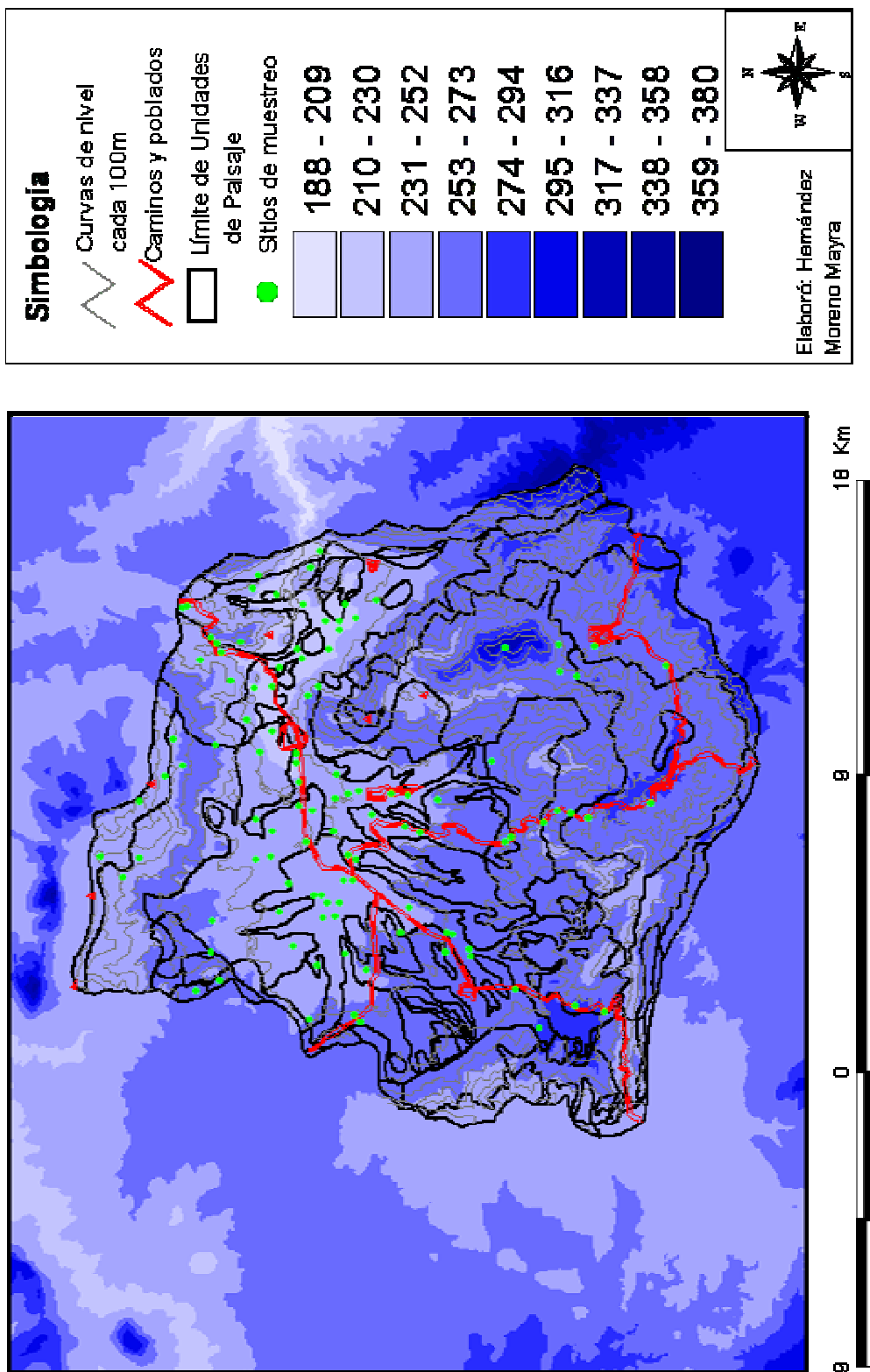


Figura 18. Cobertura de la Precipitación del Cuatrimestre más Húmedo del Año (PCMH).