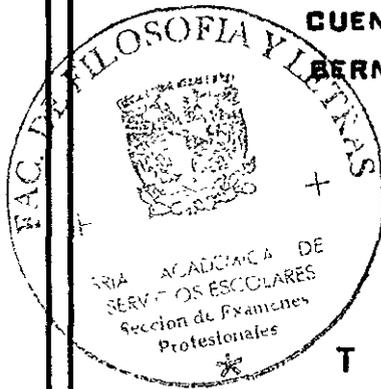




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA

"INVENTARIO DE EROSION ACELERADA DE LAS  
CUENCAS DE LOS RIOS CHAPINGO Y SAN  
BERNARDINO, EN LA VERTIENTE ORIENTAL  
DE LA CUENCA DE MEXICO"



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
LICENCIADO EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A

ARTURO GARRIDO PEREZ



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JOSE LUIS PALACIO PRIETO

CIUDAD UNIVERSITARIA

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

270637



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

*A mis Padres,*

*a ambos por permanecer siempre respaldando mi vida, y por ir acrecentando mi fe en mí mismo y en Dios,  
por brindarme siempre sus cálidos brazos como nadie más lo puede hacer,  
por verme crecer, reír, llorar y llegar hasta este día juntos, por que ésta, es una muestra de lo que juntos,  
con su amor y su apoyo, podemos lograr.*

*Con toda mi gratitud y un profundo cariño a ustedes, a quienes debo cada gramo de mí existir, con quienes  
me encuentro en deuda perpetua por todo esto que traigo dentro de mi corazón, y a quienes les debo lo más  
grande que cualquier ser humano, de cualquier época y lugar, soñó con poseer: la vida, el amor y la  
libertad.*

*GRACIAS.*

*A ti Adriana, por que has jugado el difícil papel de ser hermano y amigo a la vez,  
y a quien debo tanto por haberme enseñado gran parte del arduo aprendizaje del vivir.*

*A ti Ana Laura, por siempre estar cuando más se te necesita  
y por sonreírme cuando más escaseo de alegría.*

*A ti Eduardo, con quien he compartido toda clase de aventuras, peleas, juegos, experiencias, música y lo  
más importante,*

*el apoyo de un hermano como no existe otro en el mundo entero,  
gracias por tu compañía en los momentos llenos de inclemencia.*

*A ustedes tres, siempre Gracias.*

*“La que guarda la noche, la que anida en el mar,  
la que humilla al cretino, la que salva a los niños de morir por llorar  
la que mide las piedras, los palacios las cuevas, las gornas y galones  
y dormita en las puertas de todas las prisiones...*

*...vive en el cielo y el mar,  
sólo por ella yo. sólo por ella el mar...la Libertad”*

*Patxi Andión*

## A G R A D E C I M I E N T O S

Quiero agradecer la oportunidad de trabajar, de aprender, de crecer como geógrafo, de conocer, y sobre todo, quiero hacer manifiesta la gratitud por creer y confiar en mí, al Dr. José Luis Palacio Prieto, con quien he tenido la fortuna de convivir. Gracias por su amistad y por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo, y más aún, para mi desarrollo como profesional en este vertiginoso mundo de la Geografía.

Quiero también agradecer al Dr. Jorge López Blanco por sus enriquecedoras charlas, por su orientación, por las salidas a campo y por las consultas tan valiosas para poder encauzar mi trabajo por el "buen camino" y sobre todas las cosas, por su amistad tan valiosa. Al Dr. Mario A. Ortiz, y al Mtro. Lorenzo Vázquez por haber sido mis sinodales. Al Dr. Salvador Adame por sus charlas tan formativas y por sus comentarios y sugerencias para que este trabajo mejorara en gran medida.

También quiero agradecer a la Universidad Nacional, que, a través del Instituto de Geografía, cimentó el desarrollo de mi trabajo de tesis y mi formación como geógrafo. A todo el personal del Instituto, a la secretaria Académica la Dra. Teresa Sánchez, a la Mtra. Concepción Basilio Romero por el acceso y disponibilidad del material bibliográfico y cartográfico, al Lic. José Cabrera Reyes por las facilidades para las consultas y sus atenciones prestadas. Agradezco también al demás personal del Instituto, que de alguna manera u otra, colaboraron siempre de manera desinteresada para lograr saltar los imprevistos durante el trabajo.

Agradezco también a la Comisión Nacional del Agua, que por medio de la Gerencia del Lago de Texcoco, apoyaron económicamente esta tesis. Al Ingeniero Fernando Mercado, por su confianza y su cabal apoyo durante el trabajo de campo. Al Ing. (Mtro.) Benjamín Sánchez, por los recorridos de campo y por haberme introducido en este hermoso ámbito de las obras para la recuperación ambiental en la zona de estudio. Al Mtro. Julio Martínez y al Agr. Vicente Nieto, por las visitas a la zona.

Al Biól. Armando Peralta, por su confianza, alegría y su amistad en las horas de trabajo antes, durante y posteriores a los vuelos. Gracias por los secretos (de los alambres, los tornillos y los neoprenos) de esta hermosa tecnología que son las cámaras y los aerolevantamientos alternativos.

A todos mis trabajadores y trabajadoras en campo por hacer de dicha tarea, una experiencia, agradable, fructífera e inolvidable, a Oscar Jurado, Ricardo Díaz, Eduardo y Adriana Garrido y a Celia López

A ti, Celia (CELOMI), por tu presencia desinteresada a lo largo de mi trabajo, por tu sonrisa inigualable, por la fortaleza en los momentos difíciles y por todo eso que tu y yo sabemos.....¡mil gracias!

A Antonio (Toñete) y a Guadalupe, por el cubículo y el trabajo compartido durante estos tres años, ¡ha! y por supuesto, gracias por su amistad. A todos aquellos que han estado, de alguna manera o de otra, siempre conmigo, a mi tío, a mis abuelas y en memoria de mi abuelo, que seguramente está conmigo. Y a todas aquellas personas, que por temor a extenderme no escribo sus nombres, pero que sé que están conmigo siempre. Gracias (al Rock & Rios por existir).

Introducción.....	1
0.1 Antecedentes al presente trabajo.....	4
0.2 Objetivos.....	8
0.3 Método y Materiales.....	8
0.3.1 Método.....	8
0.3.2 Materiales.....	12
0.4 Características ambientales del área de estudio.....	13

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA, SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PERCEPCIÓN REMOTA (Construcción de un fotomosaico digital) y SIG.

1.1 Percepción Remota.....	16
1.2 Sistemas de percepción remota alternativos: La Videografía y la Fotografía Aérea Digital....	19
1.2.1 Antecedentes: la fotografía aérea convencional.....	19
1.2.2 La videografía.....	20
1.2.2.1 Aplicaciones de la videografía en el campo de la erosión acelerada.....	21
1.2.3 Fotografía aérea digital.....	22
1.2.3.1 Aplicaciones de la fotografía aérea digital en el campo de la erosión acelerada.....	23
1.2.4 Construcción de un fotomosaico digital (con imágenes fotográficas).....	24
1.2.4.1 Antecedentes sobre la construcción de fotomosaicos.....	25
1.2.4.2 Tipos de fotomosaicos.....	25
1.2.4.3 Pasos en la elaboración del fotomosaico digital.....	26
1.2.5 Procesamiento digital de las imágenes fotográficas.....	30
1.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	31
1.3.1 Definición de SIG.....	31
1.3.2 Elementos de un SIG.....	32
1.3.3 Módulos de un SIG, formatos, bases de datos. Utilización para estudios del medio ambiente.....	32

## CAPÍTULO II. LEVANTAMIENTO GEOMORFOLÓGICO

2.1	Introducción.....	36
2.2	Geomorfología, Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica.....	37
2.3	Resultados del levantamiento geomorfológico de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino.....	39
2.3.1	Ladera montañosa.....	39
2.3.2	Lomerío.....	40
2.3.3	Piedemonte.....	41
2.3.3.1	Piedemonte local.....	41
2.3.3.2	Piedemonte superior.....	42
2.3.3.3	Piedemonte inferior.....	43
2.3.4	Barrancos.....	45
2.3.5	Planicie aluvial.....	46

## CAPÍTULO III. LEVANTAMIENTO DEL USO DEL SUELO

3.1	Introducción.....	48
3.2	Perspectiva histórica del uso del suelo en la zona de estudio.....	48
3.3	Resultados del levantamiento de uso del suelo de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino.....	54

## CAPÍTULO IV. LEVANTAMIENTO DE EROSIÓN ACELERADA

4.1	Introducción.....	60
4.2	Erosión acelerada, degradación y recuperación ambiental.....	61
4.3	Definición y tipos de erosión.....	62
4.4	Escorrentía, procesos y formas.....	66
4.4.1	Escorrentía.....	66
4.4.2	El flujo y la infiltración.....	66
4.4.3	Encostramiento y sellamiento del suelo.....	67
4.4.4	Formas y procesos de erosión pluvial, como una categoría de la erosión acelerada (por agente generador).....	71

4.4.4.1 Erosión por salpicadura.....	71
4.4.4.2 Erosión en canales o canalillos.....	72
4.4.4.3 Erosión laminar.....	74
4.4.4.4 Erosión en cárcavas.....	75
4.4.4.5 Barrancos.....	80
4.4.4.6 Bad-lands.....	81
4.4.4.7 Sedimentación.....	81
4.5 Resultados del inventario de erosión acelerada de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino.....	82
4.5.1 Unidad de mapeo: Cárcavas.....	82
4.5.2 Unidad de mapeo: Bad-Lands.....	89
4.5.3 Unidad de mapeo: Áreas con erosión extrema.....	93
4.5.4 Otras áreas con erosión acelerada no cartografiadas.....	95

## CAPÍTULO V. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y AMBIENTAL DE LA EROSIÓN ACELERADA

5.1 Introducción.....	102
5.2 Análisis geomorfológico y de uso del suelo de la erosión acelerada.....	102
5.2.1 Unidades geomorfológicas y erosión acelerada.....	103
5.2.2 Piedemonte superior y las cárcavas.....	107
5.2.3 Piedemonte superior y los bad-lands.....	112
5.2.4 Piedemonte superior y las áreas con erosión extrema.....	114
5.2.5 Erosión acelerada y uso del suelo.....	117
5.3 Análisis ambiental de la erosión acelerada.....	119

## CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES

6.1 Resultados.....	131
6.2 Conclusiones.....	132
BIBLIOGRAFÍA.....	136

## Introducción

### *Definición del problema*

En términos generales, la degradación de la tierra puede definirse como la pérdida de la productividad, cualitativa o cuantitativa del suelo (López-Blanco y Palacio, 1995). La pérdida de la productividad del suelo puede ser total o parcial. Entre los procesos implicados en dicha degradación se encuentran la erosión hídrica y eólica, la salinización, la pérdida de nutrientes, el deterioro de la estructura del suelo y la contaminación.

La degradación de la tierra a través de la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial (Bocco, 1990), se estima que el 35% de la superficie del planeta está siendo afectada por algún grado de erosión. La pérdida histórica total de suelo ha sido estimada en 2 billones de hectáreas; por lo que el área que ocupan las tierras agrícolas actualmente asciende a 1.5 billones de hectáreas (Dudal, 1981). La pérdida de suelo anual ha sido calculada de entre 5 y 7 millones de hectáreas como resultado de la degradación de la tierra, lo que a equivale que tienen que incrementarse las áreas de cultivo a 200 millones de hectáreas para poder satisfacer las necesidades alimenticias de la población para el año 2000 (*idem*).

Para controlar los procesos erosivos se han implementado prácticas de conservación de suelos, aunque éstas han sido desarrolladas solamente en pequeñas superficies agrícolas del mundo. Estas medidas pueden ser aplicadas con efectividad dependiendo del entendimiento que se tenga de la relación compleja que existe entre la tierra, el uso del suelo, el contexto social, el económico y el político (Bennema y De Meester, 1981).

En cuanto a degradación se refiere, nuestro país se encuentra en un proceso evidente del deterioro de su medio ambiente. Dicho proceso se refleja en la existencia de grandes extensiones de tierras que han sido deforestadas, cultivadas y que actualmente, están abandonadas o sujetas a un nivel mínimo de explotación, ya que se han perdido, casi en su totalidad, las propiedades de los suelos para poder producir.

Esta problemática ambiental en que vivimos es también resultado de la sobreexplotación y el mal manejo de los recursos naturales. Este hecho se debe en gran medida, al amplio desconocimiento de los procesos naturales que se dan al interior de los paisajes y que trae consigo, la alteración de la estructura y funcionamiento de ríos, lagos, selvas y costas (Martínez, 1996).

Este proceso degradante es una de las consecuencias más costosas, en términos ecológicos, de la aplicación de modelos socioeconómicos y tecnológicos erróneos, y que se han reflejado en las actividades de ganadería extensiva, de intensificación agrícola y de agricultura itinerante de subsistencia principalmente. Estos acontecimientos explican en gran medida la transformación a gran escala de nuestros ecosistemas (Instituto Nacional de Ecología, 1996).

La erosión hídrica, la erosión eólica, la contaminación, la salinización, las inundaciones y los incendios, son algunos de los procesos que contribuyen a la degradación y al deterioro de los suelos en México (García-Oliva y Maass, 1990).

Hablando acerca de estos procesos, en México, la erosión es uno de los más importantes. Bocco (1990) cita los resultados obtenidos, con base en diferentes métodos, de varios inventarios de erosión; uno de ellos establece que el 86.0% de la superficie del territorio nacional, en 1987, estaba afectado por algún grado de erosión y de éstos, 47% está fuertemente erosionado (Geissert y Rossignol, 1987; *op. cit.* En Bocco, 1990). Otra fuente (CONABIO, 1996 *op. cit.*, en INE, 1996) dice que los procesos erosivos afectan a cerca del 80% del territorio nacional: de 195.8 millones de hectáreas del total del territorio nacional, 154 millones presentan diversos grados de erosión, y de éstas 30 millones están severamente erosionadas.

En síntesis, las causas principales de la existencia de los procesos erosivos en México son el resultado de la deforestación, el cambio del uso del suelo, el monocultivo, el sobrepastoreo y los sistemas “atomizados” de tenencia de la tierra (Adame, 1997) y que se manifiestan en el bienestar social de la población.

Dados los resultados del estado de la degradación de los suelos en nuestro país, algunas organizaciones gubernamentales han llevado a cabo obras de conservación y recuperación de suelo y agua, de 1946 a 1983, en 3.3 millones de hectáreas, representando tan solo un 2.1% del área total erosionada (Vázquez, 1987 *op. cit.*, en Adame, 1997). Cabe resaltar uno los trabajos que ha llevado a cabo, la que se conoce hoy como, la Gerencia del Lago de Texcoco (antes Comisión del Plan Texcoco) para manejar y recuperar la vertiente oriental del Ex-Lago, lo que ellos reconocen como “zona de influencia” del ex-lago de Texcoco. Dichas acciones han consistido en la rehabilitación de suelo y agua mediante la reforestación de 5 mil hectáreas; el terraceo y subsoleo de casi 5 mil hectáreas y la construcción de 1205 presas de control de azolves (Arias *et al.*, 1990).

Una vez realizadas dichas obras de recuperación, una de los objetivos prioritarios es evaluar, a través de estudios desde diferentes enfoques, la evolución y los resultados obtenidos con la implantación de estas obras. De acuerdo con esto, uno de los elementos básicos para cumplir dicho objetivo, son las fuentes y materiales de reciente adquisición que permitan generar información actualizada de las zonas bajo estudio. Estas fuentes y materiales deben brindar la posibilidad de elaborar cartografía específica a escalas detalladas. En este contexto, la videografía y la fotografía aérea digital se presentan como una alternativa apropiada, dentro del ámbito de la percepción remota alternativa, para la adquisición de materiales e información reciente de las áreas que así lo requieran, para la generación de cartografía específica (como uso del suelo, hidrología, inventarios de vegetación, etc.).

Uno de los procesos más importante de representar espacialmente, a través de la cartografía, son los procesos de erosión acelerada (Bergsma, 1982, 1996; Morgan, 1979, 1981; Verstappen, 1983; Vargas *et al.*, 1998). La generación de dichos mapas es muy importante, pues los procesos de erosión acelerada juegan un papel trascendental en la evolución de la degradación de las tierras, y por ende, de los paisajes en su totalidad.

Los estudios de erosión acelerada requieren, además de ser cartografiados, obtener una visión más profunda en cuanto a su comportamiento, origen y evolución, desde diferentes enfoques (dinámico, estático, etc.). Una de las alternativas de carácter integral para abordar los problemas de erosión acelerada en México, es el de la geomorfología aplicada. El enfoque de esta disciplina permite, a través de un levantamiento de carácter sintético, la interrelación de características geomorfológicas del terreno con otros factores ambientales, tales como el clima, el relieve (su morfología, geometría), la litología, la vegetación (Verstappen y Zuidam, 1991) y el uso del suelo (Bocco *et al.*, 1991) entre otros.

Aunque los problemas de erosión acelerada por la actividad antrópica están siendo analizados por un número creciente de instituciones, tales como Universidades (Chapingo, Guerrero) y Centros de Investigación (Instituto de Geografía, de Ecología de la UNAM) utilizando enfoques complementarios, es preciso fortalecer los fundamentos teórico-metodológicos para este tipo de estudios para México (Bocco, 1989a). Por lo tanto, este trabajo plantea un método de estudio de carácter integral, bajo el punto de vista geomorfológico, de la erosión acelerada y el uso del suelo a nivel

cuenca. Estudiar los paisajes desde el nivel de organización y funcionalidad de la cuenca, como entidad espacial individualizada, es un elemento básico para la gestión, manejo y evaluación de los recursos naturales de la vertiente oriental del ex-lago de Texcoco.

Se propone entonces un procedimiento de análisis geomorfológico que involucra el empleo de un sistema de información geográfica (en adelante SIG), sistemas de fotografía y vídeo aéreo digitales y fotografía aérea convencional e información cartográfica para abordar los problemas persistentes de erosión en la zona de estudio.

### 0.1 Antecedentes del presente trabajo

Es importante señalar que el presente trabajo tiene como antecedente directo un convenio entre el Instituto de Geografía de la UNAM (en adelante IGg), y la Comisión Nacional del Agua (en adelante CNA), dependiente de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). Dentro de este acuerdo se desarrolla este estudio.

El lago de Texcoco fue siempre el cuerpo de agua más importante de la Cuenca de México ya que jugó un papel fundamental dentro de su sistema y funcionamiento hidrológico. Como tal, al desecarse dio lugar a una serie de tensiones ambientales que desembocaron en un intenso deterioro del medio ambiente que consistió en procesos de desertificación que posteriormente repercutieron en daños a la salud de las poblaciones aledañas, las cuales se encuentran establecidas en las zonas periféricas a la ciudad de México e incluso a las establecidas dentro del Distrito Federal (Cruickshank, 1995). Con estos antecedentes, el gobierno determinó una estrategia para disminuir los daños a la población y de esta forma también efectuar acciones, en base a proyectos dirigidos para la recuperación y restauración ambiental de las áreas afectadas por algún grado de deterioro.

El Plan Texcoco, como se le denominó desde sus inicios en 1971, consistió básicamente en llevar a cabo tres grandes objetivos o etapas (Cruickshank, 1995):

1. Realizar obras de infraestructura hidráulica y de cobertura vegetal de los suelos descubiertos para la disminución de los efectos nocivos que amenazan a la salud de las poblaciones cercanas (tales como los problemas infecciosos de las vías respiratorias y enfermedades gastrointestinales. Estos suelos contenían gran parte de los desechos tóxicos disueltos en las aguas

residuales originadas en la ciudad de México y las zonas aledañas. De hecho, se fijó como objetivo la restauración ecológica del área del vaso del lago de Texcoco.

2. Continuar las obras de la primera etapa, reactivando ambientalmente el área que ahora ocupa la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco. Estas obras incluyen el tratamiento de aguas residuales provenientes de la ciudad de México, para irrigar las áreas reforestadas (en la zona federal) y para el abastecimiento de cuerpos de agua artificiales como el Lago Nabor Carrillo. La construcción de dichos cuerpos, incluyendo dicho lago, se realizó en esta etapa.

3. Llevar a cabo las obras de recuperación y conservación dentro de la vertiente oriental del Ex-Lago de Texcoco, la cual se compone por once cuencas de los ríos tributarios del extinto cuerpo de agua, y que actualmente drenan hacia el lago Nabor Carrillo.

De estas etapas se han cumplido dos objetivos generales:

1. La creación de lagos artificiales y,
2. El control de tolveneras generadas en el área del Ex-lago por medio de la siembra de pastos (Instituto de Investigaciones y Servicios Agrícolas Chapingo, 1990; en adelante, IISACH).

Los lagos artificiales construidos fueron rápidamente azolvados por los sedimentos transportados por los once ríos que drenan hacia ellos (Cruickshank, 1995).

La fuente de este problema ha sido el impacto ambiental en las cuencas que drenan los ríos. Este proceso de deterioro ambiental se originó por la eliminación del bosque natural, por la sobreexplotación de productos como celulosa, madera (como combustible) y otros; lo que influyó en la recarga de acuíferos (IISACH, 1990) y en la dinámica hidrológica superficial.

Otro factor que ha agudizado la problemática ambiental en la zona ha sido el uso intensivo de los suelos para fines agrícolas. Existen referencias temporales de por lo menos 2000 años de utilización y ocupación agrícola (Córdova y Parsons, 1997) que activaron procesos de degradación de suelos muy severos.

Por lo anterior, la CNA inició un programa de recuperación ambiental en el área de influencia del ex-lago de Texcoco con la finalidad de:

1. Controlar la erosión
2. Retener el agua para recarga de mantos acuíferos, y
3. La reforestación de áreas severamente erosionadas.

Para la CNA ha sido de gran importancia contar con trabajos que de alguna manera evalúen las obras llevadas a cabo dentro de sus programas y proyectos, con métodos eficientes de monitoreo, y que tengan que ver, en gran medida, con la sistematización de su información geográfica, de carácter espacial, como las unidades de mapeo temático, y aespacial, como datos hidrométricos por ejemplo. Por esta razón la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (dependiente de la CNA), a través de la Gerencia del Lago de Texcoco, acordó en 1996 un convenio de colaboración con el IGg que se titula “Estudio videográfico de las áreas degradadas en la cuenca oriental y la zona federal del ex-lago de Texcoco, edo. de México” (Anexo de términos de referencia, en adelante ATR, 1997).

El objetivo central de dicho estudio fue la adquisición de imágenes de video y de fotografía aérea digital para diferentes fines, entre ellos, la evaluación de los trabajos de conservación de suelo, agua y vegetación en la cuenca tributaria oriental y la zona federal del ex-lago de Texcoco.

Este proyecto forma parte del mayor esfuerzo de adquisición de fotografía aérea digital y de imágenes de vídeo realizado hasta el momento en todo el mundo, pues se cubrió un área de 220,000 ha (Palacio, *et al.*, 1997). Los productos que se obtuvieron del levantamiento sirven, entre otras aplicaciones, para realizar inventarios de recursos naturales, de áreas erosionadas, actualización del uso del suelo y cartografía urbana a escalas detalladas (trabajos que se realizan actualmente dentro del IGg).

Con base en las posibilidades y alcances del aero-levantamiento, se generó, dentro de una segunda etapa del convenio IGg-CNA, un Sistema de Información Geográfica que tiene como objetivo principal, incorporar y sistematizar la información ambiental existente acerca de las once cuencas de la vertiente tributaria, tales como climas, uso del suelo, topografía, etc., así como también, se va ir incorporando la información que se vaya generando en el futuro para que se cuente con los elementos necesarios para definir las acciones en diferentes plazos (corto, mediano y largo) (ATR, 1997).

El *software* de SIG considerado en este trabajo es ILWIS (The Integrated Land and Water Information System), el cual consiste en una serie de programas para el

procesamiento de cartografía, imágenes digitales e información tabular sobre computadora personal (PC).

Los objetivos principales de esta segunda etapa son, según ATR (1997), los siguientes:

#### General

-Diseñar y construir un SIG encaminado a la evaluación periódica de los recursos naturales para la toma de decisiones en la planeación y ejecución de obras necesarias para la recuperación de áreas degradadas en la cuenca tributaria oriental y zona federal del lago de Texcoco, con la finalidad de generar información precisa y confiable en apoyo a los programas de conservación de suelo y agua de la Gerencia del Lago de Texcoco.

#### Particulares

- Evaluar el proceso de recuperación ambiental de la cuenca y zona federal en el tiempo a través de fotografía aérea de 1971, 1989, 1995 e imágenes de video y fotografía digital de 1996-1997.
- Regionalizar el territorio en unidades homogéneas en función de sus características naturales y el estado ambiental en que se encuentran.
- Actualizar la cartografía existente con respecto a la infraestructura urbana y de comunicaciones.
- *Realizar un inventario de la erosión del suelo a nivel de sub-cuenca en la vertiente oriental.*
- Elaborar cartografía actual de los trabajos de conservación de suelo, agua y reforestación e inventario de obras en la Cuenca Tributaria Oriental.
- Realizar un inventario e identificación de las áreas degradadas de la Cuenca Tributaria Oriental y Zona Federal del Ex-Lago.

Dentro de los objetivos a alcanzar dentro del acuerdo IGg-CNA, queda clara la necesidad de contar con información reciente de las áreas degradadas que se tienen dentro de la cuenca tributaria oriental, objetivo en el cual se enmarca el presente trabajo. Este estudio implica la elaboración de cartografía geomorfológica, de degradación y del uso del suelo a escala detallada (1:20 000), de dos de las once subcuencas pertenecientes a la vertiente oriental del ex-lago de Texcoco y en donde queda implícita, la utilización de parte del material (propiedad de la CNA) que se generó en estudio videográfico.

## 0.2 Objetivos

### *Generales*

- ✦ Realizar un estudio de la erosión acelerada de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino, localizadas en el “área de influencia del Ex-lago de Texcoco”, en la vertiente oriental de la cuenca de México.
- ✦ Integrar los métodos de análisis geomorfológico, las herramientas y los productos derivados de la tecnología videográfica y de fotografía aérea digital y SIG, para abordar los estudios sobre erosión acelerada en la zona.
- ✦ Realizar una regionalización que permita subdividir el área de estudio en unidades de terreno para el ordenamiento y la planeación ambiental a escala detallada.
- ✦ Establecer una propuesta alterna, a los estudios realizados en la zona, para abordar los problemas de erosión acelerada en la vertiente oriental de la cuenca de México.

### *Particulares*

- ✦ Hacer un inventario de erosión acelerada del área de estudio en base al material del levantamiento de video y fotografía aérea digital a escala detallada 1:20 000.
- ✦ Realizar un mapa de uso del suelo en base a la interpretación de fotografías digitales.
- ✦ Elaborar un mapa de unidades geomorfológicas como base espacial del estudio.
- ✦ Hacer un análisis funcional de la erosión acelerada en el área desde el enfoque geomorfológico-aplicado.
- ✦ Emplear y evaluar las técnicas y herramientas de la fotografía aérea digital y SIG junto con los métodos geomorfológicos para los estudios de erosión.

## 0.3 Método y materiales

### 0.3.1 Método

*El método consta principalmente de dos etapas:*

- a) La construcción de la base de datos y b), la realización del estudio geomorfológico y ambiental de la erosión acelerada y cartografía correspondiente.

a) *La construcción de la base de datos*

La elaboración de la base de datos se realizó bajo el enfoque sintético del presente estudio, y consiste en la recopilación de información bibliográfica, y en la selección y digitización de la cartografía temática requerida: geología, uso del suelo (cobertura del terreno), y topografía, de las fechas y a las escalas disponibles.

La información cartográfica se procesó dentro del SIG (ILWIS) para escalarlas de acuerdo a la escala de las imágenes aéreas fotográficas; asimismo, estas fotografías digitales se procesaron para dos fines concretos. El primero para la construcción de un fotomosaico digital, el cual es la base cartográfica de este trabajo y cuya confección se retoma en el capítulo I de esta tesis. Y el segundo motivo por el cual se procesaron las fotografías fue para transformarlas en formato analógico (impresiones en color de alta densidad) para su posterior interpretación estereoscópica con fines de mapeo. Acerca de su procesamiento, también se habla en el capítulo I de este trabajo.

Es importante mencionar que el método utilizado para transferir todos los ejercicios de fotointerpretación de las fotografías impresas en color a formato digital, se utilizó el mosaico digital corregido geoméricamente, desplegado en pantalla como “fondo”, mediante el módulo de vectorización del SIG; se trazaron segmentos a lo largo de los rasgos comunes (de las unidades delimitadas en el formato analógico y los rasgos identificables en el fotomosaico desplegado). De esta manera se integró la información obtenida de los ejercicios de fotointerpretación geomorfológica para fines de mapeo.

El cubrimiento con video solo se utilizó como referencia general para el reconocimiento de toda la degradación por erosión en la vertiente oriental de la cuenca de México.

b) *La realización del estudio geomorfológico y ambiental de la erosión acelerada*, en términos generales, se apoya en el método propuesto por el ITC (International Institute For Aerospace Survey & Earth Sciences, Países Bajos) en el cual, se sintetiza la relación entre la expresión geomorfológica del terreno con las condiciones ambientales predominantes (Verstappen y Zuidam, 1991), y que, para el caso del área de estudio, fueron tomadas en cuenta únicamente, las condiciones y las variaciones del uso del suelo ya que estas tienen repercusiones directas con el suelo, la vegetación y el comportamiento hidrológico del agua. El clima no se tomó en cuenta ya que es una variable que no se ha modificado significativamente con el

tiempo, como lo ha hecho, por ejemplo, la cobertura del terreno por intervención del hombre.

El método se sintetiza en los siguientes apartados:

- Se realiza un mapa a escala 1:20 000, de la zona de estudio para asentar los resultados de los ejercicios de fotointerpretación, en este caso fue el fotomosaico digital.

- Se clasifica al paisaje en unidades geomorfológicas:

El levantamiento geomorfológico de la zona de estudio se realizó bajo el método propuesto por el sistema ITC (Verstappen y Zuidam, 1991) en el que se definen unidades geomorfológicas que proporcionen información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos naturales conexos. Bajo este marco se realizó un mapa geomorfológico (esc. 1: 20 000) en base a la fotointerpretación de fotografías aéreas convencionales de diversas escalas así como de imágenes fotográficas digitales; también se interpretó de manera visual un compuesto de falso color de una imagen de satélite SPOT de 1994. El mapeo se complementó con la información geológica existente para la zona, así como por recorridos de campo. Se utilizó la información topográfica para obtener los parámetros morfométricos de las unidades del terreno.

- Se realiza un mapa del uso del suelo actual (cobertura del terreno):

se realizó un mapa de uso del suelo (cobertura del terreno, esc. 1: 20 000) a través de la interpretación de imágenes fotográficas digitales (de 1997) con modelos estereoscópicos. El trabajo se complementó con la interpretación de otro tipo de productos, tanto de fotografías aéreas convencionales (1994) como de imágenes de satélite (SPOT, compuesto 432 de septiembre de 1994); se realizaron recorridos de campo para la verificación de las unidades (categorías) de mapeo.

Dentro del apartado del levantamiento del uso del suelo se integró una breve reseña histórica de la utilización de dicho recurso en la zona.

- Se elabora un mapa de erosión acelerada:

Según Bergsma (1982 y 1996) existen tres principales grupos o tipos de levantamientos de erosión:

El primero, presenta las formas de erosión, tanto las actuales, como *riles* y *surcos trenzados* como también las formas resultantes en donde se puede apreciar el efecto de la erosión pasada, como *cárcavas*, barrancos y tierra erodada por procesos de erosión *enterriles* y laminar. El segundo, Presenta una serie de grados de erosión acelerada a la que están sujetos los suelos actualmente y el tercero, presenta un levantamiento sobre riesgo o peligro de erosión de los suelos junto con los principales factores que lo generan.

De acuerdo a lo anterior, se realizó un levantamiento del primer tipo (*formas presentes de erosión acelerada*) con ciertas modificaciones debido a las características de erosión en la zona de estudio. El levantamiento se realizó mediante la fotointerpretación de las imágenes digitales impresas en color de escalas detalladas (de 1:14 000 a 1: 8000, de diciembre y enero de 1997, y en base a fotografías aéreas convencionales más recientes de la zona (1994) (dichos ejercicios fueron mapeados sobre el fotomosaico digital en pantalla dentro del SIG). Al mapa resultante se le denominó *inventario de erosión acelerada*.

No todas las formas y procesos de erosión acelerada fueron cartografiados debido a las características del mapa sintético final, sin embargo se hicieron observaciones en campo de las zonas donde se presentan procesos de erosión *enterriles* y por *riles*.

Las unidades mapeadas se realizaron bajo los siguientes criterios:

Se cartografiaron las *cárcavas* como indicador de erosión acelerada fuerte y que incide tanto en áreas agrícolas como en áreas de recuperación de suelos.

También se cartografiaron aquellas zonas en donde existen formas resultantes de procesos de erosión acelerada muy severos y en donde actualmente inciden procesos de erosión lineal y en algunos casos superficial, como lavados *enterriles* y laminares; estas zonas son los *bad-lands*.

La tercera unidad que se incluyó en el mapa de erosión acelerada corresponde a aquellas áreas en donde actualmente se presentan (con menor intensidad) la combinación de algunos proceso de erosión acelerada. Estas áreas son zonas en donde existen trabajos de reforestación con diversas técnicas (terraceo y zanjas trinchera principalmente) y que no se han podido estabilizar debido al intenso grado de erosión que alcanzaron antes de ser intervenidas. A estas áreas se les llamó *áreas con erosión extrema*. Todas las unidades fueron verificadas en campo.

- Se lleva a cabo el análisis ambiental del comportamiento geomorfológico de la erosión acelerada de la zona, mediante el uso del SIG, manejo de cartografía automatizada y técnicas geomorfológicas, como el análisis de perfiles geomorfológicos. En base al análisis ambiental, se obtiene un mapa final a escala 1:20 000 en donde se sintetizan los tres principales elementos manejados en este trabajo: geomorfología, uso del suelo y erosión acelerada, con su leyenda correspondiente.

### 0.3.2 *Materiales*

Se utilizaron los archivos de las fotografías aéreas digitales de diciembre de 1996 y enero de 1997 tal y como los obtiene la cámara digital (originales). Éstos, se procesaron e imprimieron en alta densidad obteniéndose escalas de 1:14 000 a 1:8000, formando secuencia estereoscópica, con un traslape en general del 30% lateral y un 80% en la porción superior e inferior. Estas impresiones contienen escala gráfica, fecha de vuelo y resolución aproximada en el centro de la imagen. Los archivos también se utilizaron para su proceso de manera individual, para la construcción del fotomosaico digital (mapa base).

El levantamiento fotográfico se realizó con una cámara digital DCS-420 con un sensor CCD con resolución de 1524x1012 pixeles. y una interfaz de conversión a formato digital Kodak; un lente supergran angular de 13.9 mm marca Nikon. Las imágenes obtenidas cuentan con una resolución espacial de 3 m en promedio y. con una resolución espectral dentro del rango visible: 0.4-0.7  $\mu\text{m}$ , en tres bandas espectrales (rojo, verde y azul) de 24 bits cada una (3 bandas de 8 bits). El levantamiento videográfico se llevó a cabo con una cámara JVC 100X de  $f=4.5-45$  mm. con un sensor CCD de 900 líneas por 800 renglones, resultando imágenes semi-verticales en color de 6 m de resolución aproximadamente.

Se utilizó una imagen de satélite SPOT de septiembre de 1994. Se utilizaron fotografías aéreas convencionales de los años 1989 (esc. 1: 21 500) y 1994 (esc. 1: 19 500) editadas por el INEGI y el Estado de México respectivamente. Se usaron las cartas: topográfica clave E14B31, que corresponde a la hoja Chalco editada por el INEGI (1985); la carta geológico-tectónica de la Cuenca de México editada por el Instituto de Geología de la UNAM (1988).

#### 0.4 Características ambientales del área de estudio

Las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino se localizan entre las coordenadas 19°25'15" y 19°29'32" latitud norte y entre los 98°45'40" y 98°54'10" longitud oeste. La cuenca del río Cahpingo drena una superficie de 21.4 km<sup>2</sup>. Se ubica entre las cuencas de los ríos Texcoco al norte y San Bernardino al sur. La cuenca de éste último río tiene una extensión de 17 km<sup>2</sup>. Ambas cuencas se encuentran dentro del Sistema Volcánico Transversal, al norte de la Sierra Nevada, en la porción oriental de la cuenca de México, a unos 30 km del Distrito Federal (ver mapa de localización en la Figura 0.1). La máxima elevación es de 3600 msnm y la mínima de 2245 msnm.

En lo que corresponde a los materiales litológicos y a la geología que componen a cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino, se cuenta con la presencia de depósitos estratificados de cenizas volcánicas, algunas de las cuales, se encuentran endurecidas (cementadas). Estas capas se conocen localmente como "tepetates" y existen diferentes clases en base a su color. Tal es el caso de los tepetates rojos, grises, blancos y amarillos, los cuales son los más comunes dentro de la zona.

Los tepetates son costras cementadas derivadas de cenizas volcánicas (Nimlos, 1987) y se encuentran en forma de capas endurecidas suprayacentes de suelos generalmente delgados (Gutiérrez y Ortiz, 1992). Los tres cementos más comunes son : carbonatos, sesquióxidos y el sílice. Las costras silicocementadas probablemente sean los tipos de endurecimiento mas común en América Latina (Nimlos, 1987). Dichos depósitos se encuentran sobrepuestos en, por lo menos, tres eventos laháricos del cuaternario (Mooser *et. al.*, 1996). La palabra tepetate se deriva del náhuatl *Tetl*: piedra y *petatl*: lecho (Gutiérrez y Ortiz, 1992).

Las formaciones duras y macizas (tepetates), dentro de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, se ubican en los piedemontes, tanto aflorando en la superficie como cubiertos por otros depósitos a diferentes profundidades. Estas formaciones consisten en una sucesión de depósitos in situ y a veces retransportados (Peña y Zebrowski, 1992). La parte alta de las cuencas se compone por rocas andesíticas e ignimbríticas (De Cserna *et. al.* 1988, Mooser, *et. al.*, 1996).

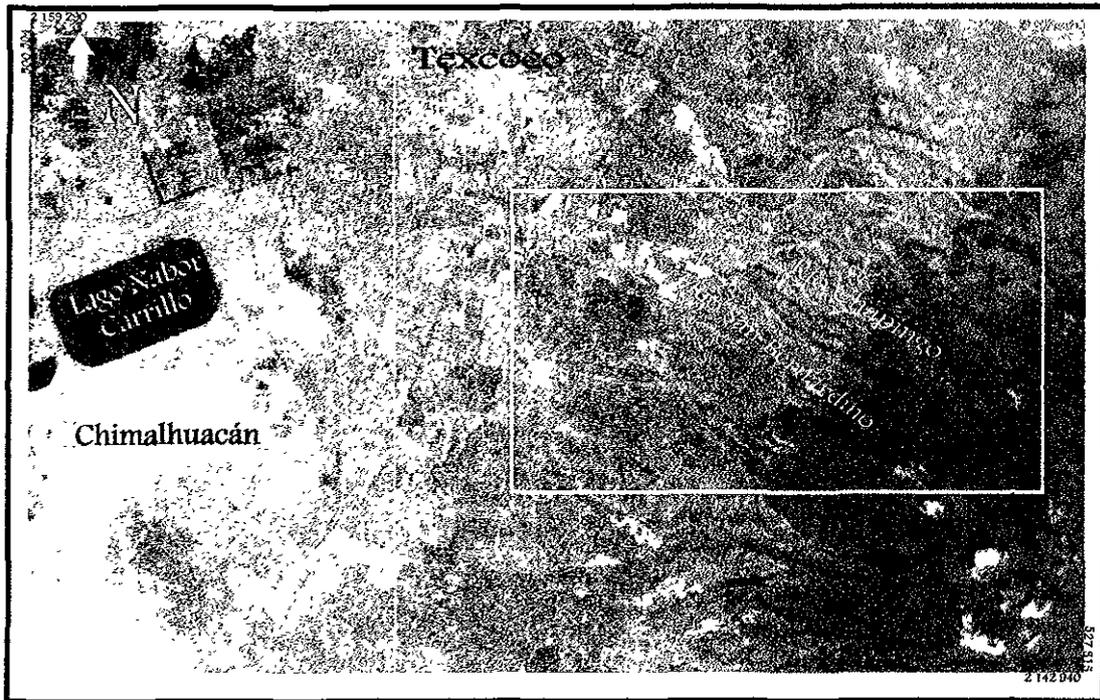


Figura 0.1. Localización de la zona de estudio (compuesto 432 de imagen SPOT, sep.1994. Escala aproximada 1: 197,300).

El clima es templado y marcadamente estacional, y varía de acuerdo a los rangos altitudinales; de acuerdo con García (1968) es, templado subhúmedo con lluvias en verano y fresco y varía de la siguiente forma: C(w2)(w)bi en las partes de menos de 2400 msnm, C(w2)(w)b1 entre los 2400 y los 2800 msnm, y finalmente Cw2 (w) b1 en las partes más altas que la cota de 2800 msnm.

La precipitación varía de los 600 mm hasta los 900 mm. La temperatura media anual promedio varía entre los 6° y 16° C.

En las partes bajas de la zona de estudio, la cobertura vegetal corresponde a las áreas agrícolas de temporal como maíz, frijol, cebada, trigo, haba. En las partes medias, se tiene vegetación herbácea, como gramíneas, leguminosas, y especies de cactáceas y liliáceas. En la parte alta se tienen pastizales naturales (zacatonales), y vegetación forestal de *Pinus Hartweggi*, *Juniperus depeana*, *Abies religiosa* y bosque de *Quercus sp* (Llerena y Sánchez, 1992).

La zona de estudio ha presentado históricamente problemas de erosión, y de hecho existe información que habla de la presencia dichos problemas desde épocas prehispánicas (Córdova y Parsons, 1997). La iniciación de los procesos de erosión en el área de estudio se debe a la deforestación y el cambio de uso del suelo, lo que ha

causado el transporte de sedimentos, la pérdida de áreas agrícolas y la disminución del manto acuífero (Llerena y Sánchez, 1992).

Esta zona fue considerada por el gobierno federal, en 1973, como área prioritaria de trabajos de recuperación ambiental, por lo que se instituyó el Proyecto Lago de Texcoco, en el que se combinarían esfuerzos de diferente naturaleza para revertir los efectos de la degradación (Cruickshank, 1995).

Por lo tanto, las cuencas de los ríos de la zona de estudio fueron integradas al programa de recuperación ambiental del Proyecto Lago de Texcoco, que junto con las cuencas de otros nueve ríos conforman lo que actualmente se denomina “área de influencia del Proyecto Lago de Texcoco”, regida por la dirección del Lago de Texcoco, dependiente de la CNA y SEMARNAP.

En el área de estudio se han llevado a cabo tareas de reforestación, la mayor parte de éstas, se han realizado sobre terrenos que se han preparados por medio de diferentes obras y técnicas de nivelación del terreno; un ejemplo de estas técnicas son, la suavización de taludes, la construcción de zanjas trinchera y de sistema *gradoni*. Una de las obras de mayor importancia han sido la construcción de terrazas (de diferentes modalidades) hechas con maquinaria pesada para la conservación del suelo y agua. El subsoleo del terreno ha sido también una práctica muy importante para la conservación del suelo y agua (IISACH, 1990). Como obras complementarias se han construido presas para la retención de azolves a lo largo de los cauces de los dos ríos que integran la zona de estudio. Estas obras son en sí, las más importantes para el control de azolves.

---

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA, SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PERCEPCIÓN REMOTA (CONSTRUCCIÓN DE UN FOTOMOSAICO DIGITAL) Y SIG

El presente estudio implica el uso de herramientas y técnicas de percepción remota y SIG, así como técnicas de percepción remota alternativa. A continuación se presentan definiciones y conceptos, así como antecedentes breves de los usos de estas herramientas para los estudios de erosión acelerada. También se describe el método de elaboración de un producto concreto derivado de un sistema de fotografía aérea digital: un fotomosaico, que es el mapa base del estudio de erosión acelerada.

### 1.1 Percepción remota

La percepción remota es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, un área o un fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos a cierta distancia sin tener contacto con el objeto, el área o el fenómeno bajo estudio (Lillesand y Kiefer, 1994). Los datos son colectados a través de sensores remotos (*Idem*, 1979).

Un sensor es el dispositivo que se encarga de registrar la energía electromagnética reflejada de los objetos a los que se expone (Robinson, *et al.*, 1995).

Los principios de la percepción remota se basan en las relaciones que guardan los objetos y su energía que reflejan o emiten; esta energía es obtenida principalmente por absorción de los rayos solares y ésta a su vez, es emitida externamente en todas direcciones.

Por otra parte, la detección de la energía electromagnética puede ser llevada a cabo por medios fotográficos o electrónicos. Dentro de los medios fotográficos se utilizan algunos reactivos químicos sobre la superficie de una película de alta fotosensibilidad (sensor) para detectar las variaciones energéticas del o los objetos a los que se expone. Los sistemas de fotografía ofrecen muchas ventajas, tales como su costo, que es relativamente bajo. Además, por ser un sistema de fotografía simple, ofrece grandes ventajas de resolución espacial, pudiendo llegar a registrar objetos milimétricos del terreno.

Con respecto a los medios de sensores electrónicos generan una señal eléctrica que equivale a las variaciones energéticas de los objetos registrados; un ejemplo de este tipo de sensor son las cámaras de vídeo digitales.

Los sensores electrónicos son más complejos y más costosos que los fotográficos, sin embargo, ofrecen muchas ventajas sobre los sensores fotográficos, tales como su capacidad espectral, sus propiedades de resolución pueden ser calibradas más fácilmente y además transmiten su información de manera digital (Lillesand y Kiefer, 1994).

Dentro del ámbito de los sensores remotos, al hablar de una fotografía, se refiere únicamente a las imágenes que han sido registradas o detectadas por medio de una película. Al referirse a una imagen como tal, se habla de una representación pictórica de una imagen digital la cual contiene información en forma de una matriz de datos y/o valores numéricos.

Algunas de las características más importantes de los sistemas de sensores remotos, según Lillesand y Kiefer (1994), son:

1. La fuente de energía: los niveles de energía solar varían con respecto al tiempo y a la localización geográfica, ya que los diferentes materiales de la superficie de la Tierra emiten la energía en múltiples grados de eficiencia.
2. La atmósfera: generalmente introduce problemas por la variación de la energía que ésta provoca. En la mayoría de los casos, la atmósfera modifica la intensidad y la distribución de la energía recibida por el sensor. La importancia del efecto de la atmósfera en la percepción de la energía en los sensores puede ser compensada por algún tipo de corrección digital y que es particularmente importante en las áreas que son continuamente registradas o monitoreadas. Estas operaciones se basan en procedimientos matemáticos entre los valores de las diferentes bandas componentes de las imágenes. En el caso de los medios ópticos, se puede implementar algún tipo de filtro de luz en los lentes para evitar que se registre información no necesaria.
3. El sensor: Los sensores remotos han sido fabricados para obtener o registrar información de tan solo una parte del espectro electromagnético, es decir, los sensores tienen un límite de sensibilidad espectral. Esto implica que objetos diferentes puedan tener gran similitud en el momento de las interpretaciones visuales y manipulaciones digitales.

Esta propiedad de percepción de ciertas longitudes de onda se le conoce como resolución espectral. La capacidad de registro de los objetos de cierto tamaño, que puede distinguir el sensor, se le conoce como resolución espacial.

4. Los múltiples usuarios de la información: los datos generados por los sensores remotos se transforman en información útil siempre y cuando existan los usuarios que las utilicen entendiendo su origen, conozcan acerca de su interpretación y sepan que es lo que más pueden aprovechar del contenido de la información.

De los sistemas de sensores remotos, el que ha sido más utilizado es la fotografía aérea. La interpretación de estas imágenes, tanto en fotomosaicos como en modelos tridimensionales (estereoscópicos), se han utilizado para múltiples fines desde principios de siglo. En los últimos años se han generado nuevos sistemas de percepción remota alternativos, que han surgido por múltiples causas y que tienen que ver con:

A. Las necesidades particulares de los usuarios de la adquisición de información de manera urgente y reciente para ser aplicada para trabajos y estudios (aplicaciones) concretos y,

B. Principalmente por las desventajas que tienen los sistemas convencionales que operan actualmente, tales como la resolución espectral y espacial de los sensores. Además, algunos sistemas actuales no poseen una resolución temporal que pueda ser controlada de acuerdo a las necesidades de múltiples usuarios.

Estos sistemas alternativos (no convencionales) son los de video aéreo o videografía y los sistemas de cámaras digitales (fotografía aérea digital) a los cuales se referirá más adelante con mayor detalle.

Estas técnicas nuevas de percepción remota han surgido para satisfacer las necesidades también recientes de los usuarios, y aunque actualmente siguen desarrollándose para obtener especificaciones (fotogramétricas) que puedan ser aplicables de manera general, se han transformado en una herramienta muy importante para la investigación y el estudio de la superficie terrestre: para la ingeniería, el monitoreo ambiental, la exploración de la tierra (Lillesand y Kiefer, 1994), y todo lo relacionado con el manejo y el monitoreo de recursos naturales y desastres (Palacio *et al.*, 1997). La importancia que tiene el uso de alguno o de varios de los sistemas de percepción remota juega un papel esencial en el estudio del planeta a través del mapeo y monitoreo de la superficie terrestre (geósfera), la biósfera, la hidrósfera y la atmósfera. Estos proveen de información a los científicos para modelar y predecir los efectos en el manejo de recursos naturales (Verstappen, 1992) así como

de estudios derivados de éstos, tal es el caso de la recuperación o restauración ambiental por ejemplo.

El presente estudio utiliza algunas técnicas de percepción remota, tanto convencionales (fotografía aérea en blanco y negro) como sistemas de percepción remota alternativos. De éstos se utilizan imágenes obtenidas con una cámara de fotografía digital a color, en las cuales se basa gran parte del presente trabajo. Enseguida se abordan con más detenimiento, algunos aspectos básicos acerca de estos sistemas alternos de percepción remota.

## 1.2 Sistemas de percepción remota alternativos: la Videografía y Fotografía Aérea Digital

### 1.2.1 Antecedentes: la fotografía aérea convencional

La fotografía aérea fue el primer antecedente de la percepción remota aérea y es uno de los primeros sensores remotos usados para inventarios y mapeos sistemáticos de las formas de la Tierra. Varios tipos de cámaras, y diversos tipos de películas fotográficas son posibles de utilizar actualmente (Robinson *et al.*, 1995).

La fotografía aérea proporciona una visión de áreas muy extensa, que el ojo humano no podría percibir. Con ésta, el observador puede tener todo lo posiblemente observable sobre la superficie terrestre en un momento determinado, ya que son registrados y “detenidos” todos los procesos dinámicos que actúan sobre los paisajes (Lillesand y Kiefer, 1994). Las películas fotográficas pueden “ver” y registrar el doble del rango espectral que el ojo humano (0.3 a 0.9  $\mu\text{m}$  contra 0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ). Con la cámara, la película y parámetros de vuelo apropiados se puede llegar a registrar detalles que a simple vista el ojo humano no podría discriminar (Lillesand y Kiefer, 1979).

La fotografía aérea sigue siendo el medio más común y versátil de los sistemas de percepción remota por las características arriba señaladas, además de permitir estudiar a los múltiples especialistas en ciencias de la Tierra y todo lo relacionado con ellas. De hecho, algunos de los principios de la fotografía aérea, representan en gran parte, los fundamentos para los levantamientos con sistemas de percepción remota alternativos emergentes.

### 1.2.2 La Videografía

El desarrollo de sistemas de vídeo y sus aplicaciones en México ha tomado gran importancia, principalmente en el ámbito académico (Palacio *et al.*, 1997). Uno de los principales objetivos de la utilización de los equipos alternativos de percepción remota son las ventajas sobre otros sistemas. Una de ellas es la posibilidad obtener los materiales (resultados) en el tiempo casi real del levantamiento a costos relativamente más bajos que otros (ver Palacio, 1994, Palacio *et al.*, 1997, López-Blanco, 1995, 1997, Everitt y Escobar, 1995, Navarrete, 1999). Otra de las ventajas de la utilización de estos sistemas es la potencialidad de procesar inmediatamente de manera digital la señal electrónica de las cámaras de video y de fotografía digital (Everitt y Escobar, 1995). El IGg ha desarrollado múltiples estudios utilizando esta tecnología alternativa, generando algunas líneas de aplicación dentro del entorno académico. Uno de los principales objetivos de dicha institución es también el proporcionar y difundir a otros ámbitos, no académicos, herramientas y productos alternativos para coadyuvar a la realización de los objetivos de las instituciones que lo requieran. Puede hablarse del uso de esta tecnología para el monitoreo de recursos naturales (CNA en 1996), su aplicación para la delimitación de Zona Federal Costera (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, en adelante, SEMARNAP, en 1998), también se está utilizando para realizar los Planes de ordenamiento Ecológico para el Distrito Federal (CORENA, 1997) entre los más importantes.

De esta manera se pretende que la utilización de esta tecnología sirva como alternativa para la evaluación y planeación territorial en general, ya que no se cuenta con un banco de información actualizado, del territorio por lo que los materiales que se generen de los levantamientos con equipos de video y fotografía digitales, representan información muy valiosa en términos de cobertura, de resolución y de tiempo-costo.

La videografía o videoteledetección, refiere Palacio (1996), es la tecnología que tiene como objetivo principal la adquisición de imágenes de video desde alguna plataforma ubicada ventajosamente sobre el terreno para su posterior procesamiento. Los sistemas de video pueden clasificarse según su formato resultante, según el número de cámaras utilizadas y de acuerdo a su registro espectral.

En los últimos años, se han desarrollado sistemas de video digitales para incrementar la calidad en las imágenes, así como también se han generado sistemas videográficos

multiespectrales. Esto quiere decir que el campo de aplicación de estos sistemas se va a incrementar en un futuro cercano (Everitt y Escobar, 1995) además de ser ya una herramienta muy poderosa para el estudio de los recursos naturales en general.

#### 1.2.2.1 Aplicaciones de la videografía en el campo de la erosión acelerada

Los estudios de videoteledetección, como también se le conoce a la videografía, han sido aplicados para la evaluación de recursos naturales y para cuestiones agrícolas principalmente. Hart y colaboradores (1988) utilizaron fotografías infrarrojas e imágenes de video infrarrojas, que obtuvieron en un sistema simultáneo de videoteledetección, para compararlas entre sí con la finalidad de identificar y evaluar problemas de productividad en una zona agrícola de Texas, E.U. Se compararon tanto la resolución como la respuesta en el tono del color de dichas imágenes para identificar algunos problemas en la vegetación en cinco zonas agrícolas.

Dentro del estudio de los suelos, los sistemas de videoteledetección se han utilizado para elaborar unidades de mapeo (Gerberman *et al.*, 1988) mediante sistemas a color y multiespectrales en blanco y negro para poder homogeneizar áreas en base a la respuesta espectral de las múltiples imágenes obtenidas. Esto se llevó a cabo comparándolas cualitativamente para poder clasificarlas de acuerdo a sus diferentes contenidos de materia orgánica y minerales de acuerdo a su clasificación espectral.

Para el estudio de los procesos de erosión acelerada del suelo, específicamente, se han utilizado sistemas de videoteledetección: Palacio y López-Blanco (1994) utilizaron 5 juegos de imágenes de video, durante 18 meses, en un área representativa de la dinámica erosiva local, ubicada la parte del centro de México, dentro de la provincia del Cinturón Volcánico Mexicano (Municipio de Huasca en el estado de Hidalgo). La comparación en este periodo fue con la finalidad de registrar el crecimiento de las cabeceras de un sistema de cárcavas en dicho tiempo. Las imágenes fueron corregidas geométricamente para poder medir los cambios en las cárcavas seleccionadas dentro de un SIG. La finalidad del estudio fue presentar a la videografía como una herramienta alternativa de percepción remota para estudios que requieren gran detalle espacial así como su registro periódico a bajos costos.

López-Blanco y Palacio (1995), utilizaron imágenes digitales de video para cuantificar el avance de las superficies y longitudes máximas de pérdidas de suelo por erosión acelerada en las cabeceras de las cárcavas. Las imágenes se obtuvieron en 5 fechas

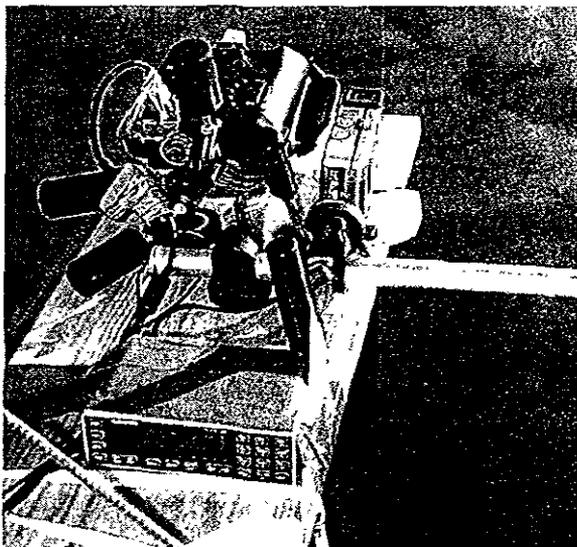
distintas en las épocas: previa, durante y posterior de lluvias, con el fin de comparar información multitemporal y así establecer el crecimiento de los rasgos de erosión con su comportamiento temporal. Además de la resolución temporal controlada de las imágenes, la resolución espacial lograda por las características del sistema de video utilizado fue de 1 a 5 cm por píxel.

### 1.2.3 Fotografía aérea digital

La fotografía aérea digital consiste en el registro de imágenes (o tomas) del terreno a través de un *chip* de silicio bidimensional de un dispositivo electrónico que funciona como sensor conocido como CCD (por sus siglas en inglés de *charge-coupled devices*) que funciona como sensor digital. El CCD registra los elementos del terreno transformándolos en una imagen de formato raster, lo que implica que, cada píxel estará dotado de información digital, similar a una imagen proveniente de un sensor satelital. Un *CCD* es un *microchip* electrónico de silicón de estado sólido que detecta la energía electromagnética. Cuando esta energía llega a la superficie del sensor, se producen cargas de electrones, las cuales son proporcionales en magnitud a la luminosidad de la escena registrada. El CCD fue diseñado para su uso como sensor remoto para aumentar la capacidad de diferenciar substancialmente un amplio rango espectral en comparación con el sensor de la fotografía aérea convencional (Lillesand y Kiefer, 1994). Las señales del CCD son enviadas a manera de información digital a un dispositivo de almacenamiento, en el cual están disponibles para su utilización inmediata.

Una de las ventajas más importantes de la fotografía digital es la posibilidad de procesar, manipular y utilizar la imagen resultante en plataformas tan versátiles como las PC's. Las cámaras digitales utilizan el cuerpo de una cámara fotográfica normal, así como el lente, pero registran las imágenes en un dispositivo de almacenamiento, similares a un *disco duro* de PC (siglas de *Personal Computer*) con gran capacidad. El número de píxeles de cada imagen depende del tamaño del CCD; el de la cámara del IGg, el tamaño del sensor es de 1524 X 1012 píxeles, lo cual genera una imagen de 1.5 millones de píxeles (Figura 1.1). Todo lo anterior es en esencia, la diferencia con la fotografía aérea convencional. La aparición de sistemas de fotografía digital, basado en un sensor de estado sólido, como el desarrollado por Kodak, ha revolucionado el papel de las cámaras de formato pequeño no métricas en el ámbito de la fotografía

aérea alternativa (Mason *et al.*, 1997). En relación a las cámaras de formato analógico (películas fotográficas), las cámaras digitales tienen mejor estabilidad geométrica, pues no existe deformación por la película; presentan mejor calidad radiométrica, respuesta lineal, un gran intervalo dinámico y gran sensibilidad espectral (comunicación personal con el Biólogo Armando Peralta, 1998).



*Figura 1.1.* Sistema videográfico y de fotografía aérea digital del IGg. El sistema de video consiste en dos cámaras de formato digital, las cuales funcionan de la siguiente forma: una registra una visión granangular del terreno y otra, registra una visión aumentada de la misma superficie que va cubriendo la cámara granangular (zoom). La cámara de video granangular va registrando la señal del *Global Position System* (GPS). La cámara de fotografía digital registra las imágenes de acuerdo con los parámetros pre-establecidos de resolución espacial acordes al objetivo del levantamiento. Las cámaras de video y la de fotografía están sincronizadas en base al tiempo GPS; (fotografía A. Peralta, IGg, 1998).

#### 1.2.3.1 Aplicaciones de la fotografía aérea digital en el campo de la erosión acelerada

No existen referencias concretas acerca de la utilización de la fotografía aérea digital que se relacionen con la erosión acelerada. Sin embargo, existen, en el terreno de los levantamientos de los suelos, diversas aplicaciones. A continuación se retoman algunas.

En el terreno de las aplicaciones de la fotografía digital sobre suelos, Mausel y Wilson (1997) entre otras, reportan un trabajo en el que desarrollan un sistema de cámaras fotográficas multispectrales en formato digital, el cual utilizaron para discriminar cuatro regiones de suelo a partir de un análisis en computadora. Dicho análisis se llevó a cabo con la información de cuatro “bandas” o rangos espectrales del sensor de la cámara. Los resultados fueron utilizados para identificar sitios prioritarios para la restauración de vegetación, para realizar un mapeo de áreas dirigidas a la explotación rural y para la confección de mapas multispectrales de gran precisión para su utilización en el campo de las aplicaciones agrícolas.

Mausel y colaboradores (1997) realizaron un levantamiento aerofotográfico con una cámara digital multiespectral para establecer la relación entre la resolución espacial y los diferentes tipos de suelo. Dividieron las imágenes en subregiones espectrales según los tipos suelo (éstos derivaron de la información de las cuatro “bandas” del sensor de la cámara) y realizaron un análisis espectral intensivo, con auxilio de un software para PC, para separar dicha información. Los objetivos fueron: identificar sitios para realizar obras de restauración vegetal y, desarrollar mapas de información básica espectral para usos agrícolas.

En base a los antecedentes sobre el uso de los sistemas alternativos de percepción remota para el estudio del medio ambiente, se pretende incorporar los métodos y materiales derivados del levantamiento videográfico y de fotografía aérea digital con los métodos geomorfológicos. Esta conjunción de métodos y técnicas puede ser ventajosa sobre todo para el análisis de procesos muy dinámicos, como los de la erosión acelerada, pues se puede controlar la resolución espacial, y la temporalidad de la toma para fines de monitoreo en áreas específicas con gran detalle.

La información espectral que contienen las imágenes fotográficas como las de video representan ventajas potenciales sobre las fotografías convencionales, ya que pueden ser tratadas bajo métodos digitales para encontrar algún tipo de relación entre los rasgos y la morfología de los procesos erosivos con su respuesta espectral y de esta manera clasificarlos para fines de monitoreo de áreas degradadas por erosión acelerada (Garrido *et al.*, 1998).

#### 1.2.4 Construcción del fotomosaico digital (con imágenes fotográficas)

A continuación se describe la elaboración de un producto cartográfico derivado del aerolevantamiento realizado por el IGg. El método de confección es novedoso, el cual combina técnicas de ensamblaje tradicionales con técnicas digitales de construcción. Todo se realiza sobre plataforma PC.

Del banco de información digital del cubrimiento del estudio videográfico de la vertiente oriental del Ex-Lago de Texcoco, se obtuvieron los archivos de las imágenes fotográficas que cubren al área de estudio.

El archivo de las imágenes fotográficas se encuentra en su formato original DCS de Kodak. Este formato es transferido al *software* procesador de imágenes digitales *Adobe Photoshop* (ver. 3.0), en el cual, se post-procesaron para dos fines concretos:

El primero, para la construcción del fotomosaico y el segundo, para el mejoramiento individual de las imágenes para su conversión a formato analógico con fines de foto interpretación en modelos (o pares) estereoscópicos para diversos fines.

#### 1.2.4.1 Antecedentes sobre la construcción de fotomosaicos

Por muchas décadas las fotografías han sido ensambladas en mosaicos, los cuales, en su momento, han sido sobreimpresos con símbolos cartográficos específicos para producir fotomapas. Este tipo de mosaicos tienen la apariencia de una gran fotografía del terreno (Robinson *et al.*, 1995).

La elaboración de un mosaico fotográfico consiste, en la obtención de una fotografía continua de gran tamaño ensamblada (formada) por diversas exposiciones individuales. Estos ensambles son convenientemente utilizados como guías de referencia de un área para diversos fines, el principal de ellos: la obtención de una visión general de los paisajes fotografiados, con la mayor cantidad de detalles espaciales incluidos. Estos detalles no los presentan las imágenes de satélite en los compuestos de color impresos, pues su limitante principal frente a la fotografía es, precisamente, la resolución espacial, por mencionar la más importante (Lillesand y Kiefer, 1994).

Por lo tanto el fotomosaico tendrá los mismos errores geométricos que las fotografías: desplazamiento por el relieve, inclinación de la toma, además de los errores introducidos en el ensamblaje (Luján, 1991).

#### 1.2.4.2 Tipos de fotomosaicos (mosaicos fotográficos).

Existen diferentes tipos de fotomosaicos que se relacionan directamente con el método de su construcción (según Luján, 1991):

1. Mosaicos no controlados
2. Mosaicos semicontrolados
3. Mosaicos controlados
4. Ortofotomosaicos.

Los mosaicos *no controlados* emplean fotografías aéreas en su escala natural, sin ningún tipo de corrección fotogramétrica y se ensamblan por medio de los rasgos identificables en cada foto.

Los mosaicos *semicontrolados* se construyen con fotografías sin corregir, de tal manera que se ajusten lo mejor posible a los detalles y utilizando puntos de control planimétrico que se ajusten para fijar la escala.

Los *mosaicos controlados* son aquellos en donde se utilizan fotografías corregidas geoméricamente para ser ensambladas lo mejor posible a los detalles y utilizando puntos de control planimétricos y un sistema de coordenadas reales.

Los *ortofotomosaicos* (también se conocen como ortofotomapas) se construyen a partir de fotografías que han sido corregidas individualmente con una proyección ortogonal del terreno y en las cuales han quedado eliminadas las variaciones de escala causadas por el relieve inherentes a toda fotografía aérea.

Las ventajas que proporcionan los mosaicos son que a diferencia de un mapa, presentan la localización planimétrica relativa de un infinito número de objetos que son discriminables (identificables) y que no aparecen en los mapas topográficos por ejemplo. Los fotomosaicos pueden ser preparados de manera más rápida y a menor costo que los mapas. Los fotomosaicos han servido como mejores fuentes sobre otros productos cartográficos utilizados como mapas de referencia general, un ejemplo de éstos son los mapas topográficos (Robinson *et al.*, 1995).

La principal desventaja de los fotomosaicos es que no son representaciones planimétricas verdaderas (Wolf, 1983).

#### 1.2.4.3 Pasos en la elaboración del fotomosaico digital (mapa base)

A continuación se describen los pasos que se siguieron la elaboración del fotomosaico digital (*mapa base de este trabajo*) mediante el método denominado “sobreposición digital” (el nombre del método fue asignado por Navarrete, 1999).

##### *Paso 1.* Obtención de las imágenes desde sus archivos originales

Las imágenes resultantes de las tomas del CCD son almacenadas directamente en un disco duro interno de la cámara digital (tarjeta *PCMCIA*), en el formato DCS de Kodak. De este disco pueden transferirse a una plataforma *PC*, en donde es posible visualizarlas en pantalla por medio del *Twain*. El *Twain* es una plataforma de intercambio para adquirir imágenes capturadas por la cámara digital (Guía del usuario, *Adobe Photoshop*, ver 3.0, 1995). Este formato es utilizado junto con el *software* mencionado (ver. 3.0) para procesar imágenes. Kodak utiliza su propio

patrón de filtrado de los elementos individuales del CCD con tal que se alternen el rojo, el verde y el azul en una secuencia especial en el modo *RGB*. Este modo combina varios valores de brillo de luz roja, verde y azul, para formar los colores en pantalla.

### *Paso 2. Procesamiento de las fotografías aéreas digitales*

Después de obtener la imagen por medio del *Twain*, se orientan (en caso de ser necesario) con una rotación de 90° *AD* (a *dextrórsim*, es decir, giro hacia la derecha en pantalla). Una vez orientada se procede a su mejoramiento que consiste en:

Aplicar un filtro de imagen llamado *niveles automáticos* (dentro del menú principal). Dicho proceso consiste en un “estiramiento” del histograma que hace el sistema en base a los valores digitales de las imágenes. Estos valores están representados gráficamente dentro de un histograma que está entre los valores 0 a 255 (rango *bite*). Las imágenes tal como las obtiene la cámara no pueden ser visualizadas sin procesar, pues la información registrada se encuentra en un rango espectral muy amplio, por lo que, al trabajarla dentro del *Photoshop*, se convierten a modo *RGB* para poder ser visualizadas en la pantalla, y para transformarla de formato, por ejemplo, *CMYK*, o *JPG* (ver Guía del usuario, *Adobe Photoshop*, ver 3.0, 1995), de manera que sean visiblemente correctas. Es preciso resaltar que este tipo de procesamiento modifica los valores digitales, distribuyendo o “estirando” el histograma en base a ciertos parámetros que tiene el *software* por *default*.

También se aplica un filtrado de imagen llamado *enfocar más* (dentro del menú principal *filtro*) y que consiste en un mejoramiento a través del resalte de bordes en las imágenes, aumentando la nitidez y la calidad de los detalles (para ver más detenidamente, pasar al apartado 1.2 llamado “*Procesamiento digital de las imágenes fotográficas*” que se encuentra más adelante en este capítulo).

*Paso 3.* Una vez que las imágenes han sido procesadas y mejoradas para su visualización se encuentran listas para ser montadas y ensambladas digitalmente en una imagen de “fondo” constituido por un mapa *raster*, el cual, fue generado por medio de un barredor óptico (*scanner*) a partir de la digitalización (*scanneo*) de una carta topográfica a escala 1:50 000 de la zona de estudio. Este mapa sirve como *base* para tener control sobre las imágenes en el momento de construir el mosaico y ha sido

adquirido con una resolución calculada en base a la relación de la escala del mapa con la resolución de las imágenes (96 dpi). Dicha resolución fue de 324 dpi.

*Paso 4.* Una vez generada la base que servirá de control para el mosaico, se despliegan las imágenes y la base (fondo) en múltiples “ventanas” y se recortan los centros de cada imagen. Para este caso en particular, las imágenes se recortaron en base al criterio de sobreposición con la imagen contigua generando ventanas de corte (máscara de corte) diferentes, pues en algunas de las imágenes no se contaba con la sobreposición constante de cubrimiento (la variación del traslape entre cada exposición oscila entre 30 y 60%).

*Paso 5.* El procedimiento de ensamble de las imágenes “recortadas” fue hecho por medio de varias herramientas del programa, las cuales, se utilizaron para adaptar por medio del reajuste y movimiento de los píxeles de las imágenes, los rasgos comunes entre éstas y el mapa topográfico digitalizado (que se encuentra desplegado en el fondo de la *ventana*”).

Las herramientas que se utilizaron fueron las siguientes:

- *Selección, copiar y pegar.* Estos comandos sirven para trasladar los cortes al mapa base por medio del *arrastre* de dichos objetos. De esta manera se generan *capas* individuales de cada imagen en la ventana del “fondo”, las cuales, si está seleccionada su *capa*, se puede trabajar individualmente (cada capa se *renombra* preferentemente con un número o clave específica).
- *Giro arbitrario*, que permite rotar la imagen de manera manual, para ajustar los movimientos de deriva propios de la plataforma del vuelo y que generaron cierta rotación con respecto al norte (10 a 15° aprox.). Esto es posible cuando se modifica su *capacidad* en la ventana emergente de las *capas*. Este proceso se logra con la herramienta *Girar-arbitrario*, del menú *imagen y mostrar capas*, del menú *mostrar paletas*. Este paso permite hacer casi transparente la imagen para poder visualizar el fondo (el mapa topográfico) y así ajustar, tanto en las orillas de la imagen como en el centro de la misma, los rasgos visibles en ambas y de esta manera tratar de disminuir los errores propios de las fotografías (desplazamiento por relieve y de proyección central).

- Este proceso se logra con el uso de las herramientas de imagen *escalar* del menú *imagen-efectos-escalar*, *distorsionar* del menú *imagen-efectos-distorsionar*, *perspectiva* del menú *imagen-efectos*, *sesgar* del menú *imagen-efectos*

Todo el proceso de construcción del fotomosaico se lleva a cabo sobre plataforma PC, con el software *Adobe Photoshop ver 3.0* (1995). Este programa procesador de imágenes digitales, funciona con los siguientes requerimientos:

Un procesador Intel® 80386, MSDOS ver 5.0 y correr con *Microsoft Windows*, 10 Mb (megabytes) de memoria de acceso aleatorio; Disco duro de 20Mb (Puesta en marcha de *Adobe Photoshop*, ver 3.0, 1995).

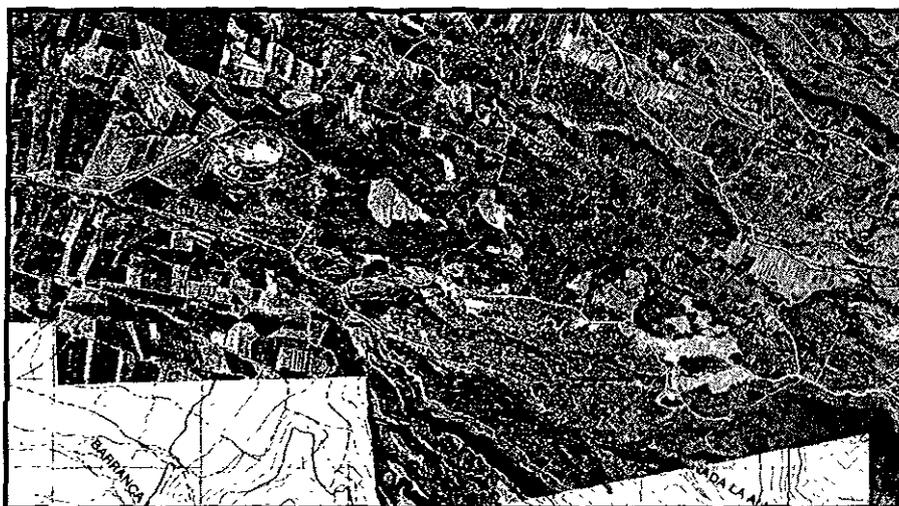


Figura 1.2 Segmento del mosaico terminado bajo el método digital. Obsérvese la coincidencia entre los rasgos de las imágenes y los del mapa topográfico digitalizado (parte inferior de la figura).

De acuerdo a los métodos descritos por Robinson *et al.* (1995) para la construcción de los fotomosaicos, en este en particular, se utilizó la parte central de cada fotografía en las áreas con presencia de relieve, lo cual reduce las distorsiones geométricas causadas por el desplazamiento de éste. En las zonas carentes de relieve su pudo utilizar la imagen completa pues se ajustó de manera óptima a los rasgos del mapa topográfico, tales como caminos, límites de áreas urbanas, canales de drenaje, etc. Los dos tipos de imágenes, por así llamarlas, se ensamblaron cuidadosamente a lo largo de las formas y rasgos que se identificaron en la carta topográfica digital. Una vez que se obtuvo el

mosaico completo\* se transfirió al SIG (en formato *bmp*, *bit-map* de *Windows®*) por medio de doce puntos de control conocidos sobre el mapa. Este proceso se le conoce como georreferenciación. La resolución obtenida al georreferir al mosaico fue de 3.36 m. Posteriormente, mediante el método de corrección fotogramétrica del SIG, aplicando un polinomio del *tercer orden*, (ver Reference Guide, ILWIS ver 2.1, 1997) se *remuestreó* obteniendo una sigma de 19.2, que significa que hay 19.2 pixeles de desplazamiento total (esto equivale a 64.5 m). (Nota: el mosaico se encuentra impreso al final de este trabajo en el anexo cartográfico; su escala original fue modificada para fines de presentación)

### 1.2.5 Procesamiento digital de las imágenes fotográficas

Las imágenes se procesaron en base al “estiramiento” (ajuste) del histograma RGB de cada imagen, dentro del *software Adobe Photoshop* (versión 3.0, 1995). Este procedimiento consistió en el mejoramiento del histograma de cada banda individualmente (curva de la banda R, la banda G y la banda B, rojo, verde y azul en español respectivamente) y la respuesta visual en pantalla (observar Figura 1.3).

La modificación y mejoramiento en base al ajuste del histograma también se realiza con una herramienta que ajusta las *curvas* de los colores de manera simultánea (curva RGB) en función de la respuesta visual de las imágenes. Esta herramienta del procesador equilibra la respuesta de las tres bandas mediante un cálculo interno del *software*. Otra herramienta del programa conocida como *ajuste de brillo*, permite igualar los valores de las imágenes en cuanto a su brillo, ya sea mediante la selección manual del área de la imagen a igualar o mediante la modificación en conjunto de las imágenes una vez ensambladas. Existen herramientas que permiten “leer” el valor de los pixeles dentro de las imágenes, ayudando a modificar los valores de brillo en las fotografías.

A las imágenes también se les aplica un filtrado (de pasas altas) de *enfoque* el cual, aumenta en gran medida la definición de los detalles u objetos más pequeños registrados por el sensor. Dicho filtro resalta más los bordes de los objetos aumentando su calidad y la nitidez. El procesamiento se realizó con la finalidad de

---

\* El fotomosaico se encuentra impreso al final de este trabajo dentro del anexo cartográfico. La escala original de dicho producto (1:20 000) fue modificada para fines de presentación de esta tesis.

imprimir las fotografías en color en papel especial (con una impresora de inyección de tinta de alta densidad:720 dpi) para fines de fotointerpretación en modelos estereoscópicos.



*Figura 1.3 Segmento de una fotografía aérea digital antes (izq.), y después de su mejoramiento (der.) dentro del procesador de imágenes. Dicho proceso consistió en el ajuste del histograma de la curva RGB de cada imagen en el software procesador de imágenes.*

### 1.3 Sistemas de Información Geográfica

#### 1.3.1 Definición de SIG

Los SIG son sistemas computarizados que consisten en un conjunto de herramientas diseñados para la captura, el almacenamiento y el análisis de información acerca de atributos en donde la localización y relaciones espaciales juegan un papel principal (Palacio, 1996). Estos sistemas permiten integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial (geográfica) y no espacial (o de atributos) a través de conceptos y estructuras lógicas (programas) de manejo de entidades espaciales usados en diferentes áreas de aplicación (López-Blanco, 1998).

Otra definición dice que: los SIG son un conjunto de programas y equipos de computación que permite el acopio, manejo y transformación de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite, imágenes aéreas fotográficas digitales, etc.) y no espaciales (atributos) provenientes de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes (Bocco *et al.*, 1991).

Los SIG contribuyen de manera importante para la sistematización, evaluación y caracterización de la información que se va generando (Palacio, 1989) en las diferentes etapas de los estudios.

### 1.3.2 Elementos de un SIG

Los elementos que componen a los SIG según Robinson *et al.* (1995) son:

1. El hardware o componentes computarizados en los cuales el SIG *corre* físicamente y donde se realiza el análisis y la manipulación de información.
2. El software o grupo de programas que conforman la estructura lógica del SIG; y,
3. El usuario u operador.

El uso de los SIG es validado cuando el usuario está capacitado para usarlo, y se tienen claros los objetivos a alcanzar, por lo que, desde una perspectiva más general, cada vez es mayor su utilidad para otras disciplinas en las que las dimensiones de espacio y tiempo se agregan como elementos importantes de sus métodos de análisis (López-Blanco, 1998).

### 1.3.3 Módulos del SIG, formatos, bases de datos. Utilización para estudios del medio ambiente

El uso principal de los SIG está dirigido para: orientar las decisiones adecuadas de acuerdo a los elementos y variables que intervienen en los ejercicios de modelamiento espacial; y para la solución de problemas que involucran información del entorno geográfico. De hecho, los SIG son una herramienta de análisis que los distingue de los sistemas de cartografía automatizada y de los bancos de datos digitalizados, ya que permiten por medio de la manipulación de información realizar operaciones tales como el cruce (superposición) y reclasificación de mapas, operaciones que generan información única y parcialmente inexistente, en relación a las necesidades del usuario.

Un SIG consta básicamente de un módulo de captura de datos, un subsistema de almacenamiento y manejo de datos, un módulo de análisis y modelamiento, y un subsistema de salida. Los datos espaciales pueden capturarse a través de la digitización de mapas, que consiste en la transformación de formato analógico (impresión en papel u otro material) a formato digital que pueda ser utilizado por el sistema.

La información puede ser almacenada en formato vectorial. El formato vectorial sirve para representar información geográfica que consisten en líneas, por ejemplo, caminos, ríos y líneas de contornos. Estos segmentos están codificados por identificadores, nombres de clases o valores (mapa de alturas por ejemplo). La relación entre los segmentos y los mapas sobre la posición de la Tierra está definido por un sistema de coordenadas (Reference Guide, ILWIS 2.1 for Windows. 1997).

Los mapas de puntos sirven para representar información espacial geográfica. La información de puntos puede referirse a puntos de control terrestre en campo o a datos puntuales de sitios que contengan información específica (como sitios de muestreo de suelos por ejemplo). Los mapas de polígonos se utilizan para definir áreas o unidades de mapeo tales como las unidades de suelo, las ecológicas y las geomorfológicas, entre otras. Para poder utilizar para otros fines este tipo de datos se hace necesaria la transformación a formato en celdas o raster. Esta operación es llamada conversión vector-celda.

Un mapa en formato raster o de celdas consiste en matrices de datos cuyos valores refieren unidades espaciales codificadas y referenciadas al sistema de coordenadas seleccionado. El formato raster es un objeto que contiene información y sirve para representar información geográfica e imágenes de sensores remotos en pixeles (elemento mínimo de la imagen) de cierto tamaño (Reference Guide ILWIS 2.1 for Windows, 1997).

Los atributos de las unidades espaciales o de mapeo se capturan y son almacenadas y se analizan en bancos de datos tabulares en donde cada atributo es representado por columnas de información. El proceso de transformación de vector a raster (celdas) de las unidades de mapeo o espaciales genera información tabular que se relaciona a los mapas o polígonos. De éstos se pueden obtener datos acerca de sus características, tales como su área, su perímetro y otros datos básicos. Cada polígono es una unidad mínima a la cual se refiere la información obtenida en el campo, el laboratorio u otras fuentes (Bocco *et al.*, 1991). Por medio de los procedimientos del SIG los atributos contenidos en las columnas pueden ser sustituidos por otros, generando información nueva que estaba integrada a un mapa y que puede ser separada de éste como mapa temático nuevo.

El módulo de análisis y modelamiento espacial permite llevar a cabo operaciones, como se mencionó anteriormente, de superposición de información y re-clasificación

de mapas, cálculo de distancias en relación de determinados objetos, y permite la utilización de modelos a partir de un conjunto de reglas o condiciones establecidas por un intérprete.

En este módulo se pueden obtener resultados en base al manejo de información espacial y no espacial, en los cuales se incluyen los datos necesarios de acuerdo a las necesidades del usuario, así como también permiten establecer una variedad importante de escenarios en los cuales se simulen situaciones hipotéticas debidas a la modificación de las condiciones iniciales o sin manipular; en otras palabras, este módulo del SIG permite transformar los datos (o variables o elementos) seleccionados para el análisis en información “útil” para la toma de decisiones. Un claro ejemplo de esto es la elaboración de mapas de riesgos o amenaza de fenómenos naturales en un sitio específico con variaciones temporales determinadas.

Otra de las innovaciones y ventajas que presentan estos sistemas, es la creación de modelos de elevación del terreno (MDT) a partir de la digitización de curvas de nivel o por la introducción de datos puntuales de alturas. También es posible realizar operaciones especiales de datos, tales como la interpolación. Dichas operaciones se pueden realizar para la generación de información espacial, que puede estar contenida en tablas de datos con atributos o en mapas especiales. Existen diversos ejemplos para este tipo de aplicaciones del SIG, pero los más usuales son los mapas que interpolan datos altitudinales, como se mencionó arriba, características de suelos (Applications Guide of ILWIS 2.1, 1997) entre otros (ver también Palacio *et al.*, 1992).

El subsistema de salida permite representar la información obtenida a partir del análisis en forma de nuevos mapas e imágenes, cuadros y gráficos.

La información ambiental que se utiliza como herramienta para la planeación ambiental y la administración de los recursos naturales es compleja y voluminosa e involucra la mayor parte de las disciplinas científicas, tanto las que estudian los aspectos físicos del medio ambiente y recursos naturales (como geógrafos, geomorfólogos, climatólogos, etc.) como los relacionados con los aspectos bióticos (biólogos, ecólogos, etc.) así como los que estudian a la sociedad y la economía y en general a los especialistas que se dedican al ordenamiento territorial (López-Blanco, 1998).

Con las ventajas que brindan los sistemas de percepción remota y los SIG, se puede integrar toda la información necesaria para el estudio de los recursos naturales a

diversas escalas espaciales y temporales. El manejo de la información estará en función de los objetivos y las metas que se planteen los usuarios de ambos sistemas así como también del conocimiento que se tenga de las áreas bajo estudio. Una de la virtudes de los SIG y los sistemas de percepción remota es que se pueden integrar los resultados de conocimientos más especializados, como lo puede ser los ejercicios de interpretación visual de imágenes y de fotografías aéreas por ejemplo, para fines específicos.

## CAPÍTULO II. LEVANTAMIENTO GEOMORFOLÓGICO

## 2.1 Introducción

La geomorfología es la ciencia que describe y estudia sistemáticamente los paisajes y analiza los procesos que actúan sobre ellos enfocándose al relieve (Bloom, 1991). El relieve es el conjunto de deformaciones de la superficie de la tierra y la geomorfología, comprende los principios teóricos y los métodos fundamentales para su estudio, por lo que la geología y la geografía son ciencias en las que esta ciencia se apoya (Lugo, 1988).

La geomorfología en los últimos años se ha replanteado algunos de sus conceptos teóricos adecuándolos más directamente al estudio de los procesos que modifican o afectan al desarrollo de las geoformas en diferentes condiciones climáticas. Debido a esto, se pueden establecer métodos alternativos para el estudio del relieve y sus procesos exógenos inherentes (Verstappen, 1983).

Dentro del ámbito de la geomorfología se ha desarrollado de manera evidente la geomorfología aplicada, la cual interrelaciona los conocimientos geomorfológicos científicos con fines específicos, tales como el análisis de riesgos y desastres naturales así como para fines de organización espacial, territorial y ecológica (Bocco y Mendoza, 1997). El carácter aplicable de la geomorfología surge por las necesidades bien definidas de la sociedad para con esta disciplina. En este sentido, la geomorfología aplicada se ha instituido como disciplina aplicable fuera de los círculos exclusivamente científicos, los cuales se han venido preocupando en las últimas décadas por los problemas sociales que trae consigo el subdesarrollo de los países (Tricart, 1982).

La línea principal de la geomorfología aplicada que tienen que ver con el manejo y planeación de los recursos naturales, así como con la conservación y recuperación de los paisajes es la Geomorfología ambiental, en la cual se estudian las líneas ecológicas del paisaje entre la geomorfología y otras disciplinas o elementos (parámetros) de la Tierra (Verstappen, 1983). Por esto, la geomorfología juega un papel importante para el entendimiento del medio ambiente en donde se han generado los suelos, y existe cierto comportamiento hidrológico, y también se han desarrollado la vegetación y el hombre y éste último ha establecido sus campos de cultivo, por lo que el análisis y la

comprensión de los elementos que modifican el relieve es objeto también de la geomorfología.

Los estudios de los procesos geomorfológicos dentro de un periodo reciente (Cuaternario) se han incrementado, beneficiados por las técnicas de datación, por lo que, el estudio de los procesos que actúan sobre el relieve ha tomado gran importancia, pues proveen de información acerca de la evolución de los paisajes y sus rangos o estimaciones de cambio. La geomorfología está entonces mejor “equipada” para considerar los efectos ambientales sobre la superficie de la Tierra así como para contribuir en el manejo del paisaje en el espacio y el tiempo (Jones, 1995). Bajo el enfoque de la geomorfología aplicada existe la posibilidad de sintetizar las relaciones ambientales de los procesos que tienen que ver con la modificación del paisaje, y a su vez con la degradación de su medio ambiente.

Los diversos procesos erosivos juegan un papel muy importante en el deterioro ambiental; una de las alternativas para su estudio es el de la geomorfología aplicada, pues tiene la potencialidad de cuantificar la pérdida de suelo por erosión acelerada, analizar su distribución espacial, y a su vez, relacionar dichos procesos con la expresión geomorfológica del terreno. Además se pueden integrar al análisis las condiciones ambientales predominantes (Verstappen y Zuidam, 1991), ya que, todos los procesos de ladera, sus formas e intensidades, los rasgos de erosión lineal y sus formas (como erosión laminar, o en cárcavas), son parte integral de la dinámica geomorfológica de los paisajes. Dicho enfoque permite, por un lado, analizar la distribución de los rasgos erosivos (Bocco, 1989b), y por otro, facilita entender el funcionamiento geomorfológico del área de estudio para poder definir estrategias específicas de manejo, conservación y recuperación a través de obras específicas (Palacio, 1988).

## 2.2 Geomorfología, Percepción Remota y SIG

El conocimiento total de los recursos naturales es una urgente necesidad, especialmente en países en vías de desarrollo, ya que su futuro dependerá en gran medida de la utilización y administración racional de dichos recursos. Para su evaluación y conocimiento, el análisis visual y digital de imágenes obtenidas desde plataformas aéreas y espaciales, es de gran utilidad (Bocco *et al.*, 1991). Las imágenes (aeroespaciales) provenientes de los sensores establecidos en plataformas aéreas son

muy importantes para estudiar y abordar a los elementos del medio ambiente, además de ser un elemento esencial para los levantamientos geomorfológicos, por la información detallada que proporcionan acerca de las geoformas, en su configuración en planta, y en el caso de las imágenes estereoscópicas, su dimensión vertical (Verstappen, 1992). Dentro de la geomorfología aplicada, las imágenes derivadas de los sensores remotos han sido una de las herramientas de análisis más importantes, ya que facilitan la observación de las características espaciales del terreno en un tiempo determinado.

Tradicionalmente, la interpretación geomorfológica sobre fotografías aéreas se ha basado en técnicas de interpretación visual/manual. El análisis de las imágenes utilizando criterios sobre el relieve y criterios de patrones de densidad como punto de partida para el reconocimiento e identificación de las unidades geomorfológicas, que se basa en un proceso minucioso de observación visual, a través de ejercicios de inducción-deducción. Estos ejercicios permiten obtener una visión completa sobre la configuración geomorfológica del terreno. Además de la interpretación de imágenes, el conocimiento regional y la literatura disponible sobre las características del área de estudio, integran gran parte del levantamiento geomorfológico de los paisajes (Verstappen, 1992).

La información generada a partir del procesamiento manual y digital de las imágenes requiere de un sistema capaz de manejar e integrar la información y éste debe permitir la utilización, manejo y transformación en información útil. (Marble y Peuquet, 1983 *op. cit.* en Bocco *et al.*, 1991). En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son la herramienta más adecuada para utilizar y aprovechar la información que se genera por los sistemas de percepción remota. Estos sistemas no solamente son capaces de manejar información generada por medios digitales, sino también permite la transformación de formatos analógicos (como un mapa impreso) a digitales por medio de un sistema digitalizador. Esto implica directamente la capacidad de almacenamiento de la información, como por ejemplo, los datos resultantes de ejercicios derivados de la fotointerpretación y la información contenida en cartografía temática impresa.

El uso de varias técnicas de sensoramiento remoto pueden ser examinadas para establecer la forma en que pueden contribuir al incremento de la información que se tenga para el manejo ambiental de los recursos naturales, así como también para

implementar medidas para el control de la erosión (por ejemplo Bocco *et al.*, 1990). Estas técnicas pueden proveer de una visión clara y sinóptica de la distribución y las formas de los procesos de erosión sobre la superficie de la Tierra, así como también, permiten evaluar las condiciones actuales de uso del suelo, factor muy importante en los procesos de degradación (Keech, 1980). Las técnicas automatizadas de percepción remota han contribuido substancialmente a la realización de inventarios, cartografía y monitoreo de recursos naturales (Bocco *et al.*, 1991).

### 2.3 Resultados del levantamiento geomorfológico de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino

Los resultados del levantamiento geomorfológico de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino se presentan en el Cuadro 2.1 y se describen posteriormente, a través de la descripción de las formas del relieve encontradas en la zona de estudio.

*Cuadro 2.1 Tabla resultante del levantamiento geomorfológico de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino.*

Unidad Geomorfológica	Subunidad	Litología y materiales	Pendiente media y rango en ° (grados)
Ladera montañosa	-	Andesitas e ignimbritas	22.5 (10-35)
Lomerío	-	Andesita y material piroclástico de caída (cenizas)	15 (2-28)
Piedemonte	Local	Coluvión	20 (10-30)
	Superior	Flujos lávicos andesíticos (porción basal), depósitos de lahares, y material piroclástico de caída (cenizas)	17.5 (0-35)
	Inferior	Diferentes depósitos de lahar y material piroclástico de caída (cenizas)	5.5 (0-11)
Barrancos	-	Coluvión y aluvión	32.5 (1-65)
Planicie aluvial	-	Material aluvial y piroclástico de caída (cenizas)	0

#### 2.3.1 Ladera Montañosa

Esta unidad está formada, según la información geológica disponible, por rocas andesíticas, riocáciticas y dacíticas en forma de volcanes prominentes, de domos volcánicos y derrames de lava, con material piroclástico asociado (De Cserna *et al.*, 1988), así como también de ignimbritas (Mooser *et al.*, 1996). Probablemente la morfología de la ladera montañosa corresponda a derrame de lavas andesíticas o domos volcánicos del cuaternario (De Cserna *et al.*, 1988; Mooser *et al.*, 1996). Estos

rasgos orográficos se edificaron sobre rocas volcánicas andesíticas profundamente erosionadas consideradas del Terciario Medio (Schlaepfer, 1968 y Mooser, 1975 *op. cit.*, en De Cserna, 1988) o Mioceno Temprano. Las porciones cumbresales de las elevaciones Tearco (3480 m.s.n.m.), Tlapanco (3600 m.s.n.m.) y Tecorral (3380 m.s.n.m.), forman las partes más altas de la cuenca del río Chapingo así como de la unidad de ladera montañosa; mientras que la altura máxima para el Río San Bernardino es el cerro Tecorral en donde se encuentra la divisoria de aguas de ambas cuencas. Por lo tanto para la unidad de ladera montañosa la altura máxima es 3600 m.s.n.m. y la altura mínima es de 2741 m.s.n.m. Su pendiente media es de 22° aunque existen pendientes que alcanzan los 66° en las zonas de barrancos.

La unidad de ladera montañosa es de origen volcánico (endógeno) y es posible subdividir a esta unidad al interior, ya sea por pendientes y alturas o por morfología de su perfil transversal y longitudinal. Dicha delimitación puede servir para la caracterización del relieve en base a su dinámica actual, es decir, se discretiza al relieve para *heterogeneizar* a los procesos geomorfológicos que posee cada subunidad. Principalmente se tiene la combinación de una porción de ladera con perfil transversal y longitudinal morfológicamente convexa y otra de perfil transversal y longitudinal cóncavo. La primera también presenta fuertes pendientes y barrancos muy profundos y amplios, la segunda subunidad presenta barrancos no tan amplios y sin profundas incisiones. Esta unidad de terreno presenta cobertura de bosque abierto con pastizales en su porción expuesta (orientada) hacia el oeste y al sur, y una cobertura de bosque más densificado en su porción expuesta hacia el norte (y a las pequeñas áreas expuestas hacia el este).

### 2.3.2 Lomerío

Esta unidad de lomerío se encuentra al pie de las laderas montañosas, en la porción noreste de la zona de estudio y presenta una morfología de derrame lávico de tipo ácido con una cobertura piroclástica homogénea de materiales de caída, principalmente cenizas (verificado en recorrido de campo). De hecho no existe referencia precisa acerca de esta unidad desde el punto de vista geológico. Sin embargo se incluye en trabajo de De Cserna *et al.* (1988) dentro de la unidad de rocas volcánicas epiclásticas, formando antiguos abanicos aluviales coalescentes, incluyen depósitos del Cuaternario, derivados de las Sierras de Tláloc y Sierra Nevada. No es

posible identificar el centro de efusión de este derrame pero la dirección preferencial (dirección este-oeste) apunta hacia las grandes estructuras del domo volcánico *el Mirador* que es la estructura más grande de esta zona.

Esta unidad de origen volcánico presenta una altura máxima de 3340 m.s.n.m. y una mínima de 2741 m.s.n.m. Su pendiente predominante es de 15° aunque existen zonas con pendientes hasta con 58° de inclinación. La unidad de lomerío, por constituirse de un derrame lávico ácido, presenta una superficie plana en su cumbre, es decir, una superficie cumbral de morfología predominantemente aplanada, en donde se han establecido algunas zonas de cultivo (agricultura de temporal) debido al desarrollo de los suelos favorecido por esta característica geométrica.

### 2.3.3 Piedemonte

Dentro de la zona bajo estudio es posible diferenciar por su características al interior, tres subunidades de piedemonte, un piedemonte local, un piedemonte superior y un piedemonte inferior. Estas dos últimas categorías se deben por su posición altitudinal en terreno y su pendiente.

#### 2.3.3.1 Piedemonte local

Esta unidad está formada por material coluvial, en los que se incluyen algunos bloques y material desprendido por los agentes del intemperismo y depositado por procesos gravitacionales.

Esta unidad se encuentra entre los 2941 y 3140 m.s.n.m. Su pendiente media es de 20° pero se presentan pendientes hasta de 37°.

El piedemonte local es una zona relativamente más pequeña en cuanto a las demás unidades pedemontanas, pero es la única que presenta una morfología deposicional de origen gravitacional. Se encuentra dentro de la cuenca del río Chapingo, al pie de la ladera montañosa, formando parte del área de influencia de uno de los barrancos (cauces principales) más amplios que drenan a dicha cuenca.

Dentro del coluvión que se encuentra en esta unidad, es posible distinguir algunos materiales heterométricos, entre los cuales, se observan bloques que miden algunos metros en su eje mayor, alternados con bloques menores arreglados de acuerdo a sus tamaños. Las áreas adyacentes a estos materiales se encuentran rellenas de detritos de tamaños mas homogéneos.

Este piedemonte solo tiene influencia local y se encuentra relativamente activo (no presenta vegetación establecida aparentemente) con material de aporte originado ladera arriba.

### 2.3.3.2 Piedemonte superior

Esta unidad queda comprendida, geológicamente, dentro de la unidad de rocas volcánicas epiclásticas, formando antiguos abanicos aluviales coalescentes incluyendo depósitos del Cuaternario, derivados de las Sierras de Tláloc y Sierra Nevada (De Cserna *et al.*, 1988). Según la interpretación geomorfológica y la verificación en campo fue posible distinguir, en la parte basal de esta unidad, flujos lávicos de tipo ácido. Sin embargo, el principal volumen de material que conforma a esta unidad son depósitos de lahares alargados (depositados extendidamente en dirección sureste-noroeste) de algunas decenas de metros de espesor. Dichas dimensiones aumentan conforme desciende hacia las partes bajas de las cuencas, en donde se encuentran los principales depósitos de estos eventos laháricos.

La parte superior de estos depósitos que conforman esta categoría de piedemonte, se observan depósitos alternados de cenizas volcánicas correspondientes a varias emisiones cineríticas de los volcanes de la Sierra Nevada (De Cserna *et al.*, 1988). Algunos de estos estratos de ceniza se encuentran modificados o alterados en cuanto a su composición por procesos de endurecimiento (encostramiento) localmente llamados “tepetates” (Zebrowski, 1992). Estas formaciones se encuentran tanto aflorando en la superficie como cubiertos por otros depósitos a diferentes profundidades. Estas formaciones se desarrollan en una sucesión de depósitos *in situ* y a veces retransportados. La sobreposición de depósitos parece ser necesaria para la existencia de los tepetates (Peña y Zebrowski, 1992).

Los principales materiales originales de los tepetates son cenizas y lapillis, bajo forma de lluvias aéreas, no cementadas en el momento de depositarse, por lo que, los tepetates son el resultado de la alteración de cenizas volcánicas (Zebrowski, 1992).

De acuerdo con lo anterior, en la zona existe una alternancia de materiales como sigue: en la parte inferior (basal) flujos lávicos orientados sureste-noroeste (piedemonte anterior a los lahares). Éstos se encuentran cubiertos por depósitos de diferentes eventos laháricos con presencia o alternancia de depósitos piroclásticos estratificados por lluvia (ceniza volcánica). También se observaron algunos depósitos

de brecha volcánica, situados en la parte centro-sur del piedemonte superior de la cuenca del río San Bernardino.

La unidad de piedemonte superior se encuentra entre los 2441 y 3340 m.s.n.m. Es importante remarcar que la inclinación de la pendiente media de esta unidad es de 17.5° pero presenta valores altos que van de 35° hasta 50°. La pendiente de esta unidad junto con los materiales geológicos han sido un factor clave para entender los procesos de degradación por erosión acelerada que se observan en esta zona.

A esta unidad es posible fragmentarla en su interior pues posee superficies cumbrales interfluviales que corresponden a las partes más altas de los depósitos laháricos (crestas de los “lomos” del depósito). La mayor parte de estas formas también funcionan como superficies de parteaguas entre los barrancos que drenan ambas cuencas. Algunas de estas superficies han sido erosionadas hasta dejar solamente remanentes, las cuales están ocupadas por superficies de cultivo que en algunos casos están ya también abandonadas. En el piedemonte superior se concentran los mayores esfuerzos, en términos de extensión, de las obras y prácticas de recuperación de suelo y vegetación de la zona así como también, se encuentran algunas áreas agrícolas junto con una gran cantidad de restos de áreas que funcionan como tales y que han sido fuertemente erosionadas.

### 2.3.3.3 Piedemonte inferior

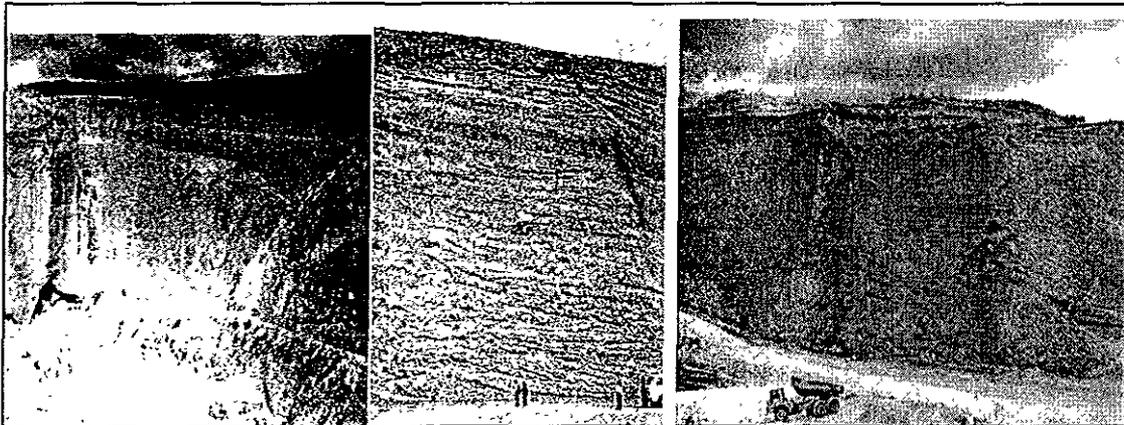
No es posible encontrar alguna referencia específica de la geología de esta unidad geomorfológica, pero por los recorridos de campo y los ejercicios de fotointerpretación geomorfológica, se trata de en conjunto, de los depósitos más importantes, en términos dimensionales de volumen y espesor, de los eventos laháricos que conforman tanto al piedemonte inferior como al superior.

Estos grandes depósitos presentan una alternancia de deposiciones piroclásticas de caída en sus superficies, principalmente, cenizas volcánicas finas y material pumicítico. Estos depósitos están orientados este-oeste y posiblemente en el área en la que se sitúan encontraron el nivel de base regional, que correspondía a una antigua planicie fluvio-lacustre del ex-lago de Texcoco. Estos depósitos fueron originados en la Sierra de Tlálóc y Nevada (De Cserna *et al.*, 1988).

Esta unidad se encuentra entre los 2640 y 2341 m.s.n.m. Cuenta con 5.5° de pendiente media, es decir, es una zona poco inclinada con pendientes muy suaves aunque existen zonas en donde cuenta con 20°, debido a las paredes de barrancos.

La morfología de esta unidad en términos generales, presenta un conjunto de por lo menos tres grandes abanicos coalescentes formados por los diferentes depósitos de los eventos laháricos (se registraron por lo menos, tres eventos diferentes). Su material principal, en términos de volumen, son estos depósitos. La unidad de piedemonte superior es susceptible de ser fragmentada en tres grandes subunidades, las cuales corresponderían a un mismo origen pero con diferentes variaciones temporales y de materiales asociados. Esta división puede ser hecha en base de ejercicios de fotointerpretación geomorfológica y descripciones de campo, ya que la información morfométrica de altimetría y de pendiente, sobre todo, no permite diferenciarlas, obsérvese Figura 2.1. Esta unidad es muy plana de acuerdo a su perfil transversal y longitudinal (y de acuerdo a apreciación en planta en el estereoscopio).

El piedemonte superior presenta una cobertura de áreas agrícolas de temporal, junto con algunas de riego. Actualmente se encuentran funcionando una serie de minas que se han establecido en el área de influencia de los barrancos, modificando su dinámica hidrológica en algunos casos. Existen también algunos poblados importantes, como Tequesquihuac y Huexotla, establecidos en las superficies (crestas) de los depósitos de lahar.



*Figura 2.1. Vista de los tres eventos laháricos que forman la unidad de piedemonte inferior. Nótese las dimensiones de decenas de metros de cada evento; los lahares son de tipo pumicítico. Dentro de los cortes observados en campo, también fue posible distinguir los diferentes depósitos de cenizas provenientes de los volcanes de la Sierra Nevada, los cuales, se encuentran en las partes superiores de los depósitos laháricos.*

### 2.3.4 Barrancos

La zona de estudio cuenta con dos sistemas de barrancos bien definidos que drenan a las cuencas bajo estudio y que se describen más adelante.

La máxima altura en la que funcionan los barrancos, en la cuenca del Río Chapingo, es de 3440 m.s.n.m aproximadamente, y con un mínimo de 2341 m.s.n.m., en donde inicia su encausamiento artificial. La máxima altura para los barrancos de la cuenca del río San Bernardino es de 3100 m.s.n.m. y con una mínima de 2273 m.s.n.m. donde también se encausa artificialmente.

La pendiente media de los barrancos para ambas cuencas es de 32.5° pero existen pendientes desde los 0° hasta 60° y mayores que corresponden al área de las paredes de barrancos.

Los materiales que se observan en los barrancos son de tipo aluvial y coluvial en algunas zonas, sobre todo en el área del piedemonte superior. En las demás unidades es posible observar material de texturas más finas, correspondientes al aluvión. Eso se apreció en las presas de retención de sedimentos a lo largo de los cauces.

En la cuenca norte, la del río Chapingo, el sistema de barrancos se origina en la unidad de ladera montañosa y algunos nacen en la zona del lomerío. Estos barrancos son ramificaciones de valles muy amplios, en relación con los de la cuenca sur; éstos cuentan con amplitudes de hasta 400 m por 80 m de disección vertical o profundidad. Dichos parámetros son alcanzados por esta unidad en la zona de piedemonte superior, disminuyendo su energía erosiva (amplitud y profundidad de disección) en la unidad de piedemonte inferior. Esto indica que existe una mayor densidad de disección en la cuenca del Río Chapingo, que en la del río San Bernardino.

La cuenca sur, la del Río San Bernardino, tiene una red de drenaje que consiste en pequeños barrancos (conocidas localmente como “barrancas”, comunicación personal con el Ing. Benjamín Sánchez, 1998) que más que ensanchar las paredes de barranco, incidieron verticalmente, con amplitudes de hasta 25 m por 15 de disección. La mayor parte de estos barrancos son parte del sistema de drenaje de campos de cárcavas y de bad-lands que han actuado sobre esta zona y que posiblemente se formaron (los barrancos más pequeños de algunos metros de amplitud y disección) a partir de la degradación de tierras por erosión del suelo.

Ambos sistemas de barrancos son notablemente diferentes debido a la variedad de materiales sobre los que han actuado. Existe una similitud entre ambos sistemas en el

área en donde se originan, en donde inician su actividad erosiva, pues poseen amplitudes de valles similares pero los de la cuenca norte resultan más profundos. En el piedemonte inferior, gracias a la homogeneidad de materiales, los barrancos presentan morfologías similares en cuanto a amplitud y profundidad. Ambos cauces presentan encauzamiento artificial desde la parte baja del piedemonte inferior hasta llegar al lago artificial Nabor Carrillo, en el área basal del ex-lago de Texcoco.

Parte de los cauces principales en la parte del piedemonte inferior están interrumpidos o modificados por una serie de canteras establecidas a lo largo de éstos. En algunos casos se ha modificado su dinámica hidrológica superficial, por lo que restaría verificar si funcionan de manera subsuperficial y/o subterránea.

La cobertura que tiene esta unidad varía de acuerdo a su posición dentro de las unidades geomorfológicas. Dentro de la unidad de ladera existen coberturas de pastos y bosque muy abiertos hasta donde la pendiente los permite establecerse. En el piedemonte superior varían desde zonas de paredes reforestadas y terrazadas hasta vegetación “natural” de estas zonas húmedas. Algunas paredes no presentan cobertura y se aprecian tepetates expuestos por la erosión de suelos. Los barrancos dentro de la unidad del piedemonte inferior existen áreas sin cobertura aparente y en algunos casos también existen árboles plantados en terrazas, como resultados de los trabajos de reforestación.

### *2.3.5 Planicie aluvial*

Esta unidad está formada por material aluvial a lo largo de cauces y ríos principales y alrededor del vaso lacustre del ex-lago de Texcoco.

Esta unidad se encuentra entre los 2241 m.s.n.m y los 2262 m.s.n.m. Su pendiente media es 0° pero alcanza en algunas zonas 1 y 2°.

Esta unidad no presenta abanicos aluviales bien definidos pero existe un área homogénea en donde puede apreciarse un cambio de pendiente entre esta unidad y la planicie lacustre en su parte más baja (altimétricamente hablando) y en su parte más alta, se puede observar la zona de transición del piedemonte inferior a esta unidad. Un elemento para definir el límite de esta unidad es el uso del suelo al que está sujeta, pues presenta grandes extensiones de cultivo de riego lo que indica la presencia de suelos fértiles y profundos, característicos de las planicies de este origen. A medida que se extiende hacia la planicie lacustre, el cambio en la textura y coloración

(fotográfica) del suelo cambia notablemente. Los suelos en la zona lacustre presentan manchones blanquecinos, además de una escasa cubierta vegetal, explicado por los altos índices contenidos de sal.

## CAPÍTULO III. LEVANTAMIENTO DEL USO DEL SUELO

## 3.1 Introducción

México, al igual que otros países en vías de desarrollo, ha tenido en las últimas décadas un crecimiento acelerado de su población. Esto trae como consecuencia el constante incremento en la demanda de nuevas tierras para la agricultura. Ya que los terrenos planos son muy escasos por la predominancia de relieve montañoso, las zonas montañosas no aptas para la agricultura se transforman en fuente primordial de nuevos terrenos de cultivo. Siendo México un país montañoso, la agricultura sobre las laderas, es una actividad prácticamente inevitable y por ende necesaria. En relación con la erosión del suelo, el desmonte es con frecuencia la práctica agrícola más crítica durante la transformación de zonas vírgenes en tierras de cultivo. El desmonte mecánico puede provocar pérdidas de suelo hasta diez veces más que si fuera con prácticas tradicionales (Maass y García-Oliva, 1990).

El maíz, el principal producto agrícola del país, constituye una parte esencial en la dieta de los mexicanos, y es cultivado en todas las regiones del territorio durante gran parte del año. Desafortunadamente, el maíz no es un cultivo que conserve el suelo, por el contrario, dado su requerimientos de luz, agua y nutrientes, los individuos son plantados muy esparcidamente para evitar competencia entre ellos, y el suelo es frecuentemente desyerbado; esto produce una escasa cobertura vegetal y una mayor susceptibilidad al proceso erosivo. Por estos se considera al maíz como uno de los cultivos de surco más erosivos (Maass y García-Oliva, 1990). Debido a la gran importancia que tiene la relación entre uso del suelo y los procesos erosivos, es preciso tomar en cuenta a este factor como principal actor en la evolución de la degradación de los paisajes ya que se modifican las condiciones de cobertura del suelo (Bergsma, 1996).

## 3.2 Perspectiva histórica del uso del suelo de la zona de estudio

Para el análisis histórico fue necesario recurrir a fuentes que hablan acerca del Valle de Texcoco y sus alrededores pues son escasas las fuentes que se refieren al área de estudio en concreto; además, en términos de evolución histórica y de poblamiento las áreas contiguas a lo que es hoy la ciudad de Texcoco comparten los mismos eventos

históricos, pudiéndose referir a toda el área que hoy forma su municipio como a una sola unidad histórica (Córdova y Parsons, 1997).

Por razones históricas, el nombre de Texcoco se ha confundido con el de “Acolhuacan”, que para el año 1300 existía como un reino bien establecido. Este nombre se debe a que gran parte de su población pertenecía a los acolhuas, una de las “siete tribus nahuas” de afiliación Azteca (Enciclopedia de México, 1993; Córdova y Parsons, 1997).

Según Córdova y Parsons (1997) para el periodo que comprende el Formativo Tardío (550-250 a.C.) y el Formativo Terminal (250-150 a.C.) en la zona de lo que ahora se le conoce como la ciudad Texcoco y sus alrededores, empezaron a establecerse grupos semi-sedentarios en diversas unidades del paisaje. Estos asentamientos fueron muy importantes en cuanto a número, pero no se volvieron a repetir hasta la fase Azteca Tardía (1400-1500).

Para el periodo del clásico (150-750 d.C.) la población empezó a decrecer, por el importante crecimiento urbano que se dio en Tenochtitlán y que trajo consigo, la absorción de las pequeñas comunidades agrícolas que se encontraban establecidas alrededor de los lagos de la cuenca de México.

Entre los años 950 y 1150 d.C. hubo un proceso de repoblamiento en esta zona, que ocupó principalmente la parte que corresponde al piedemonte inferior texcocano (Córdova y Parsons, 1997).

A partir de este hecho, Palerm y Wolf (1961, *op. cit.* en Pérez, 1975) hablan del inicio de la formación del Reino de Acolhuacan y el cual se puede dividir en tres etapas como sigue:

#### I (año 1000 d.C.)

Xólotl (guerrero nahua), empezó a repoblar la región para el año 1012 (O’Gorman, 1975, *op. cit.*, en Ortiz, 1986) y Acolhuacan seguía siendo una zona secundaria después de la destrucción del imperio tolteca. Para el periodo Azteca Temprano (1150-1350 d.C.) se presentó un aumento poblacional muy importante, en lo que es al actual pueblo de Huexotla, que surgió como uno de los primeros centros urbanos con mayor importancia económica en la región (Córdova y Parsons, 1997).

Dentro de esta zona existían grupos toltecas-otomíes, con quienes los chichimecas se comenzaban a mezclar después de la destrucción de Tula. Mientras esto sucedía, los toltecas, que eran una vieja civilización, conservaban sus centros urbanos y su

agricultura de riego y chinampas en el sur y oeste del valle de México, sin permitir el establecimiento de otros grupos étnicos. Cuando los chichimecas llegaron a la zona de Texcoco, se encontraron con una sociedad bien organizada con grandes ciudades. Entonces establecieron una especie de *simbiosis* económica y política (de manera pacífica) con los pobladores de lo que sería el imperio de Acolhuacan. Esta convivencia se basó principalmente en la *distribución del territorio*, en donde los chichimecas, ocuparían principalmente las áreas del *pedemonte superior* y la zona de la *ladera montañosa* en la vertiente oriental del ex-lago de Texcoco; estos terrenos los reservaron los chichimecas únicamente para cacería.

Dentro de esta repartición territorial, los toltecas ocuparon la planicie aluvial y la zona de piedemonte inferior, terreno que se dedicaba a la agricultura ya que eran un pueblo esencialmente agrícola. Esta disposición se originó principalmente por que los chichimecas no eran una cultura agrícola, sino guerrera, por lo que ofrecían protección bélica a los agricultores a cambio de la producción de alimentos.

#### II (año 1200)

Las áreas repartidas no son suficientes para abastecer a los grupos que convivían, por lo que comienza un proceso de toltequización de los chichimecas por medio de un esfuerzo deliberado impuesto por el 1er Rey Texcocano, Quinatzin, para convertir a los chichimecas en agricultores. Este rey estableció medidas de protección diferencial para los cultivadores y para la gente que inmigraba que era de origen tolteca o toltequizada. Con estas medidas se entra en una crisis de conflictos internos, pero al resolverse, colocaría a Acolhuacan como una potencia dentro del Valle de México.

#### III (1300-1500)

Se consolida Acolhuacan políticamente después de la victoria de la coalición contra Azcapotzalco. En esta etapa termina la etapa de resistencia de los chichimecas a la toltequización, es decir a la culturización. Huexotla (situado en el *pedemonte inferior*) se desarrolla junto con otros asentamientos dispersos sobre los *pedemontes inferior y superior* alcanzando sus niveles máximos de población en el periodo de 1350 a 1520. Se cree que el incremento de la población se debió principalmente a las políticas de los reyes Texcocanos para recibir grandes flujos migratorios que arribaban desde regiones muy alejadas, como las tribus que provenían del sur de Oaxaca por ejemplo. Estas políticas recibieron gran impulso por el rey Techotlalatzin y Netzahualcóyotl (1359-1427) (Córdoba y Parsons, 1997). Es en este último periodo

donde comienzan los trabajos de desmonte para la agricultura en la zona de *pedemonte superior* y la urbanización de lo que es ahora la ciudad de Texcoco.

Como obra culminante de este periodo, se desarrolla un programa de trabajos de ingeniería hidráulica, que combinan el regadío por medio de canales y las terrazas de cultivo.

La etapa mas intensa de cambio de uso del suelo tuvo lugar bajo el reinado de Netzahualcóyotl, en donde se cambió la agricultura de roza y de temporal por una agricultura intensiva bajo sistemas de riego. En las zonas del *pedemonte superior* se encuentran, para esta época, las principales obras de riego y terrazas acompañadas de viviendas, lo cual indica que fue muy abundante la población que vivía del cultivo del maíz en esta unidad ecológica (Pérez, 1975). La obras del rey Netzahualcóyotl fueron muy importantes para el desarrollo de esta región, pues él mismo dirigió los trabajos para la producción de agua para su uso en las terrazas agrícolas, que aún hoy, están en uso en el cerro Teztzotzingo, al norte de la zona de estudio.

Estas obras demandaban de un conocimiento topográfico de alta precisión ya que se requirió de cortes y rellenos, aún en contrapendiente, para la construcción de los sistemas de acueductos para el regadío (Lugo *et al.*, 1998).



*Figura 3.1 Vista del acueducto construido por el Rey Netzahualcóyotl en el siglo XV (izq.), para conducir agua desde los manantiales en la parte alta de la sierra Tláloc y Telapón hacia las terrazas y jardines reales, en el cerro Teztzotzingo (der.).*

Algunas de las terrazas se construyeron sobre las laderas de antiguas estructuras volcánicas en el cerro Teztzotzingo, en donde han sido irrigadas desde periodos Aztecas Tardíos. De hecho, algunas de éstas fueron parte de los jardines reales del Rey Netzahualcóyotl (Córdova y Parsons, 1997).

Con la llegada de los españoles, para el año 1519 (s. XV) el sistema hidráulico estaba en su apogeo y la población había llegado a su más alto nivel en cuanto a número, en donde las porciones de los *piedemontes, superior e inferior*, se encontraban ocupados y en producción continua (Pérez, 1975). Pérez cita a Simpson y a Cook (1948) que dicen que el señorío de Texcoco tenía 450,000 habitantes para la llegada de los españoles al valle de México.

Después de la conquista española se crearon haciendas y las tierras del *piedemonte superior* texcocano se dedicaron al pastoreo de ganado menor, sustituyendo el uso de suelo agrícola de manera controlada a través del terraceo y el riego por terrenos de pastoreo incontrolado (Pérez, 1975), característico del modo de producción europeo de aquella época (Ortíz, 1986). Es en esta etapa en donde se comenzaron a intensificar los problemas de erosión del suelo. Otra consecuencia de la aparición de las haciendas españolas fue la pérdida de agua para las comunidades rurales que subsistieron, ya que se utilizó este líquido para las haciendas y sus terrenos de riego y para mover molinos de grano y batanes de lana. Esta última actividad, la producción de lana, para la elaboración de textiles, tuvo gran auge desde iniciada la colonización en la ciudad de Texcoco (Ortíz, 1986).

La población de Texcoco disminuyó considerablemente (Pérez, 1975) hasta un 40% de la que existía antes de la conquista, debido principalmente a las epidemias durante los primeros años de la colonia. Para el año 1610 la población disminuyó notablemente por las enfermedades europeas y la mayoría de las villas de los piedemontes superior e inferior habían desaparecido, solo algunas de ellas habían sobrevivido tal es el caso de Tequesquihuac y San Pablo Ixayoc (Córdova y Parsons, 1997).

La colonia trajo consigo la desaparición de gran parte del bosque de pinos (cedros) en la vertiente oriental de lo que era el lago de Texcoco: Ortíz (1986) dice que los niveles de explotación del bosque eran muy altos, ya que se comerciaban los troncos para la construcción de las viviendas de los conquistadores y colonizadores en los diferentes puntos de la cuenca de México; este autor comenta que el conquistador Hernán Cortés fue acusado por utilizar 6000 troncos de cedro para la construcción de su casa.

En el siglo XVII, según Ortíz (1986), la principal actividad de las haciendas de Texcoco, era la agricultura de cereales como el trigo, así como la manutención de ganado lanar y la obtención de carbón del bosque. Esta época también tuvo un impacto muy profundo por el uso de tecnologías inadecuadas para las condiciones del

medio ambiente. No fue sino hasta después de consumada la Revolución cuando las tierras de esta zona son repartidas a manera de ejidos para las comunidades que siempre estuvieron trabajando para las haciendas en la etapa anterior y posterior a la Independencia de México.

Con estos sucesos la repartición de la tierra solo había favorecido a pocas personas dentro del área. También con las leyes de baldíos decretada en el porfiriato, se contribuyó al empeoramiento de las condiciones de los terrenos agrícolas en estas zonas. De hecho, para 1960, a 35 años de la repartición agraria, algunos ejidos todavía se dedicaban a la explotación del bosque para subsistir, obtenían carbón, madera para construcción y palo de ahuejote para la manufactura de canastos (Pérez, 1975). También es posible encontrar que para estas épocas, algunas de las leyes de repartición y dotación de aguas todavía son vigentes desde que el Rey Netzahualcóyotl las implantó.

Para los años 60's también se registra la actividad de pastoreo de ganado lanar como actividad importante y que actualmente subsiste. Para 1973, se inician los trabajos formales de recuperación ambiental para manejo de suelo y agua que ha llevado a cabo la actualmente Gerencia del Lago de Texcoco (antes Comisión del Lago de Texcoco), para manejar y recuperar la vertiente oriental del Ex-Lago de Texcoco, lo que ellos reconocen como "zona de influencia" del ex-lago. Dichas acciones han consistido en la rehabilitación de suelo y agua mediante la reforestación de 5 mil hectáreas; el terraceo y subsoleo de casi 5 mil hectáreas y la construcción de 1205 presas de control de azolves (Arias *et al.*, 1990).

Dentro de la zona de estudio se han realizado, para 1990, la reforestación de muchos de los terrenos estériles que existían en la zona. El área de estudio forma parte de la zona "oriente" del área de influencia del proyecto. La zona oriente está formada por los ríos Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec. En esta área se han reforestado 2,114.82 ha de un total de 175.2 km<sup>2</sup> que mide la zona. De éstas, 73.4% se realizó sobre terrazas, 16.4% sobre zanjas trinchera o tina ciega, el 9.6% en cepas, y el 0.6% sobre subsoleo (IISACH, 1990). La mayoría de las terrazas modernas y abandonadas, en el área del piedemonte superior, son asociadas con sitios Aztecas o contienen abundantes artefactos de este periodo. Coexisten actualmente dos tipos de terrazas en el área: terrazas al contorno con muro de rocas, y las semiterrazas "metepantli" (del náhuatl: *metl*-magüey y *pantli*-línea), ambas han sido utilizadas

desde épocas prehispánicas (West, 1970; Evans, 1990 *op. cit.*, en Córdova y Parsons, 1997).

### 3.3 Resultados del levantamiento de uso del suelo de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino

Mediante el uso del SIG se procesó la información transferida de los ejercicios de fotointerpretación al fotomosaico digital. Se obtuvieron 9 categorías (ver cuadro 3.1).

*Cuadro 3.1 Tabla de las 9 categorías del uso del suelo de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino para 1997.*

Uso del suelo-cobertura del terreno	Superficie en ha
<i>Agricultura</i>	1100
<i>Zonas de recuperación</i>	964
<i>Bosque</i>	509
<i>Pastizales</i>	96
<i>Minas activas</i>	83
<i>Minas inactivas</i>	54
<i>Poblados</i>	306
<i>Cuerpos de agua</i>	1.5
<i>Áreas sin cobertura aparente</i>	27

Las áreas agrícolas representan un 35.1% del área total de la zona de estudio. Existen áreas dedicadas a la agricultura del maíz, avena y hortalizas. En la parte baja de la zona, sobre todo en las áreas hacia el oriente de Huexotla, existen áreas agrícolas de riego, las cuales producen 2 o 3 cosechas al año (Ing. Benjamín Sánchez, comunicación personal, 1998). Las áreas agrícolas del resto de la zona son parcelas de temporal. Existen en la parte media de la zona algunas terrazas agrícolas de origen prehispánico (conocidos como *metepantlis*) establecidas en las paredes de los barrancos y algunas en las cuales aún se siembra.

Las zonas de recuperación representan un 30.7% del total de extensión de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino. Dentro de estas superficies en proceso de recuperación del suelo y agua, existen fundamentalmente 5 tipos de obras: terraceo, zanja, zanja trinchera, zanja cepa y cepa. Las especies son principalmente eucalipto

(*Eucalyptus*), *casuarina* (*Casuarina equisetifolia*), pinos (*pinus montezumae*, *pinus radiata*, *pinus michoacana*), y cedros (*Cupressus lindelyi*). Existen evaluaciones acerca de los procesos de reforestación (sin especificación cartográfica sino más bien con resultados a nivel “zona oriental”: ríos Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec) acerca del estado actual y la evolución de las especies forestales ocupadas en la zona, en donde apuntan a un crecimiento positivo que solo está afectado por la mortalidad de las especies por plagas en un 27.8% en zona de bosque y un 13.4% en áreas de recuperación por plagas, extracción o incendio (IISACH, 1990). La cobertura forestal promedio en las zonas reforestadas, para 1990 era de 21.2% (IISACH,). El establecimiento de otras especies sobre zonas de recuperación fueron algunos pastos principalmente y leguminosas.

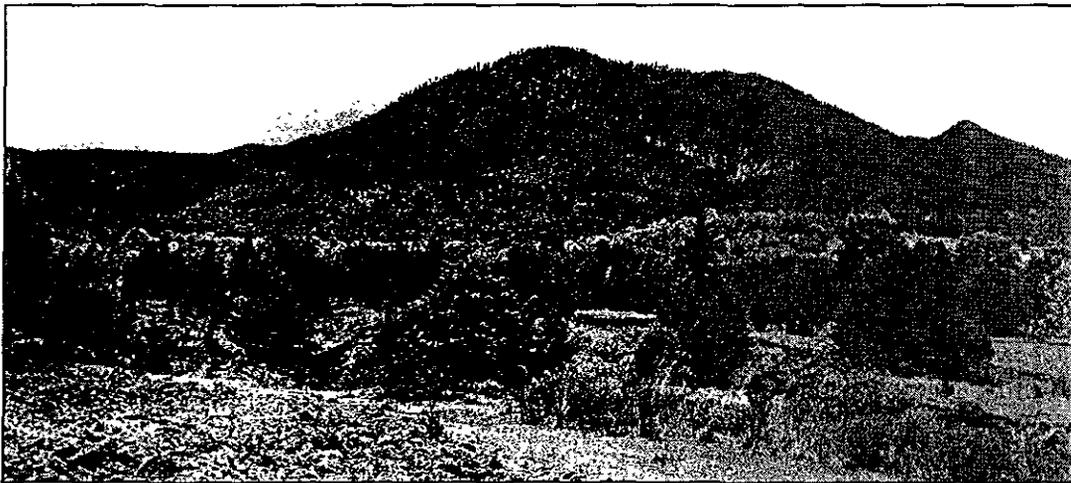
La zona de bosque representa un 16.2% del total del área de las cuencas. Dentro del área de bosque existen especies de coníferas como pinos, cedros (*cipressus*) y vegetación asociada más o menos conservada, tales como los pastizales.

Es muy importante resaltar que en los meses de mayo y junio, una serie de incendios forestales destruyeron gran parte del bosque existente en la zona, afectando sobre todo a especies arbustivas y en un menor grado a las arbóreas (aunque en algunos sitios, a ambas; observación de campo). Este tipo de siniestros que afectaron a las partes altas de la zona de estudio, representan un impacto perturbador probablemente irreversible para el bosque, y que se refleja en la pérdida de la vegetación, desprovveyendo al suelo de protección del viento y principalmente al agua, factores que provocan su transporte. Estas áreas son muy susceptibles a la erosión pues éstas se encuentran en las laderas montañosas, las cuales poseen fuertes pendientes del terreno. Haciendo una estimación sobre el área afectada se habla de entre 350 a 500 ha dañadas, como se aprecia en las fotografías de campo y en la visita al área (véase figura 3.2).

En algunas zonas los incendios no afectaron de manera importante a la vegetación, pues se observaron procesos de restablecimiento de especies arbustivas en las áreas afectadas junto con algunos árboles en donde se observó el desarrollo de hojas nuevamente. El incendio forestal afectó de manera diferencial al bosque: las laderas con exposición hacia el oeste y el sur, que presentaban un bosque menos denso y más abierto, fueron más afectadas que las laderas que se encuentran expuestas al norte y al este, en donde el bosque tenía mayor densidad de dosel con menor apertura. De hecho

la recuperación forestal actúa en función a esta exposición de las laderas y en base a las condiciones previas del bosque. Las laderas en donde se observa ya una cobertura de mayor densidad arbórea para octubre de 1998 son las expuestas hacia el norte y al este. Mientras que las laderas expuestas al oeste y al sur, el bosque se observa aún muy abierto y con poca densidad para la misma fecha.

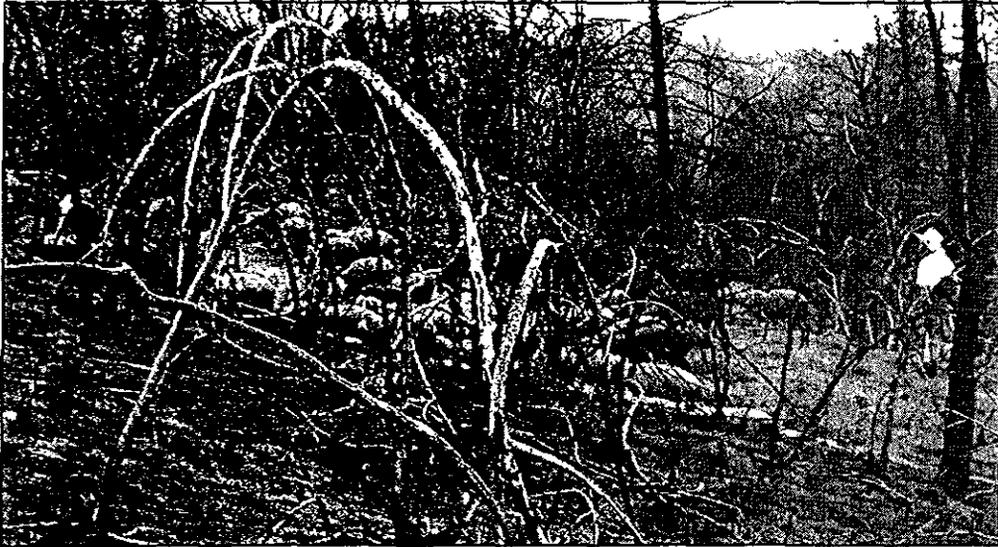
Es importante mencionar los trabajos de reforestación que se realizan dentro de esta zona afectada, como una respuesta inmediata a este tipo de fenómenos, aunque cabe decir también que, la introducción de brinzales no detendrá muchos de los procesos erosivos que remueven grandes cantidades de suelos una vez que ha comenzado la temporada de lluvias.



*Figura 3.2 Imagen en donde se observa la parte alta de la zona (parte superior de la fotografía) afectada por los incendios de los meses de mayo a junio de 1998. Las laderas están expuestas hacia el oeste, por lo que es posible observar la baja densidad arbórea de esta área.*

En cuanto a los pastizales naturales (zacatonales), la mayor parte de ellos también se encuentra en la parte alta, junto con el bosque de las superficies cumbreales de las elevaciones Tecorral y Tlapanco para la cuenca del río Chapingo y Tearco para la cuenca del río San Bernardino, y en algunas áreas de las laderas de las cuencas, en donde el bosque era menos denso. La extensión de los pastizales se limita a la existencia del bosque y una parte de ellos se dedica al pastoreo. La recuperación para los pastizales también se comporta de acuerdo a la regeneración del bosque, y la cual se comentó arriba, aunque existen factores que influyen en la velocidad de la recuperación, como el pastoreo no controlado (Figura 3.3). La renuencia del ganado menor a las áreas de pastizales afectadas por el fuego, puede contribuir al proceso de recuperación de esta especie, y de otras especies arbustivas asociadas al bosque.

Indirectamente, el hecho de no dejar crecer a la vegetación lo necesario para cubrir al suelo y protegerlo del poder erosivo de las gotas de lluvia y los escurrimientos, provocará paulatinamente una degradación irreversible en estas zonas por la pérdida del estrato. Por esta razón se remarca la importancia que tienen otro tipo de medidas “complementarias” a la reforestación inmediata (que se observó en campo), como lo es, el controlar y restringir, durante en un periodo suficiente, el pastoreo de ganado menor para permitir la regeneración de pequeñas especies vegetales.



*Figura 3.3 Después de los incendios, la población recurre a las áreas de pastos no afectadas por el fuego y a las áreas en donde existe algún tipo de especie arbustiva que pueda alimentar a su ganado. Este hecho influye en la velocidad de recuperación del área boscosa, sus pastizales y otras especies asociadas.*

En las partes bajas de la zona, en el *pedemonte inferior* se desarrolla la actividad económica de extracción de material para la construcción, a través de canteras a cielo abierto. Se extraen sobre todo arena y gravas. Estas minas se encuentran emplazadas en las orillas de los cauces de los ríos Chapingo y San Bernardino, modificando la dirección y la hidrología de éstos, de manera local. Las canteras se separaron por presentar actividad o no, pues existen 5 minas que han dejado de funcionar por problemas de tenencia de la tierra, o por problemas de producción y por la falta de un mercado seguro, según los testimonios de algunas personas durante los recorridos de campo. Sin embargo algunas trabajan para beneficio ejidal y algunas para particulares.

En cuanto a los poblados, como otra categoría de uso del suelo, se distinguen entre los más importantes, los de Tequexquihuac, San Luis Huexotla, San Mateo Huexotla,

Lomas San Esteban, La vía Láctea y las áreas de casas habitación contiguas a la Universidad Autónoma de Chapingo.

Los cuerpos de agua funcionan de manera intermitente y solamente los de la cuenca del río Chapingo funcionan durante todo el año. Estos embalses suman cinco en total, cuatro de ellos en la cuenca del Chapingo y uno en la del San Bernardino.

Existen áreas en donde no se aprecia cobertura alguna además de algunas áreas de las paredes de los barrancos. Estas zonas corresponden a tepetates expuestos, dentro de las áreas de reforestación, en el piedemonte superior, que es donde se aprecian los problemas más severos de erosión de suelo. Estas áreas representan un 1% del total de la zona pero son bastante extensas si se piensa en su esterilidad para ser utilizadas con algún tipo de uso.

La historia acerca del uso del suelo dentro de la zona refleja un uso intensivo de este recurso, desde hace más de 2000 años.

Es crucial la manera en que se han manejado las áreas agrícolas y forestales para entender la configuración actual del terreno. Resulta de gran importancia observar la respuesta del paisaje a los diferentes acontecimientos históricos, pues la concepción de sustentabilidad de los recursos naturales es opuesta para los dos principales modos de producción que han existido en el área: uno con un enfoque conservacionista y sostenible de producción intensiva (modelo prehispánico) y otro de uso extensivo sin medidas específicas de protección del recurso suelo (colonial capitalista y posterior de la colonia). Al parecer el factor que mayormente ha influido en la erosión de estas áreas ha sido el hombre y sus formas de utilizar los recursos de suelo, agua y vegetación. Estos factores en la utilización de los recursos pueden conjugarse con la dinámica geomorfológica en este tipo de ambientes, con presencia de suelos de origen volcánico, muy delgados, con horizontes subyacentes endurecidos altamente impermeables, con presencia de depósitos muy finos, sin el desarrollo de una estructura de suelo, altamente erodables, como es el caso de los depósitos de ceniza, más la posición geomorfológica y su pendiente predominante, y por supuesto, la presencia de un régimen de lluvia estacional. Por lo tanto, la influencia histórica y social más los procesos geodinámicos, se conjugan para dar una evolución negativa en el paisaje en un eje temporal específico. Ambos factores deben ser tomados en cuenta para el establecimiento de estrategias adecuadas de regeneración del suelo y de la vegetación en las áreas que aún se observen con problemas de erosión de suelos.

Es muy importante conservar los únicos suelos existentes en la zona y que se encuentran, la mayor parte de ellos, en las áreas agrícolas y en las áreas forestales. Los primeros, los suelos agrícolas son los últimos remanentes de grandes extensiones cubiertas por este estrato, de las cuales, las sociedades de diferentes etapas históricas de la región han subsistido en base a su explotación (exceptuando a las poblaciones actuales). Estos restos son los únicos indicadores que garantizarían (si es que aun poseen las propiedades suficientes) la supervivencia de la vegetación y por consecuencia, la recuperación de las condiciones ambientales del *pie demonte superior*. Aunque también cabe resaltar la importancia, tanto a las condiciones sociales y económicas (como las de tenencia de la tierra, por ejemplo) como las características geomorfológicas y físicas en general, del área de estudio.

Acercas de la ocupación del terreno para su recuperación, puede resultar de gran importancia evaluar y analizar las condiciones sociales, políticas y económicas de la población que se beneficiará con las obras de restauración para establecer estrategias que incluyan su pronta utilización como parte integral del funcionamiento económico de estas poblaciones urbano-rurales.

## CAPÍTULO IV. LEVANTAMIENTO DE EROSIÓN ACELERADA

## 4.1 Introducción

La erosión acelerada representa un fenómeno de degradación de tierras que se refleja potencialmente en la productividad de las mismas, así como en la modificación de las condiciones naturales de las áreas afectadas. Este proceso también implica problemas sociales y económicos más complejos, como la insuficiencia en la producción alimentaria a múltiples escalas. En México el suelo es el recurso más utilizado ya que sustenta a las actividades económicas como las agrícolas, ganaderas y de explotación forestal (Coll-Hurtado, 1993).

La erosión hídrica, la erosión eólica, la contaminación, la salinización, las inundaciones y los incendios, son algunos de los procesos que contribuyen al deterioro de los suelos en México. La degradación ambiental (o de la tierra, la cual implica a toda la superficie de la corteza terrestre no cubierta por agua, Bergsma, 1996) se refleja generalmente en la degradación del suelo y el deterioro de los paisajes naturales y su vegetación. Ésta trae consigo una alteración negativa en el balance hidrológico. La principal causa de la degradación ambiental por la erosión de suelos es la interferencia humana sobre el balance ecológico natural de los ecosistemas, a través de la sobreexplotación del agua y el suelo y por la intensificación del uso de los terrenos agrícolas (Bergsma, 1996).

Para el conocimiento acerca de la degradación del suelo existen dos caminos: el primero a través de las observaciones y estimaciones directas, y el segundo, a través de la interpretación de factores ambientales que influyen en dicha degradación. Los resultados obtenidos de forma directa a través de observaciones y cuantificaciones no son posibles de extrapolar a otros ambientes diferentes en el mundo, aunque sí, a algunos lugares con características muy similares. La interpretación de los factores que influyen en la degradación de la tierra y los parámetros que de ésta se derivan, se realizan con base en mapas temáticos. El riesgo de degradación de la tierra es estimado en relación a los aspectos físicos del medio ambiente: suelo, relieve y clima, tres factores inherentes que no pueden ser alterados de manera muy profunda por los seres humanos. El cuarto factor que actúa y que ha tenido el mayor efecto sobre la degradación de la tierra ha sido la interferencia del hombre a través del uso del suelo (Dudal, 1981).

Por lo tanto, las relaciones que guardan los procesos que han dado origen a los diferentes paisajes, con los que actualmente actúan sobre ellos, establece la posibilidad de analizar las relaciones generando así, resultados que pueden derivar en la conservación, manejo y recuperación de los paisajes degradados por procesos erosivos.

#### 4.2 Erosión acelerada y degradación

García-Oliva y Maass (1990) plantean que las principales *consecuencias* de la *erosión acelerada* son: la degradación del suelo y la degradación ambiental.

La *degradación del suelo*, según estos autores, consiste en la pérdida del sustrato, lo cual no solo implica la remoción del sostén físico de los cultivos sino además representa una pérdida en el almacén de nutrientes minerales del ecosistema\*. La alteración de las características físicas de los suelos afecta severamente a los cultivos durante su desarrollo. Por ejemplo, cuando disminuye la capacidad de infiltración del suelo, se reduce la cantidad de agua disponible en éste, afectando a los cultivos durante todas sus etapas de crecimiento. La pérdida de nutrientes y materia orgánica del suelo se traduce en una disminución de su fertilidad y afecta a la capacidad de infiltración, su habilidad para retener agua y nutrientes y su disponibilidad de materia y energía para el desarrollo de los microorganismos en el suelo.

La *degradación ambiental* se observa principalmente en el azolvamiento y contaminación de lagos y presas, reduciendo la capacidad de almacenamiento de agua y la generación de energía eléctrica. Se ha calculado que para México, anualmente se depositan 113.1 millones de toneladas de sedimentos en las obras de infraestructura hidráulica (Martínez y Fernández, 1983 *op cit.* Gracia-Oliva y Maass, 1990).

La degradación ambiental provoca también modificaciones del ciclo hidrológico, reduciendo la recarga de acuíferos y aumentando los volúmenes de escurrimiento superficial. La degradación ambiental provocada por la erosión es más significativa si se toma en cuenta la velocidad de recuperación o formación de suelo (en algunos casos, la formación de 3 cm de suelo tarda alrededor de 100 años) (Strahler, 1981).

Por lo anterior, la erosión acelerada implica modificaciones de las condiciones naturales de los lugares en donde se presenta; desde el punto de vista edafocológico, el movimiento del suelo por efecto de la escorrentía superficial es un proceso natural

---

\* Sistema compuesto de procesos físico-químico-biológicos que operan como parte de una unidad espacio-temporal (Maass y Martínez-Yrizar, 1990).

que se da prácticamente en todas las regiones del mundo. En los ecosistemas sin perturbar, los procesos formadores del suelo (pedogenéticos) compensan las pérdidas (edáficas) de éste, que son producto de la erosión hídrica, de tal forma que la cantidad de suelo se mantiene relativamente constante en el tiempo.

Los procesos de erosión hídrica se aceleran cuando el ecosistema es perturbado por causas naturales: ciclones, incendios, etc. o por actividades humanas: transformaciones para fines agropecuarios y silvícolas, construcción de infraestructura, etc. Frecuentemente, la erosión acelerada no puede ser compensada por los lentos procesos de formación del suelo, lo que causa paulatinamente el empobrecimiento de los ecosistemas.

En términos ecológicos, el grado de deterioro del suelo depende de la vulnerabilidad del ecosistema y de la magnitud de la perturbación. La vulnerabilidad del sistema depende de las características ambientales del sitio, como el clima y su intensidad de lluvias, el tipo de vegetación, el tipo de suelo, y el relieve. La perturbación tiene que ver la magnitud de la perturbación y el fenómeno perturbador, tanto su intensidad como su frecuencia. Así, mientras más vulnerable sea el sistema y mayor la magnitud de su perturbación, más severa será la degradación del suelo por efecto de la erosión hídrica y más problemática su recuperación (García-Oliva y Maass, 1990).

#### 4.3 Definición y tipos de Erosión

La erosión se define como el transporte del suelo (material superficial de la tierra) ya sea por flujo hídrico, por la precipitación pluvial, por el viento, hielo u otros agentes geológicos, incluyendo algunos procesos de desprendimiento, suspensión, transportación y movimientos de remoción en masa (procesos gravitacionales). Éste concepto no incluye al intemperismo (Bergsma, 1996).

El *intemperismo* es el proceso de desintegración, solución y cambio mineralógico de las rocas (Bergsma, 1982) y se da por la combinación de procesos mediante los cuales la roca es descompuesta y desintegrada por la exposición continua a los agentes atmosféricos (Strahler, 1981).

La *erosión geológica o normal* es un proceso natural que modela a la corteza terrestre por el transporte de material. Este material es muchas veces proporcionado por el intemperismo en el lugar (material *in situ*), o algunas veces por materiales depositados (sedimentos). Los procesos de erosión natural depositan el material intemperizado en

su posición original pero en otro sitio, en el cual, se pueden desarrollar los perfiles de suelo. Esto implica también que los suelos pueden desarrollarse a partir de materiales no intemperizados *in situ*. Por esta razón, la dinámica erosiva determina en muchos casos la distribución de los materiales parentales de los perfiles de suelo y por ende su desarrollo (Bergsma, 1996).

La *erosión normal* es usualmente lenta pero puede acelerarse bajo ciertas condiciones, como por ejemplo, las que se dan después de movimientos tectónicos, o movimientos de remoción en masa. Entonces se le conoce como *erosión geológica rápida*. Las proporciones de este tipo de procesos son comparables con las altas tasas de erosión que pueden ser causadas por la intervención del hombre a través de la agricultura, la construcción de caminos o los procesos de urbanización (Hudson, 1982).

La *erosión acelerada* es mucho más rápida que la erosión normal o geológica, y resulta principalmente de las actividades del hombre o en algunos casos de animales (Bergsma, 1996). La erosión geológica y la erosión acelerada involucran procesos muy similares y ambas resultan en la pérdida del material del suelo, pero difieren en cuanto a su génesis y velocidad (intensidad) y ambas destruyen el potencial agrícola (Lal, 1981; Bergsma, 1982).

Las *causa directa* de la presencia de la *erosión acelerada* es la escasa cobertura vegetal del suelo o su inexistencia, causada por el hombre. Este proceso de deforestación de los ecosistemas ha tenido un impacto muy importante en la temperatura a nivel local en todo el mundo, así como también ha causado grandes efectos negativos en los trópicos en donde se han sustituido las cubiertas vegetales (deforestación) originales para implantar grandes extensiones de cultivos o zonas de pastoreo. Este tipo de proceso se ha controlado en algunas zonas del mundo, pero en otras persisten y de hecho son muy intensos, ya que se encuentran en zonas densamente pobladas y con problemas socioeconómicos muy graves (Hudson, 1981).

La erosión acelerada es el problema más serio y menos reversible dentro de la degradación de la tierra y que afecta más significativamente en los trópicos ya que son ecosistemas muy complejos por sus cantidades de energía y nutrientes que utilizan para su funcionamiento (Swafy, 1981. *op cit.* en Bergsma, 1996; García-Oliva y Maass, 1990). Cuando se presentan los procesos de erosión acelerada, las tasas de formación del mismo son superadas por las tasas de pérdida o remoción de suelo y se atribuye principalmente al hombre y sus actividades (Evans, 1981). Los procesos de

erosión hídrica se aceleran cuando los ecosistemas son perturbados o alterados por causas naturales: ciclones, incendios, etc. o por actividades humanas: transformaciones para fines agropecuarios y silvícolas, construcción de infraestructura. Frecuentemente, la erosión acelerada no puede ser compensada por los lentos procesos de formación del suelo, lo que causa paulatinamente un empobrecimiento del ecosistema (García-Oliva y Maass, 1990).

El agotamiento de los recursos naturales de la tierra puede ocurrir si no es evitado por los nuevos avances tecnológicos y nuevas estrategias agrícolas, la pérdida del suelo. Podría decirse que la erosión acelerada y la civilización están relacionadas, ya que la erosión se convirtió en un aspecto significativo para la sociedad después de que se comenzó a cultivar la tierra. En algunos lugares, estas superficies agrícolas han sido totalmente destruidas (Hauck, 1980).

Existen otros términos y clasificaciones acerca de los procesos de erosión que son necesarios resaltar para su adecuada aplicación y en las cuales se integra un componente dinámico (niveles de erosión) y son utilizados para estudios de conservación.

Algunos otros conceptos y clasificaciones relativos a la erosión acelerada son, según Bergsma (1982) los siguientes:

La *erosión reactivada* es la erosión rápida que existió de manera local, la cual se activa o retorna al presente de manera más intensa debida a causas geológicas o antrópicas.

La *erosión estabilizada* se refiere a la erosión acelerada que ha sido reducida casi a los niveles de erosión normal gracias a la intervención, por medio de trabajos y obras de infraestructura, hechas por el hombre.

El *riesgo* o *peligro de erosión* es la probabilidad de que se presente en el futuro cercano, algún grado de erosión acelerada, debido principalmente al clima, al suelo, al relieve y al uso del suelo.

En el presente trabajo, los problemas de degradación, se han debido a los procesos de erosión acelerada hídrica. Por lo cual se abordan con detenimiento. Se definen algunos *conceptos, procesos y formas de erosión acelerada hídrica*, los cuales se consideran de mayor importancia por su papel que han jugado para el modelamiento de la zona de estudio. Dicho apartado incluye, en algunos casos, los conceptos básicos y terminología actualizada sobre la erosión de suelos y conservación.

La erodabilidad del suelo y la erosividad de la lluvia son dos factores físicos muy importantes que influyen en la magnitud de la erosión del suelo. La cuantificación de esos factores es básica para entender los procesos de erosión acelerada (Lal, 1988).

#### *Erodabilidad del suelo*

Es el efecto integrado de los procesos que regulan la aceptación de la lluvia y la resistencia de las partículas del suelo de ser separadas y subsecuentemente transportadas (Lal, 1988), esto es que, un suelo con erodabilidad elevada sufrirá más erosión que un suelo con erodabilidad baja si ambos están expuestos a la misma lluvia (Hudson, 1982). Esta propiedad de los suelos está determinada por sus características, como el tamaño y distribución de sus partículas, estabilidad de su estructura, contenido de materia orgánica y constituyentes químicos (Lal, 1988a). La erodabilidad del suelo puede variar con la estación de año y con el manejo de la tierra (Bergsma, 1996). Las clases texturales más susceptibles de ser desintegradas y transportadas del suelo son las arenas finas y los limos, como por ejemplo los loess (Lal, 1988a).

#### *Erosividad*

La fuerza de conducción de los agentes que causan la separación y desprendimiento de las partículas del suelo se le conoce con el nombre de erosividad (Lal, 1988a). La erosividad es la capacidad potencial de la lluvia y sus propiedades físicas para erosionar los suelos. En base a este hecho se pueden construir escalas numéricas de valores de erosividad (Hudson, 1982). La erosividad de la lluvia es atribuida en parte al impacto de sus gotas y en parte a la generación de escorrentía superficial. La erosividad de la lluvia es atribuida a su energía cinética o *momentum*, que es el producto de la masa y la velocidad, es la presión ejercida por la lluvia sobre el suelo, (Lal, 1988a). La erosividad variará con el tipo de lavado, que se caracteriza por la cantidad de clases de erosividad-intensidad alcanzadas por la lluvia, por la duración de los periodos de alta intensidad, por la variabilidad de la intensidad y por los periodos secos entre lluvias (Bergsma, 1996). La erosividad potencial de las tormentas y su escorrentía asociada es una función de la energía del caída de agua, la máxima prolongación de la intensidad y su interacción (Wischmeier, 1977, *op cit. en* Bergsma, 1996).

## 4.4 Escorrentía, procesos y formas

### 4.4.1 Escorrentía

La *escorrentía* es una porción de agua proveniente de la precipitación sobre un área determinada la cual no es absorbida inmediatamente por el suelo y corre sobre su superficie y es descargada a través de pequeños canales hacia otras áreas. La escorrentía incluye al flujo superficial (no concentrado), así como también al flujo concentrado como los barrancos. El área o la parte en la que el flujo se mueve o corre se llama *superficie de escorrentía*.

A la cantidad de agua que penetra en el suelo se le llama *escorrentía de filtración* o flujo subterráneo (Bergsma, 1996). Dentro de la ciencia del suelo, a la escorrentía usualmente se refiere al *flujo superficial* (Bergsma, 1982).

### 4.4.2 El flujo y la infiltración

El *flujo superficial* es aquella parte de la lluvia que fluye sobre la superficie de la tierra de manera no concentrada, y es muy poco profunda (Bergsma, 1996). El flujo superficial incluye a la erosión por *riles* (surcos o canalillos) y la erosión *entre riles* o erosión difusa (“erosión *entre rill*”), y no incluye flujos o canales permanentes como los de las cárcavas (Bergsma, 1996). El flujo superficial erosiona de manera acelerada a través del transporte de sedimentos ya que va desgastando o erosionando a la superficie de escorrentía debido, tanto a la turbulencia y a la gran velocidad que alcanza, como al material que transporta (Bergsma, 1996). La fuerza erosiva del flujo superficial, muchas veces está determinado por la cobertura vegetal (ver Figura 4.1).

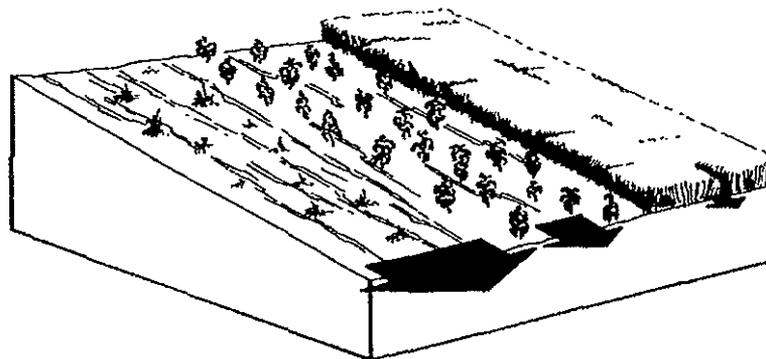


Figura 4.1 El flujo superficial y la importancia de la cobertura vegetal. El tamaño de las flechas indica la cantidad de flujo superficial que “sale” debido a las diferentes coberturas (tomado de Bergsma, 1996).

Cuando las gotas de la lluvia y la acción de los procesos de salpicadura influyen en el flujo superficial, se incrementa su capacidad erosiva ya que se incrementa la turbulencia en el flujo. Cuando el flujo superficial es más profundo que 3 veces el diámetro de una gota, el efecto de la erosión por salpicadura no lo afecta (Bergsma, 1996).

El *flujo hipodérmico* es un tipo de flujo subsuperficial el cual se mueve de manera lateral a la dirección de la pendiente y ocurre en la zona de aireación del suelo (Bergsma, 1996).

La *capacidad de infiltración* es la máxima cantidad de agua que puede entrar en el suelo bajo ciertas condiciones, incluyendo la presencia de un exceso de agua (Bergsma, 1996).

El flujo superficial puede ser principalmente de los siguientes tipos:

El *flujo superficial Hortoniano* consiste en la formación del flujo superficial debido a que la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Algunas veces ocurre solo después de algún tiempo transcurrido, durante el cual los procesos de sellamiento se desarrollan, entonces se le denomina *flujo superficial Hortoniano retrasado* (Bergsma, 1982).

El *flujo superficial de saturación*, se presenta cuando el suelo o su capa más superficial se encuentra saturada de agua y surge una crecida del flujo en el suelo; en este caso, la impermeabilidad del suelo juega un papel muy importante.

Ambos tipos de flujo superficial se presentan en diferentes partes del relieve y en diferentes ambientes.

La *infiltración* es el agua que penetra en el suelo dependiendo de la intensidad de la lluvia, de la macroporosidad del perfil del suelo, su estabilidad de agregados, la inclinación de la pendiente, la susceptibilidad al sellamiento y los antecedentes de uso y manejo del suelo; así como también las características de viscosidad y turbidez del agua. La infiltración puede incrementarse en relación del aumento de la macroporosidad del suelo. Esto se logra por medio de las labores de labranza adecuadas.

#### 4.4.3 *Encostramiento y sellamiento del suelo*

Los términos de *encostramiento* y *sellamiento* del suelo han sido usados de manera común como sinónimos. El término de sellamiento implica una fuerte reducción de la superficie porosa del suelo por agua y/o aire.

Encostramiento del suelo es una capa delgada y densa formada en la superficie del suelo y que se forma por el reacomodamiento de las partículas del suelo debido al efecto de la erosión por salpicadura, humedecimiento y depositación (Bergsma, 1996). Cuando se habla de *encostramiento* se refiere específicamente a una capa o estructura laminar de suelo en estado seco. Es una costra de suelo que se forma en su parte superficial, y mide en cuanto a su espesor de algunos milímetros hasta máximo 3 centímetros. Es una superficie muy compacta y muy dura cuando está seca. La presencia de este tipo de forma indica degradación actual de los paisajes (Dudal, 1981). El encostramiento disminuye la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Las costras se clasifican de acuerdo a su formación, composición, espesor, su función y su dinámica (Bergsma, 1996).

Cuando las costras se forman bajo la influencia de la salpicadura y la infiltración de la lluvia, la parte superior del suelo es texturalmente tosca; a esta costra se le llama estructural. Ésta se compone de granos finos depositados horizontalmente en capas compactas, dicho material ha estado “seleccionado” para después ser transportado por la escorrentía. Las costras son un producto de la interacción compleja de varios procesos físicos. Entre ellos cabe resaltar la compactación, la destrucción de agregados, la redistribución de partículas desagregadas y sus implicaciones químicas que presenten debida a dicha separación. El encostramiento y el sellamiento dependen de la “acumulación” de la energía cinética de las gotas de lluvia así como de su intensidad. Los principales efectos negativos del encostramiento son:

La reducción de la infiltración y por tanto menos humedad al suelo. La erosión por flujos laminares ladera abajo y formación de *riles*. Falta de aireación justo debajo de la costra. Para las labores agrícolas implica un mayor esfuerzo para preparar la tierra.

Entre los efectos favorables del encostramiento del suelo se encuentran la resistencia a la erosión eólica, la reducción del gasto económico para irrigación de áreas más extensas y la reducción de la erosión *entre riles*, ya que presenta mayor resistencia a las gotas de la lluvia. La “sensibilidad al encostramiento” es utilizada por FAO (1979) para cuantificar la degradación de la tierra, ya que ésta es determinante de la productividad del suelo.

En el *sellamiento* las gotas de lluvia compactan la superficie del suelo y el salpicamiento y el flujo de agua desprenden partículas del suelo; estos procesos pueden sellar las superficies con lo que disminuyen las tasas de infiltración (Evans,

1980) por lo que se incrementa la escorrentía y la erosión potencial (Bergsma, 1996). El sellamiento también se le considera como un proceso de compactación. El sellamiento del suelo está constantemente modificado durante la lluvia, el material derivado del lavado del agua se convierte en el sellador cuando la escorrentía se detiene (Gabriel y Moldenhauer, 1978 *op cit.* en Bergsma, 1996). El porcentaje de las fracciones más grandes de los agregados derivados del lavado y del salpicamiento disminuye a medida que transcurre *el tiempo* y las partículas finas se incrementan conforme éste transcurre. La reducción en la capacidad de infiltración del suelo se debe a la reducción de la macroporosidad del suelo. El sellamiento del suelo puede tener un importante lugar en el conjunto de factores que causa la erosión por la lluvia. Éste se considera junto con la precipitación, porosidad y estabilidad de agregados para realizar estimaciones de la erosión hídrica (Bork y Rhdenburg, 1981). Por otra parte, el flujo superficial es alterado por la gotas de la lluvia generando pequeños remolinos, evitan que se forme una *capa-sello* bien definida.

Un flujo de agua sobre la superficie de sellamiento puede ser rota en su parte superior o al menos reducida en cuanto a espesor, reduciendo también su efectividad. Por ejemplo, en el caso de un sistema de *riles*, la infiltración en el área *entre riles* es menor que la infiltración en los *riles* debido al efecto sellador del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo expuesto. En la superficie de los *riles*, la infiltración inicial es alta y rápidamente se reduce por la formación de una superficie de sellamiento; esto no siempre sucede, ya que si el agua es acumulada en una pequeña depresión, el agua acumulada sirve como interceptor de la energía cinética de las gotas de lluvia (Bergsma, 1996)

El sellamiento del suelo no es siempre evidencia la alta erodabilidad. La superficie de sellamiento es muy delgada en cuanto a espesor además de tener baja *rugosidad hidráulica* lo cual impide que se formen turbulencias en el flujo o arroyada. El decremento en la erodabilidad puede ser causado por la disminución de la rugosidad de la superficie (lo que genera un progresivo encostramiento).

Los suelos que son más susceptibles a el proceso de sellamiento son aquellos en donde fácilmente se pueden romper los elementos micro-estructurales por el impacto de las gotas de lluvia, es decir, aquellos que tienen altas pérdidas de material por los procesos de erosión por salpicadura. Estos suelos generalmente se componen de materiales finos como las arcillas y arenas finas, suelos que son susceptibles a la

licuefacción, y de arcillas dispersas y arcillas con gran capacidad de aumento de volumen por hidratación. La principal condición para que se selle el suelo es la falta de materia orgánica; este factor puede actuar solo o en combinación con: la fracción arcillosa con actividad reducida, alto contenido de limos, la abundancia de partículas finas y planas en la fracción arenosa. El efecto directo del sellamiento del suelo es la generación de una superficie mayor de escorrentía y por lo tanto mayor susceptibilidad a la erosión por *ríles*.

#### 4.4.4 Formas y procesos de erosión pluvial, como una categoría de la erosión acelerada (por agente generador)

La erosión generada por la lluvia es una categoría especial dentro de los procesos de erosión acelerada (Bergsma, 1982). La erosión por diferentes agentes como el hielo, viento, las corrientes como los ríos y las lluvias son llamadas erosión glacial, erosión eólica, erosión fluvial y erosión pluvial respectivamente (Toy, 1977 *op cit.* en Bergsma, 1996). Las categorías de la erosión se presentan en el cuadro:

CATEGORIAS DE EROSION  
(Según Toy, 1977; Carson y Kirkby, 1972)

Agente erosivo	Viento					Hielo	Gravedad
Categorías de erosión	Erosión eólica o por viento	Erosión pluvial y erosión fluvial	Erosión marina	Erosión costera	Erosión fluvial	Erosión glacial	"Erosión por movimientos en masa"
Formas de erosión o deposición	Dunas, coberturas de arena, deflación simple.	Decapitación Surcos, cárcavas		Terraza de acantilado	Ríos, escarpes, terrazas fluviales, barrancos.		Fallas, deslizamientos, deslizamientos rotacionales, flujos.

Cuadro 4.1 Categorías de la erosión por agente generador (tomado de Bergsma, 1996)

Las formas de erosión pluvial incluyen formas de remoción (desprendimiento y arrastre), transporte y deposición.

##### 4.4.4.1 Erosión por salpicadura (salpicamiento)

El rompimiento de la estabilidad de los agregados del suelo y de sus partículas pequeñas es causada por el impacto de las gotas de lluvia cuando éste se encuentra desnudo (Lal, 1988). Posteriormente las partículas desintegradas son esparcidas o removidas (salpicadas) por efecto de la salpicadura de las gotas de lluvia, éstas mantienen al material fino en suspensión, lo que facilita su acarreo por las aguas de escurrimiento, aunque este hecho puede o no ocurrir (Bergsma, 1982).

La disgregación de las partículas desintegradas del suelo se realiza a través del salpicamiento de las gotas de lluvia. Este proceso algunas veces provoca el sellamiento del suelo ya que la superficie porosa es rellenada por el material fino producido por la

desintegración y salpicadura del suelo (Bergsma, 1996). La energía cinética de la lluvia es altamente dominante de la energía del flujo superficial (Hudson, 1982). La salpicadura de las partículas del suelo puede causar su transporte en una dirección preferencial (hacia abajo) sobre una ladera con un ángulo de inclinación alto ( $> 5^\circ$ ). La reducción de la erosión por salpicadura puede ser reducida si se le aprovisiona al suelo de una capa interceptora de la energía cinética de las gotas de lluvia; en muchos casos se trata de una cubierta vegetal. La erosión por salpicadura es el proceso erosivo pluvial más crítico ya que es el principal proveedor de material erodable pues las partículas y elementos estructurales del suelo han sido convertidas en fragmentos transportables. La forma típica resultante de la erosión por salpicadura son los pedestales.

El efecto de la erosión por salpicadura varía con la intensidad y el tiempo de la lluvia. Aunque el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo y el efecto erosivo del flujo superficial se consideran como procesos por separado que pueden provocar erosión sobre el suelo, la interacción entre estos dos se combina e incide sobre la superficie a través del *lavamiento pluvial* (Bergsma, 1996). El *lavamiento pluvial* es la erosión provocada por la lluvia sobre formas del relieve que poseen algún grado de inclinación de la pendiente en el cual, el efecto de la erosión por salpicadura y el flujo superficial actúan juntos sobre una superficie homogénea. Esto ocurre cuando la energía del flujo superficial es bajo y se presenta en microcanales de pocos centímetros de profundidad (*microrriles*) (*idem*).

Las formas típicas de la erosión por salpicadura son los *pedestales*. Éstos son restos o remanentes de las formas superficiales de los suelos en un área erodada protegidos de la erosión por salpicadura y con una superficie formada por un cuerpo protector (que las “corona”), y que puede ser una superficie cubierta de vegetación o partículas del tamaño de las gravas. Los pedestales pueden estar bordeados por escarpes (Bergsma, 1996).

#### 4.4.4.2 Erosión en canales o canalillos (en adelante *riles*).

Un *ri/o* canalillo es un canal lineal no mayor de 30 cm de profundidad, creado por un “corte” de la escorrentía o formado por el colapso de algún túnel, con flujo durante e inmediatamente después de la lluvia y delimitado por pequeños escarpes laterales cuando son recientes. (Bergsma, 1996). Los *riles* pueden ser eliminados por las operaciones normales de labranza, característica que los distingue de los barrancos y

cárcavas (Kirkby, 1980). Los *riles* sólo afectan la profundidad de la capa arable del terreno (Bergsma, 1982). Los *riles* se desarrollan típicamente por el efecto de una fuerte tormenta sobre superficies de suelo expuestas, tales como las superficies recién labradas o lugares en donde se realiza la construcción de infraestructura y zonas en donde han ocurrido procesos de remoción en masa (Bergsma, 1996). Los *riles* no solo permiten el transporte de grandes cantidades de sedimentos sino que también proporcionan gran cantidad de sedimentos provenientes de las zonas entre un *ril* y otro, es decir de las áreas *entre riles*.

El número de *riles* que se forman en una superficie determinada puede variar ampliamente, dependiendo esta variación sobre todo de la irregularidad de la superficie del terreno y de la cantidad y la velocidad del escurrimiento (FAO, 1979). Cuando los *riles* cambian de dirección periódicamente sobre una superficie, se dice que ocurre un *lavado por riles*.

El patrón de drenaje de los *riles* generalmente es dendrítico y paralelo. El patrón dendrítico es controlado por la pendiente o por superficies de cultivo con morfología convexa (Bergsma, 1996). El patrón dendrítico es controlado por la microtopografía.

Principalmente en áreas agrícolas, una vez que el sistema de *riles* ha adquirido un desarrollo considerable, la erosión *entre riles* se presenta (actúa en las zonas *micro-interfluviales* de los *riles*) (FAO, 1979). Este tipo de proceso se le conoce con el nombre de *erosión entre riles* (entresurcos) (Bergsma, 1996). En las zonas *entre riles* actúan los mecanismos de erosión por salpicadura y el de lavado laminar que se da por la presencia de *pre-riles* (*microrriles*) de menos de 3 cm de profundidad (Bergsma, 1996).

Los *pre-riles* (pre-canalillos) son *canalillos* muy poco profundos, no mayores de 3 cm. Tienen poca capacidad de transporte de sedimentos y agua, pero su flujo es muy efectivo para la remoción de material por volumen de agua, más aún que la erosión por *riles* (Bergsma, 1982). Los *pre-riles* “trazan” las rutas de incisión que posteriormente seguirán los *riles*. Los *riles* tienden a erosionar verticalmente sobre el suelo, propiedad que los distingue de los *riles* trenzados (*braids*), que tienden a ensancharse (socavar lateralmente). Esto ocurre con las lluvias moderadas. Los *riles* trenzados presentan en su interior formas de erosión y zonas de depositación. Estas formas de erosión llegan a medir de 1 a 3 m de ancho y en los cuales el transporte y la depositación dominan por encima de la incisión. Cuando existen sistemas de *riles*

trenzados bien desarrollados se dice que existe un lavado por *riles* trezados (Bergsma, 1996). Esto ocurre frecuentemente cuando las tormentas muy fuertes inciden en los suelos expuestos sobre pendientes moderadas ( $< 10^\circ$ ).

#### 4.4.4.3 Erosión laminar

El lavado laminar, en áreas agrícolas, solamente ocurre en donde el flujo del agua es generalmente ilimitado, en donde no existen terrones ni microrrelieve que impida que actúe un lámina uniforme de agua, pero, casi siempre, los flujos laminares son más bien sistemas de microrriles en las *micro-interfluviales* de los *riles* (Evans, 1980; Bergsma, 1996). En las áreas intertropicales, el flujo laminar ocurre bajo condiciones de saturación del suelo supeditado por las características de las tormentas de duración e intensidad ( comunicación personal con el Dr. López-Blanco, 1998). En estas mismas zonas, el mantillo es importante para la formación de una superficie homogénea por medio de la nivelación del microrrelieve, lo que propicia flujos laminares homogéneos que trabajan a lo largo de las.

La erosión *entre riles* es llamada formalmente *erosión laminar*, e indica una remoción de una capa uniforme del suelo, a través de la salpicadura y los microsurcos. El término de erosión laminar no es del todo correcto ya que se tiene la impresión de que es una hoja o lámina homogénea de flujo la que actúa sobre la superficie y esto, raramente se presenta en la realidad (Bergsma, 1996) ya que los terrenos agrícolas están condicionados a una microtopografía casi lisa por los trabajos de labranza, además de que tienen pendientes no uniformes en la gran mayoría de los casos. En algunos experimentos se comprobó que la erosión *entre riles* puede aportar hasta el 80% de los sedimentos y que, posteriormente, los *riles* se encargaran de acarrear (Bergsma, 1996). El poder desintegrador de partículas del suelo de la erosión *entre riles* es equivalente a la energía cinética de la lluvia y su capacidad de transporte es directamente relacionada con la velocidad del flujo superficial. Los resultados de la erosión laminar se aprecian frecuentemente en terrenos inclinados con manchas de suelo de color claro (FAO, 1979).

Los *riles*, teóricamente representan una etapa de transición hacia la formación de cárcavas. Los *riles* se mantienen si el flujo superficial es limitado y si la intensidad de las lluvias es baja; además, si los suelos son altamente permeables y presentan resistencia a la incisión. Los *riles* se vuelven “permanentes” si los materiales inestables (arcillas) no permiten profundizar la incisión por medio de

micromovimientos de remoción en masa (Bergsma, 1996). El desarrollo de los *riles* hacia cárcavas se da cuando se presentan procesos de desintegración o disgregación de las zonas *entre riles* resultando en la fusión de los *riles*, aunado o provocado por un rompimiento de pendiente en donde los *riles* se desarrollan en *riles maestros* (éstos son un tipo de erosión lineal) y gradualmente se convierten en cárcavas. Este proceso de concentración del flujo varios *riles* a un solo *ríl* maestro va generando varios sistemas de *riles maestros* que muy seguramente se convertirán en cárcavas y pequeños barrancos (Leopold, 1964. *op. cit.* en Bergsma, 1996). Cabe resaltar que lo anterior es un conjunto de procesos lineales para la formación de cárcavas, más sin embargo, la influencia de diferentes actores, como las características de los materiales subyacentes de los suelos, la geomorfología en la que se presentan, las características de las lluvias, la cobertura del terreno (uso del suelo), entre otros, hacen de la formación de las cárcavas un proceso altamente complejo (Bocco, 1990).

#### 4.4.4.4 Erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas es un proceso en el que el agua se concentra en canales muy estrechos (Bergsma, 1982) y en cortos periodos, se remueven grandes cantidades de suelo resultando incisiones en canales muy profundos que van desde los 30 cm hasta los 20 m de profundidad (Bergsma, 1996). Las cárcavas disecan los terrenos en secciones irregulares, haciéndolos imposibles de labrar y crecen continuamente (FAO, 1979). Una *cárcava* es un canal o un valle miniatura cortado por el flujo superficial o escorrentía concentrada y funcionan en combinación con algunos procesos en las cabeceras, usualmente durante e inmediatamente después de las tormentas (Bergsma, 1996). Los procesos que ocurren a lo largo de las cabeceras generan su regresión (remonte), tales procesos pueden ser alguno o la combinación de, la caída de bloques (paquetes) de suelo, microdeslizamientos provocados por la salida del flujo subsuperficial en la cabecera, asentamientos en la cabecera y áreas circundantes, también por el tránsito de flujo subsuperficial (Bocco, 1990). Por lo anterior podría decirse que las cárcavas combinan procesos netamente fluviales, en las superficies de los canales principales, y en las partes de las cabeceras, procesos de remoción de material a través de microdeslizamientos, asentamientos, caída de paquetes de material que provocan su retroceso convirtiéndose en erosión superficial y no únicamente, fluvial.

Las cárcavas no pueden ser removidas o eliminadas por las actividades normales de labranza. Las cárcavas pueden desarrollarse como enormes *riles* pero su génesis y funcionamiento es mucho más complejo (Morgan, 1979. *op cit.* en Bocco, 1990). Imeson y Kwaad (1980. *op. cit.*, en Bocco, 1990) sostienen que las cárcavas son formas del paisaje que crecen rápidamente y se desarrollan cuando el umbral geomórfico es transgredido por el decremento en la resistencia de los materiales o en el incremento de la erosividad de la escorrentía, o ambos. La *cabecera de la cárcava* se encuentra en su límite superior, en donde el flujo superficial concentrado, proveniente de las partes situadas topográficamente por encima de ella, entra o cae en la cárcava (Houghton y Charman, 1986. *op. cit.*, en Bergsma, 1996). La *formación de las cárcavas* puede ser el resultado de la incisión del flujo superficial junto con asentamientos de suelos provocados por la acción del flujo subsuperficial (Bergsma, 1996, Bocco, 1990). Las cárcavas pueden originarse también por un colapso de túneles en donde el flujo concentrado corre a través del antiguo túnel incidiendo paulatinamente hasta formar una cárcava (Bergsma, 1996). El patrón de drenaje de las cárcavas puede ser dendrítico, paralelo y/o subparalelo.

Por otra parte, los *túneles* se forman cuando se crean tuberías “naturales” en el suelo u otros materiales no consolidados; se originan por eluviación u otros procesos de erosión subsuperficial. Dentro de estas tuberías la velocidad del flujo es mucho más rápida que el del flujo superficial, se han registrado valores hasta de 1 m/s (Parsons, 1988). Algunos bad-lands y cárcavas se forman por los colapsos de los túneles; su influencia puede llegar a modelar laderas completas. Obsérvese Figura esquemática 4.2 en donde se combinan la formación de túneles con la formación de cárcavas.

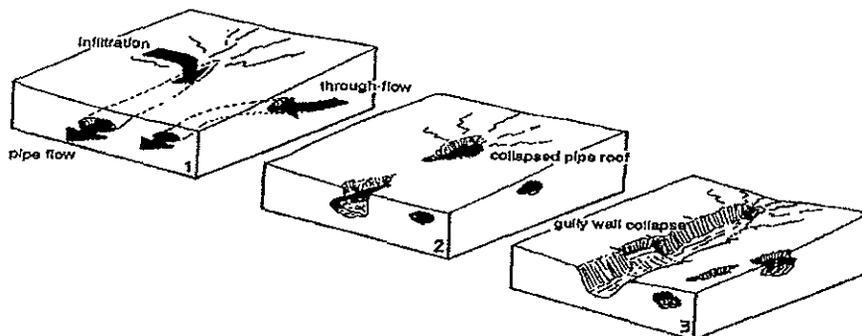


Figura 4.2 Erosión en túneles con desarrollo de erosión por cárcavas (tomado de Bergsma, 1996)

La intensidad de erosión y la amplitud de las cárcavas guardan una íntima relación con la cantidad de agua de escurrimiento y su velocidad (FAO, 1979). Las cárcavas varían de profundidad y forma, dependiendo el tipo de suelo, la geoforma en las que se encuentran y el régimen hidrológico de la cuenca de captación a la que pertenecen (Bergsma, 1996). La intensidad de la erosión en cárcavas está regulada además por su tamaño y su forma, así como también por su inclinación de la pendiente de su fondo (FAO, 1979). La profundidad (de disección) de la cárcava puede estar relacionada con el diámetro de la anchura o viceversa, y la sección transversal puede ser en forma de “U” o “V” (Houghton y Charman, 1986. *op. cit.*, en Bergsma, 1996).

Cuando una cárcava presenta una profundidad de disección mayor a 20 metros se le llama *barranco* (Soil Cons. Soc. Am., 1982; *op. cit.*, en Bergsma, 1996).

Las cárcavas representan procesos de *erosión remontante* en dirección hacia donde se dirige la incisión principal, es decir, remonta o retrocede hacia la dirección de donde se concentra el flujo y hacia la dirección de donde proviene el flujo. También se reconoce la propiedad remontante debido a los asentamientos y por la caída de paquetes homogéneos de suelos en los límites superiores de las cabeceras, lo cual implica la remoción “areal” (superficial) de material y su ensanchamiento en periodos muy cortos. Este proceso puede acentuarse por los efectos de la erosión laminar y por los de salpicadura. (Bergsma, 1996). Por lo tanto, pequeños y grandes movimientos de *remoción en masa* pueden contribuir al crecimiento en cuanto a superficie, de las cárcavas, principalmente en su cabecera: se generan asentamientos por flujo subsuperficial en la parte más alta causando inestabilidad, éstos accionan los movimientos en masa.

Con respecto a los movimientos de remoción en masa, implican el movimiento de suelo y/o material rocoso bajo la influencia de la gravedad, éstos no forzosamente implican la acción del agua, hielo o aire (Daniels y Hamer, 1992). Estos movimientos pueden resultar en la destrucción de la vegetación y en la preparación del material del suelo para ser transportado e incrementar el tamaño del área de captación de la cárcava (Verstappen, 1983). Los movimientos están muy limitados por la susceptibilidad del tipo de rocas y tipo de suelo. La cuantificación del material que se pierde por remoción en masa es muy difícil de estimar con precisión (Verstappen, 1983).

Las *cárcavas* se pueden *clasificar*, según Bergsma (1996), de acuerdo a:

- a. Extensión del acarcavamiento por unidad de superficie
- b. Profundidad de la cárcava
- c. Forma de la sección transversal de la cárcava
- d. Patrón de drenaje de la cárcava
- e. Gradiente del canal
- f. Edad o estadio de desarrollo
- g. Area de drenaje
- h. Riesgo de extensión del acarcavamiento
- i. Necesidades de conservación
- j. Posibilidades de control

a. Extensión del acarcavamiento por unidad de superficie

Las *cárcavas* pueden ser cuantificables con respecto al área donde se presentan, y se puede realizar por medio la fotointerpretación y el mapeo. El establecimiento de alguna clasificación de la extensión del acarcavamiento se debe dar cuando ya se ha establecido la intensidad de la erosión y correlacionado con otros parámetros como las características de las lluvias, la erodabilidad del suelo, inclinación de la pendiente, concentraciones de flujo sobre el relieve y cobertura del terreno (Bergsma, 1996).

b. Profundidad de la cárcava

Con el incremento de la profundidad de las *cárcavas* se dificulta significativamente el manejo de la tierra así como también se incrementa la pérdida de superficie cultivable y volúmenes considerables de material. Las clases de profundidad de las *cárcavas* pueden ser las siguientes (ver cuadro de clasificación 4.2) (Schwab, 1966. *op. cit.* en Bergsma, 1996):

*Cárcavas poco profundas*, de 20-30 cm hasta 1 m . Este tipo de *cárcavas* se originan con lluvias muy fuertes (tormentas) y en pendientes inclinadas; se desarrollan en cañadas o lechos de flujos concentrados.

*Cárcavas profundas* de 1 hasta 5 m. Este tipo de *cárcavas* también pueden darse bajo las mismas condiciones que las anteriores y su incisión puede llegar hasta el horizonte "C".

*Cárcavas muy profundas* de 5 hasta 20 m. En este tipo de *cárcavas* han afectado a gran parte del terreno por su extensión y energía erosiva incidente.

*Barrancos* más profundos de 20 m, asociados generalmente con caída de bloques, deslizamientos y pueden cortar en materiales blandos y típicamente en roca.

Cuadro 4.2 Tabla de clasificación de las cárcavas por criterios morfométricos de incisión (tomado de Bergsma, 1996).

Poco profundas	Profundas	Muy profundas	Autor
< 1 m	1 - 5 m	> 5 m	Schwab, 1966
< 3 m	3 - 9 m	0 > 9 m	Narayana y Sastry, 1985
< 1.5 m	1.5 - 3 m	> 3 m	Houghton y Charman, 1986

c. *Forma de la sección transversal de la cárcava*

La sección transversal de las cárcavas se relaciona con su estadio o etapa de desarrollo y se caracteriza por tener diferente balance entre la reducción superficial (remoción del material del suelo hasta el lecho rocoso) y la incisión.

Sección transversal en forma de U

Sección transversal en forma de V

Cuando se presenta un tipo combinado de ambas formas indica la presencia de erosión diferencial debida a la existencia de diferentes materiales. Las cárcavas con morfología de su sección transversal en U se hallan con frecuencia en las regiones de loes y en los valles aluviales, donde el suelo y el material subyacente se erosionan fácilmente (FAO, 1979).

d. *Patrón de drenaje de la cárcava*

Los sistemas de cárcavas, pueden presentar un patrón de drenaje de tipo dendrítico o paralelo, éste se determina por la inclinación de la pendiente, las prácticas agrícolas y el substrato rocoso.

e. *Gradiente del canal*

De acuerdo a la capacidad erosiva del flujo de la cárcava, aunque el volumen del flujo es algunas veces muy grande en cárcavas pequeñas.

f. *Edad o estadio de desarrollo*

Actualmente pueden reconocerse, en términos generales, 4 etapas de desarrollo (o estadios) de las cárcavas

El inicial, en donde se concentra el flujo superficial en *riles* incipientes

La etapa de incisión, se consideran como cárcavas jóvenes.

La etapa o estadio de maduración, en donde las paredes erosionadas de las cárcavas empiezan a caer (ensanchamiento de cárcava), (Bergsma, 1996).

La etapa de estabilización, en el cual, la vegetación comienza a establecerse y comienza la formación de suelo.

*g. Area de drenaje*

Las áreas de drenaje de las cárcavas pueden incrementarse rápidamente a través de un crecimiento acelerado cuando la escorrentía ocurre.

*h. Riesgo de extensión del acaravamiento*

Es el riesgo de que la erosión por cárcavas se extienda a otras áreas en un lapso de tiempo inmediato y se puede basar en varios criterios (ver Bocco, 1990).

*i. Necesidades de conservación*

Las necesidades de conservación dependen del riesgo de este tipo de proceso y de acuerdo a las condiciones específicas de las áreas que pueda afectar, se pueden establecer algunos rangos de acuerdo a diferentes usos de la tierra.

*j. Posibilidades de control*

El control de las cárcavas depende de qué tan bien se tengan evaluadas las posibilidades que brindan algunas tecnologías para los trabajos de recuperación y control y que además, determinen el tipo de utilización de la tierra y el sistema de agricultura, para revertir y controlar la erosión en cárcavas, junto con el contexto social y económico en donde se presente.

#### 4.4.4.5 Barrancos

Es una incisión vertical muy estrecha más grande que una cárcava pero menos que un valle y usualmente se forma por un flujo de agua concentrado (Bergsma, 1996). Los barrancos se forman generalmente en material incoherente o fácilmente erosionable, como los loes, tobas y conglomerados. El cauce muestra un perfil longitudinal accidentado y predominan los procesos de erosión vertical y remontante (Lugo, 1989). Los barrancos, dentro de los procesos de erosión acelerada, son formas erosivas que provienen de cárcavas y en algunas ocasiones, su anchura es equivalente a su profundidad, con paredes muy escarpadas; esta forma es característica de erosión geológica rápida o de erosión acelerada (Bergsma, 1982). El principal trabajo erosivo de los barrancos es la incisión vertical combinados con procesos de erosión remontante en algunas zonas, pero básicamente, dentro de este trabajo, los barrancos son definidos, más que por criterios morfométricos de profundidad, por funcionalidad

predominantemente fluvial de incisión vertical, ya que a diferencia de las cárcavas en donde se presentan procesos fluviales en los canales de drenaje y procesos de remoción en las cabeceras (erosión areal o superficial), los barrancos erosionan preferentemente de manera lineal.

#### 4.4.4.6 Bad-lands

Es una porción de tierra, generalmente agrícola, destruido por erosión, disecada por acaravamiento (Bergsma, 1982). Es un área estéril degradada por profundos barrancos, crestas agudas y pináculos resultado de severos problemas de erosión en materiales blandos fácilmente erosionables (Bergsma, 1996). Cuando éstos se encuentran en alguna ladera o cima montañosa se les llama *lavakas*, su cabecera es abrupta y sus depósitos son en forma de abanicos de arenas y coluvión.

#### 4.4.4.7 Sedimentación

La sedimentación es un proceso resultante de la esorrentía, no un proceso erosivo, es más bien, una consecuencia de los procesos erosivos. El material del suelo es desplazado de su lugar original por la erosión y se deposita en otros sitios. Puede ser depositado cerca de su lugar de origen o puede hacer un máximo recorrido y acabar depositándose en el mar (FAO, 1979). Los procesos en los que los materiales del suelo son transportados a nuevos lugares por la esorrentía se llama depositación y se presenta cuando se reduce la capacidad de transporte de ésta (Bergsma, 1996). La depositación toma lugar cuando decrece el gradiente de la pendiente de las vertientes, en donde la velocidad del flujo disminuye o es detenido por la vegetación o por la rugosidad de la superficie o en donde se presenta alto nivel de infiltración, por ejemplo en los depósitos aluviales de los barrancos. Las formas de los depósitos pueden ser coluviales, con la presencia de un área de disección y con la presencia de procesos de lavado pluvial y gravitacionales de aluvión como los abanicos de los ríos y los de las cárcavas; y aluviales por la decantación del material de la esorrentía como la formación de levees y cuencas (Bergsma, 1996).

#### 4.5 Resultados del inventario de erosión acelerada de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino

Es importante mencionar que por efectos del método que se utilizó para la construcción del mapa base de este trabajo, es decir el mosaico fotográfico digital, se incluyeron las áreas adyacentes a las cuencas en estudio. Esto se explica porque en el momento del ensamble de las fotografías digitales no fueron tomados en cuenta los límites exactos de las dos cuencas de los ríos (divisorias de aguas), por lo que, se incluyó a la información contigua a las divisorias de aguas, tanto la norte como la sur. Estas áreas fueron principalmente, las superficies de las divisorias de aguas con los ríos Texcoco al norte y Santa Mónica al sur. Por esta razón, en el momento de *cuantificar las superficies* que ocupan cada una de las unidades del mapa de erosión acelerada\*, se separaron tanto las áreas que hidrológicamente pertenecen o forman parte del área de las cuencas, como el total de ellas, es decir, más allá de las divisorias de aguas, (que corresponde al cubrimiento del fotomosaico digital).

##### 4.5.1 Unidad de Mapeo: cárcavas

Uno de los procesos de erosión acelerada de más rápido crecimiento son las cárcavas. En la zona de estudio, en general, las cárcavas se presentan en los límites o bordes de las áreas agrícolas que aún funcionan como tales, así como también inciden junto a remanentes o restos de lo que fueron campos de cultivo. Estos rasgos de erosión también inciden en los bordes y al interior de las zonas de recuperación, amenazando su estabilidad y permanencia. El resultado del levantamiento de la unidad de cárcavas se expresa en el Cuadro 4.5.1.1.

*Cuadro 4.5.1.1 Resultados del levantamiento de erosión; unidad cárcavas.*

Cárcavas	Superficie en ha.	Pendiente en°
Dentro del área de las cuencas	20	2-11
Area "fuera" de las cuencas	23	2-11

En general las cárcavas de la zona de estudio, presentan secciones transversales con transición de forma V a forma U; esta característica habla de la transición de

\*La cartografía correspondiente al "inventario de erosión" puede consultarse en la parte final del presente trabajo dentro del anexo cartográfico. Estas unidades se encuentran insertas en el mapa resultante de este estudio.

materiales sobre los que se han desarrollado estos rasgos. Los sistemas de cárcavas se presentan en campos muy grandes (alrededor de 4 ha el mayor de ellos) y también existen en sistemas relativamente más pequeños, tanto en los bordes de áreas agrícolas como de áreas de recuperación. Dentro del área de la cuenca del río Chapingo, existe un sistema de cárcavas en la zona centro-oriente con una extensión aproximada de 4 ha. Este sistema se encuentra interconectado con otros sistemas más pequeños por medio de pequeños cauces o barrancos, es decir, formas de erosión puramente fluvial (Figura 4.5.1.1).



Figura 4.5.1.1 Segmento del fotomosaico digital con los sistemas de cárcavas en la zona centro-oriente del río Chapingo.

Dichos sistemas inciden sobre los límites de las áreas agrícolas y áreas de recuperación (parte superior de la imagen). La profundidad que alcanzan las cárcavas desde sus cabeceras hasta el nivel de base inmediato (local) varía desde los 4 o 5 m hasta más de 10 m. Por lo tanto, según la clasificación de Schwab (1966) las cárcavas de esta zona quedarían clasificadas como *profundas y muy profundas*.

En este sistema (de la imagen de arriba), las cárcavas tienen perfiles transversales en forma de U en las paredes más cercanas a las cabeceras, y en forma de V en las partes inferiores. Esto indica la existencia de diferentes materiales, formados por las diversas capas endurecidas de ceniza volcánica, por lo que la forma del perfil está en función de la erodabilidad de cada una de las capas y de su arreglo, junto con su posición en el

terreno. Estos campos de cárcavas, en sus partes inferiores, están constituidas por verdaderos bad-lands. Estas áreas contiguas de las cárcavas indican indirectamente, un estadio de su propio desarrollo y en las cuales, no es posible encontrar ningún material que indique la existencia de suelo, salvo algunos pedestales. Por lo tanto, en estas áreas altitudinalmente inferiores de las cárcavas, la erosión actúa en forma de lavados laminares sobre tepetates totalmente expuestos. Lo anterior se logra apreciar en las siguientes imágenes de campo del sistema anteriormente descrito (ver Figura 4.5.1.2).

*Figura 4.5.1.2* La zona de transición de materiales se puede apreciar en las paredes de las cárcavas. Estos materiales consisten en los suelos, en la parte superior, dos diferentes depósitos de cenizas volcánicas no cementadas debajo del perfil del suelo, y un tercer tipo de ceniza cementada "tepetate" de color amarillo como base de los materiales superiores. La transición de estos materiales se puede observar también con su correspondientes en los pedestales contiguos.



Estos sistemas denotan actividad muy intensa en sus cabeceras, pues se aprecian pequeños deslizamientos (bloques de algunos decímetros de espesor) y caída de bloques recientes en sus límites superiores (bloques que varían desde algunos decímetros hasta algunos metros, en términos de superficie), lo cual, extiende paulatinamente sus superficies de influencia (ver Figura 4.5.1.3).



*Figura 4.5.1.3* Obsérvese deslizamiento de bloque recién colapsado (nov. 98) de aprox. un metro de extensión superficial (a lo largo y  $\frac{1}{2}$  metro de ancho), en la cabecera de una cárcava (imagen izquierda). El sistema completo mide aprox. 30 m de extensión lineal y (parte del sistema, imagen derecha).

Fue posible encontrar también, en los barrancos locales que son los sistemas por los que drenan las cárcavas, materiales de suelo recién transportados, así como también pequeños fragmentos desprendidos de las formaciones de tepetates. La extensión que tienen los campos de cárcavas en relación con las superficies de suelo que aún existen (y que la mayoría corresponden a las áreas agrícolas), es importante, pues anualmente aumentan las superficies que son erosionadas por su avance remontante. Las cárcavas afectan además, a los árboles que han sido introducidos dentro de los programas de recuperación. Las áreas adyacentes a estas cárcavas son, prácticamente, bad-lands establecidos con barrancos muy profundos con paredes muy verticales que alcanzan a medir hasta 20 m (medición en campo).

El siguiente sistema de cárcavas que se describe, se encuentra drenado por sus propios canales, pero tienen un barranco principal que las “interconecta”. El color de los tepetates en dicho sistema es rojo. Algunos de los canales que drenan a los sistemas mayores afectan a las áreas agrícolas a través del avance de las cabeceras de barranco y de sus límites de sus paredes. Estas formas denotan actividad en algunos puntos muy cercanos a las parcelas; y no se observan medidas de protección o de disminución de estos procesos ( ver Figura 4.5.1.3).



*Figura 4.5.1.3 Este barranco forma parte de un sistema mayor de barrancos y cárcavas, los cuales se observan con actividad continua a lo largo de la temporada de lluvias. Este proceso de erosión acelerada es representativo de la reducción de las áreas de cultivo por abarrancamiento en la zona de estudio. No es posible encontrar medidas para contrarrestar la actividad remontante de su cabeceras y paredes.*

En los barrancos inmediatos a las cárcavas también se pudieron observar materiales de texturas finas depositadas en los lechos de los ríos, como arenas finas y materiales

más pequeños (de tamaño arcilloso). Estos materiales provienen de la erosión hídrica de los tepetates y del suelo que aún se pierde por dichos procesos.

En la parte baja de la zona (al este de Tequesquinahuac) existen dos sistemas de cárcavas que funcionan también, en el límite de áreas agrícolas.

Fue posible apreciar los depósitos de estas cárcavas, que corresponden a materiales con textura fina. Su profundidad es de aprox. 8 m y presenta un perfil transversal en forma de U (Figura 4.5.1.4). Se observó también una transición de materiales dentro de estos sistemas de suelo a tepetates (blanco-grisáceo).

También se midieron los sistemas de *riles* que actúan en estas formas, que en promedio alcanzan de 5 a 10 cm de ancho y de 3 a 5 cm de profundidad.



*Figura 4.5.1.4 Obsérvese los depósitos de cárcavas, la zona de transición de material y las dimensiones de este sistema de cárcavas. Las áreas que se encuentran detrás de la cabecera de estas cárcavas son tierras dedicadas a la agricultura de temporal. Tampoco es factible encontrar ninguna medida de atenuar los procesos de erosión en estas áreas.. Las flechas en color negro indican la dirección del flujo del drenaje. En la parte central de la imagen se aprecia el canal de desagüe principal.*

Dentro del área de la cuenca del río san Bernardino, las cárcavas que se reconocieron se encuentran también al borde de las áreas agrícolas y en las zonas o remanentes de superficies agrícolas. También se encuentran dentro de tierras dedicadas a la recuperación de la zona. Ver la Figura 4.5.1.5.

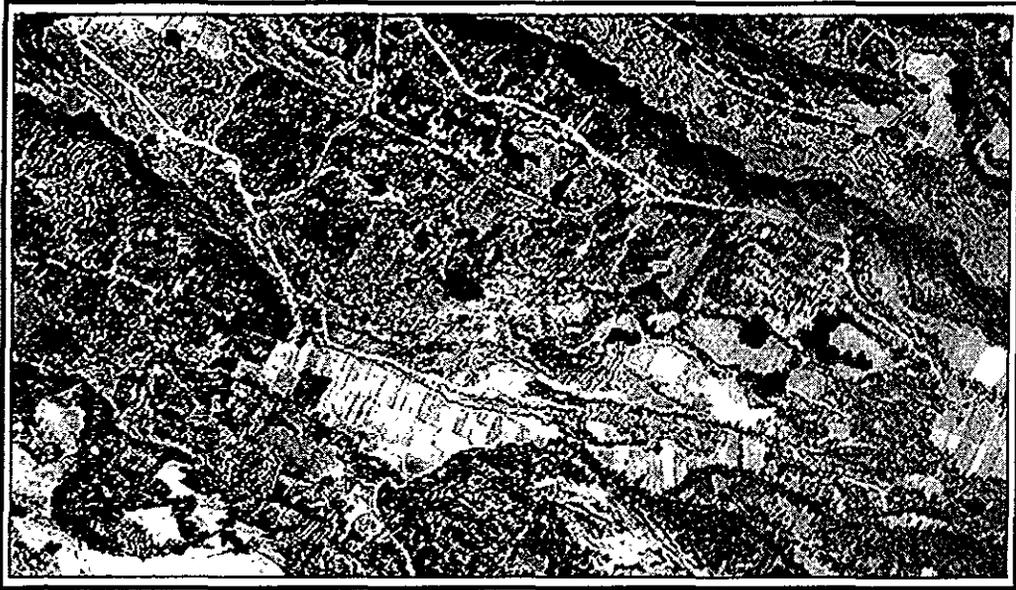


Figura 4.5.1.5 Segmento del fotomosaico digital con las unidades de cárcavas en la cuenca del Río Chapingo (las áreas de tonos más oscuros son los campos de cárcavas).

Estas áreas también son drenadas por sistemas de barrancos desarrollados dentro de las cárcavas a lo largo de su evolución. Se observa gran actividad erosiva en las cabeceras que se ubican en el “contorno” de las áreas agrícolas.

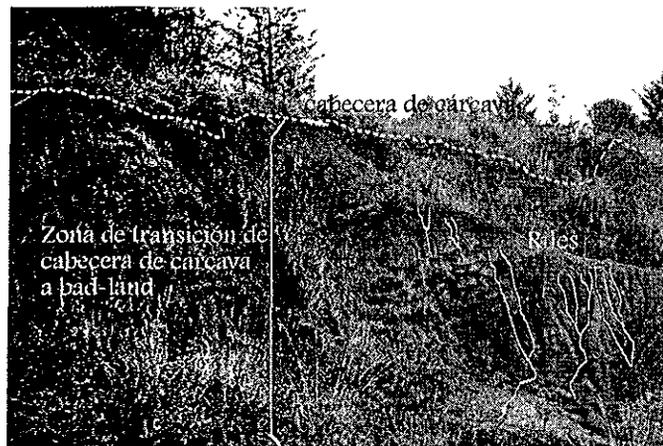
Algunas de ellas forman prácticamente cualquiera de las paredes laterales de barrancos con profundidades hasta de 10 m; debido a esta razón no es posible observar sus depósitos pues son transportados por los barrancos depositándolos en sus lechos o en las presas de retención de azolves construidas dentro del programa de rehabilitación de la zona. Dentro de las áreas en recuperación se muestran las cárcavas tanto a las orillas como al interior.

Las cárcavas en algunas zonas también han dejado al descubierto tepetates, a través de la combinación, tanto de procesos de remoción en las partes de las cabeceras, y de erosión lineal en las áreas de los canales de drenaje. Dentro de las áreas mencionadas se pueden observar pedestales (de algunos centímetros de altura) y pináculos. Estas zonas igualmente, exponen áreas transicionales a bad-lands, en los cuales existen procesos de erosión laminar y *riles*, los cuales forman parte de los sistemas de drenaje de los barrancos; obsérvese Figura 4.5.1.6. Estas áreas de bad-lands también aportan material hacia los barrancos el cual consiste en fragmentos de gravas y arenas gruesas derivadas del desprendimiento y remoción del tepetate.



**Figura 4.5.1.6** Es común distinguir las áreas de transición de las cárcavas hacia terrenos convertidos ya en bad-lands. Estas zonas se encuentran en las partes inferiores contiguas a los sistemas de cárcavas. La erodabilidad diferencial de los materiales, aunado al mal manejo del suelo, reflejado en la carencia de cobertura vegetal, da como resultado este tipo de escenarios de degradación del terreno en la zona de estudio.

El área de estas imágenes pertenece al Río Chapingo. Se observan superficies que aún conservan suelo, así como también, áreas en donde se exponen tepetates. También se puede apreciar la acción de los riles sobre éstos. Algunas paredes de las cárcavas se cubren de vegetación de manera estacional, sin embargo, por la existencia de los depósitos inmediatos, se deduce su dinamismo.



Al interior de estos campos también se observaron algunas cárcavas con paredes muy escarpadas (de casi 90°).

En sus cabezeras se apreció la caída recientes de bloques (lo cual va provocando su retroceso paulatinamente), lo que deja al descubierto el delgado espesor de suelo y el material de tepetate que subyace.

Estas formas, asimismo, dejan “huecos” de material gracias a la fuerza erosiva del flujo subsuperficial que provoca su debilitamiento y su salida paulatina posteriormente. La parte superior de esta especie de túnel que se forma, la cual sostiene a la vegetación y al resto de suelo que queda, por la acción de la gravedad y el debilitamiento por la infiltración del agua en el suelo, se colapsa acrecentando la cabezera que seguramente se transformará en cabezera de barranco por la alta erodabilidad del material (ver Figura 4.5.1.7).

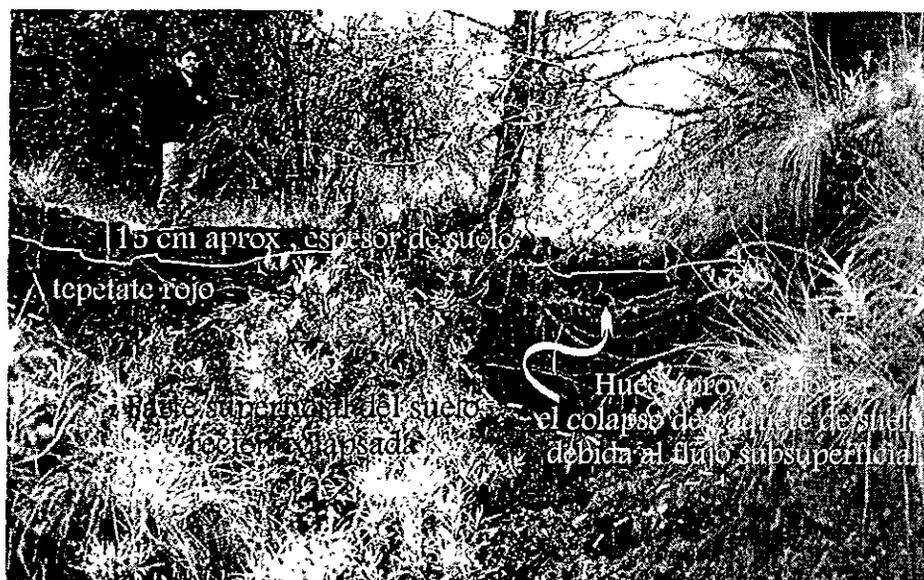


Figura 4.5.1.7. Esta cárcava de cárcava es representativa de otras que se encuentran al interior de las zonas de recuperación. Nótese sus dimensiones con relación a las del bloque recién colapsado, así como también el espesor del suelo y el semi-túnel (hueco) que provocó su desplome.

Las cárcavas de las partes bajas de la cuenca del río San Bernardino solo aparecen en los límites de las áreas agrícolas. Éstas actúan en combinación con pequeños deslizamientos y asentamientos en las cabeceras, así como también se observó la presencia de *riles* y lavado *entre riles* en sus paredes.

#### 4.5.2 Unidad de Mapeo: *Bad-lands*

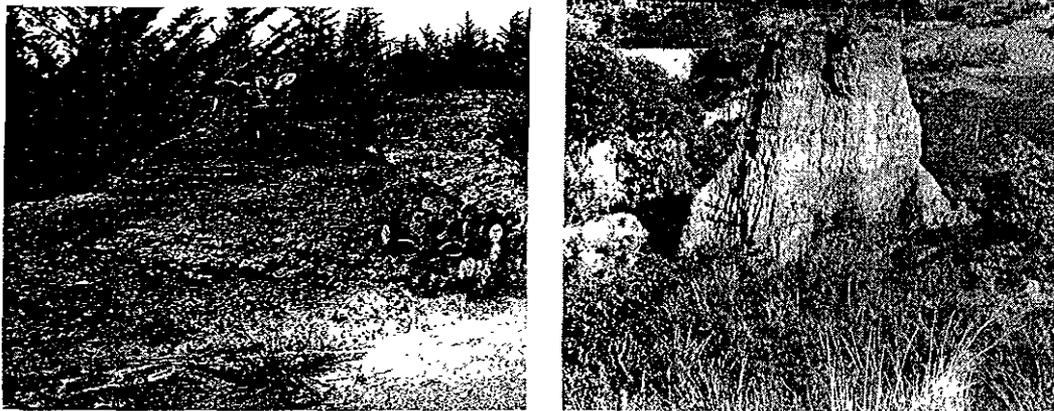
En el cuadro 4.5.2.1 se resumen los resultados del levantamiento de las áreas de *bad-lands*.

Cuadro 4.5.2.1 Resultados del levantamiento de erosión; unidad *bad-lands*

Bad-lands	Area en ha.	Rango de pendiente en °
Dentro de las cuencas	43	2-20
Area "fuera" de las cuencas	22	2-20

Los *bad-lands* son formas resultantes de procesos de erosión acelerada que actuaron de manera muy intensa principalmente por el mal manejo de zonas agrícolas (Bergsma, 1982, 1996). Este principio coincide posiblemente con los *bad-lands* de la zona de estudio, ya que estas áreas se caracterizan por presentar en su interior una serie de pedestales y pináculos que conservan restos de suelo y los cuales son

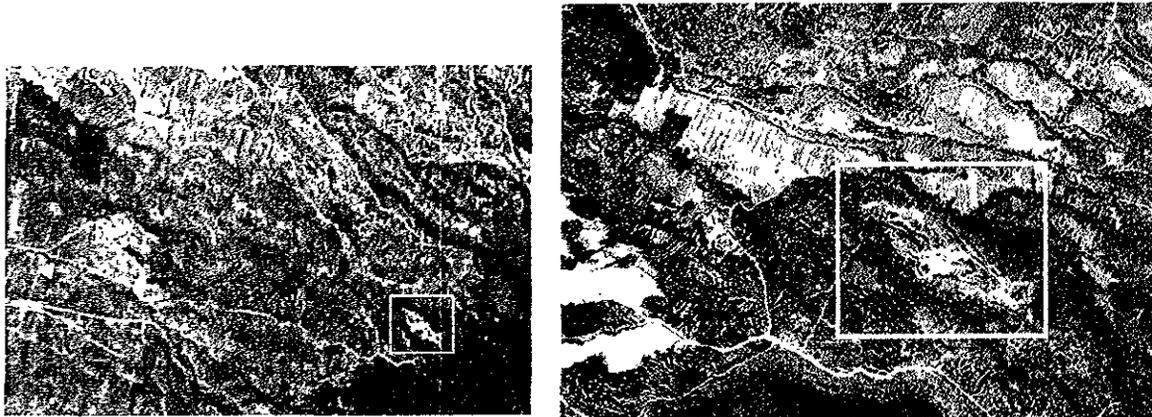
coronados por alguna especie de vegetación (Figura 4.5.2.1). Generalmente estas unidades degradadas permiten hacer estimaciones sobre la pérdida, en términos de volumen, de los horizontes del suelo. Los procesos que dieron origen a estas formas pueden ser los que actúan hoy día en las áreas de cárcavas y barrancos adyacentes por ejemplo; esto quiere decir, que los bad-lands actuales son formas de una etapa muy avanzada de los procesos de erosión en la zona.



*Figura 4.5.2.1 Se puede apreciar el material perdido en las áreas próximas a estas zonas de pináculos. Nótese la forma y dimensiones distintas debidas a los diferentes tepetates.*

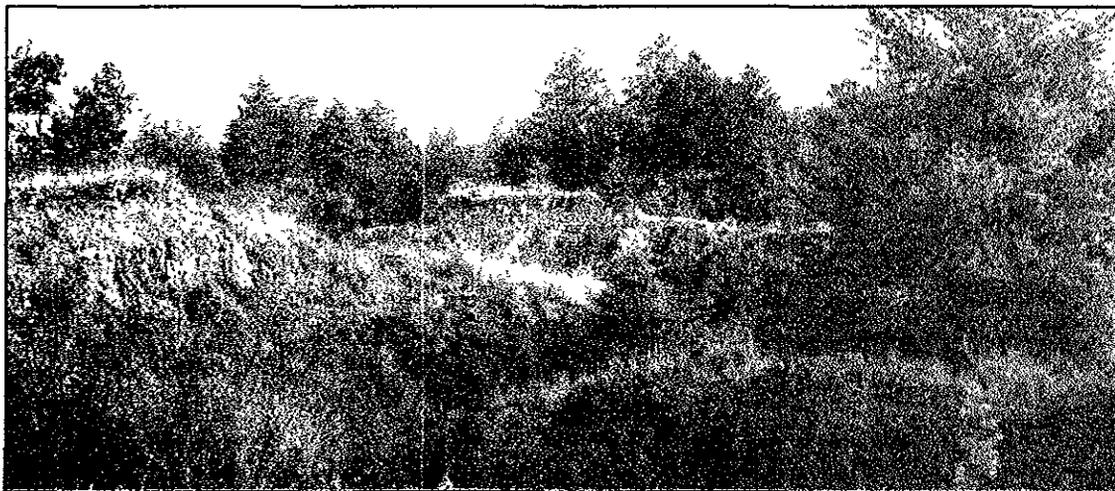
Los pedestales de las áreas de bad-lands son de morfología columnar, debida probablemente a la erodabilidad diferencial de los tepetates y encontrando en sus partes superiores materiales que corresponden a restos de suelo. Dichos remanentes de antiguos suelos aparecen “coronando las columnas o pedestales de los bad-lands. La extensión de las porciones superficiales de los pedestales varían de algunas decenas de centímetros hasta algunos metros. Algunos de los bad-lands en la zona, poseen ciertos pináculos con diferentes arreglos, propios de deslizamientos de grandes volúmenes de material (15 - 20 m). Estos bloques parecen estar acomodados en direcciones no coherentes con respecto a la pendiente dominante de las áreas adyacentes y presentan un arreglo de material en su interior que comprueba dicho movimiento.

Cabe resaltar la importancia, que por extensión, presenta un bad-land que se encuentra en la parte centro-oriental de la cuenca del río San Bernardino. Esta forma de erosión acelerada es observada hasta por sensores satelitales, ya que presenta una gran dimensión y una morfología peculiar que no se repite en ninguna otra parte del área de estudio ni en áreas circundantes (Figura 4.5.2.2).



*Figura 4.5.2.2* Por sus dimensiones, morfología y materiales, este bad-land puede ser registrado por sensores satelitales: izq. compuesto SPOT 321 (sep. 1994) y der. segmento de fotomosaico digital (ene. 1997).

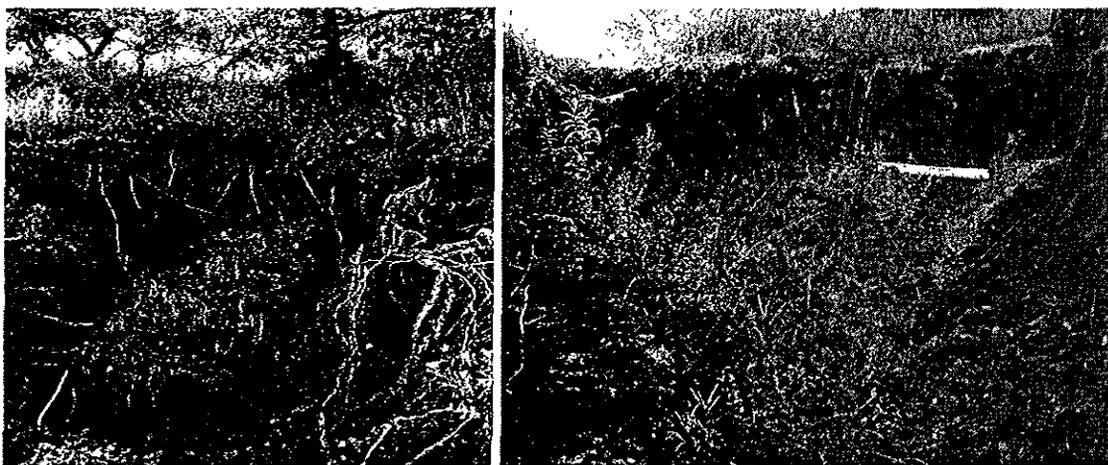
La superficie de este bad-land mide 10.6 ha y presenta una morfología que probablemente obedezca a su pendiente (que oscila entre los 7 y 14°), a la posición en el relieve y a los materiales, los cuales, consisten en lavas andesíticas cubiertas de ceniza volcánica cementada (tepetates). Esta forma degradada por procesos muy intensos de erosión acelerada está conformada por 6 (barrancos) cauces principales paralelos y sus áreas interfluviales son crestas con remanentes de suelo, algunas de ellas muy agudas y alargadas (pináculos muy alargados de sus áreas superficiales o crestas). Algunas crestas que aún conservan un perfil de suelo están cubiertas de vegetación natural de bosque y otras solamente, son restos de antiguos pedestales que ya no poseen suelo y en donde se observan crestas de columnas muy agudas de tepetates modeladas por lavados laminares y procesos de erosión por salpicadura; lo anterior se puede apreciar en la Figura 4.5.2.3.



*Figura 4.5.2.3* Morfología al interior del bad-land. Nótese las áreas sin cobertura, los pináculos coronados de suelo y la vegetación de bosque natural que coexiste en esta zona.

El perfil transversal de los barrancos que drenan a este bad-land es en forma de V. La amplitud de los barrancos oscila entre los 5 y 10 m, pero el mayor alcanza hasta 20 m aprox., según medición en campo. La profundidad de disección que alcanza dicho barranco es de aprox. 20 m. Los demás varían de 5 a 10 m en promedio. El patrón de drenaje de esta zona es paralelo y conforme los barrancos descienden hacia las partes altitudinalmente inferiores del bad-land, cambian de dirección para confluir en un cauce principal. Este cauce, es un pequeño barranco que mide 8 m aprox. de amplitud por 7 m de profundidad. Como se nota, los cambios morfométricos en este barranco son muy distintos a los del bad-land tierras arriba, lo cual se explica por el cambio de unidad de terreno (ladera a piedemonte) y por lo tanto, el cambio de inclinación de pendiente. Por lo tanto se induce que son estos los factores que influyen en la actividad fluvio-erosiva en las partes medias y superiores del bad-land.

Dentro del bad-land es posible observar la combinación de varios procesos de erosión: La erosión laminar actúa tanto en áreas de tepetates expuestos por erosión muy severa, como en los bordes de los pedestales que aun existen. También fue posible detectar la existencia de cárcavas con caída de bloques (de volúmenes decimétricos) en sus cabeceras, así como también asentamientos de suelo (ver fotos de campo en Figura 4.5.2.4). Estos procesos de erosión remontante depositan los materiales en los tributarios menores que se localizan inmediatamente, formando ramificaciones drenaje secundario de los pedestales y de los tepetates expuestos.



*Figura 4.5.2.4 Estas cárcavas son un proceso representativo de degradación continua en el interior del bad-land debido a la erosión acelerada. Estos procesos implican una combinación de asentamientos de suelo, colapsos de los techos de semi-túneles ocasionados por el flujo sub-superficial y caída de bloques en las cabeceras de las cárcavas. En los barrancos se apreciaron procesos fluvio-erosivos en tepetates.*

Estas superficies del bad-land es muy activa en cuanto al aporte de material. Además de la erosión de los pocos suelos que coexisten, se observa la remoción de partículas más grandes, como gravas y arenas gruesas, provenientes de los tepetates intemperizados. Este hecho se constató en las presas de retención de azolves inmediatas.

Respecto a las otras áreas de bad-lands de la zona cabe mencionar que se encuentran sistemas de barrancos desarrollados sobre tepetates expuestos y no es posible encontrar vegetación sobre el suelo. Estos bad-lands por encontrarse en pendientes más inclinadas tienden al abarrancamiento en pequeños sistemas paralelos y a la conservación de un tipo de pedestales sin suelo además de ser lavados por flujos laminares y tener caídas de pequeños bloques, apréciase la Figura 4.5.2.5.



*Figura 4.5.2.5 Los bad-lands son drenados por pequeños barrancos paralelos y mantienen vegetación a nivel individuo en sus bordes. Además son áreas muy activas tanto, por lavados laminares como por el efecto de las gotas de lluvia, que junto con el intemperismo, terminan erosionando a los tepetates.*

#### 4.5.3 Unidad de Mapeo: áreas con erosión extrema.

El resultado del levantamiento de estas áreas se resume en el siguiente Cuadro 4.5.3.1.

*Cuadro 4.5.3.1 Resultados del levantamiento de erosión; unidad: áreas con erosión extrema*

Áreas con erosión extrema	Área en ha.	Pendiente en °
Dentro de las cuencas	35	2-20
Área "fuera" de las cuencas	59	2-20

A diferencia de los bad-lands, estas áreas en su mayoría, no son drenadas por sistemas paralelos de barrancos. Solo algunas presentan pedestales coronados por remanentes de suelo. Estas unidades se caracterizan por tener como proceso dominante a la erosión *entre riles*, flujos laminares, y erosión en *riles*. La mayor parte de dichos

procesos se presentan sobre tepetates erosionados y en las áreas que se encuentran entre los niveles de las terrazas y de las zanjas trinchera, dentro de las áreas en proceso de recuperación. Estas porciones intermedias a las “líneas o hileras” de árboles plantados mantienen una cobertura vegetal ínfima, ya que la vegetación que está establecida solamente protege a su superficie en la que se encuentra plantado, es decir, proporciona protección sólo a nivel local o individual.. Los *riles* y *pre-riles* son los vehículos del transporte de partículas al igual que los lavados laminares y la erosión *entre riles*. Estos partículas y materiales son preparados para su transporte por el intemperismo de los tepetates, lo que debilita al material y provoca su desprendimiento por el impacto de las gotas de agua de lluvia y la escorrentía, como los lavados laminares. Estas zonas representan un estadio de regresión o estabilización de antiguos bad-lands que fueron alterados en su dinámica por las obras de recuperación. Estas áreas no se han logrado estabilizar del todo, como se anotó anteriormente, pero han permitido el desarrollo de especies vegetales a partir de los pocos nutrientes de los tepetates (Etchevers *et al.* 1992). Los pequeños cauces que logran desarrollarse erosionan fluvialmente y drenan el material a pequeñas microcuencas locales, las cuales en crecidas, son vaciadas gradualmente por el flujo superficial hasta alcanzar tanto las paredes de barrancos principales, como el sistema de drenaje general de las cuencas. Muchas de estas áreas se encuentran en posiciones del relieve de morfología local convexa o en áreas de las partes superiores de barrancos que se podrían denominar según Hall (1983) *hombros de ladera* de barranco. Estas zonas son también áreas morfológicamente convexas, por lo que se explica su dinámica, principalmente laminar (Figura 4.5.3.1).



Figura 4.5.3.1 Segmentos de fotos de campo en donde se observa la escasa cobertura vegetal, la existencia de gravas que indican la presencia de erosión laminar; desarrollo de suelo incipiente a nivel individuo.

Estas áreas fueron degradadas por procesos muy severos de erosión acelerada y posteriormente fueron acondicionados con obras de recuperación de suelos para poder ser reforestadas, pero aún no logran ser estabilizadas completamente por la incidencia de erosión superficial principalmente. Esto se puede deber a dos factores principalmente. El primero es a que la obra de control de erosión y recuperación del suelo no fue la correcta para las características de este sitio, y la segunda que pudo haber sido correcta la obra, pero no se les ha dado mantenimiento a dichas obras.

#### 4.5.4 Otras áreas con erosión acelerada no cartografiadas.

Existen áreas agrícolas que además de tener en sus bordes limítrofes cárcavas también pierden el delgado horizonte de suelo que poseen a través de erosión por microcanalillos, por *riles*, por erosión *entre riles* y debido a flujos laminares locales. Estos procesos actúan “libremente” ya que no existen medidas de prevención de la pérdida del suelo. Es posible observar, en sus áreas circundantes, el diferente tipo de cenizas comentadas que han sido expuestas gracias al transporte de los suelos que yacían en su superficie (ver Figura 4.5.3.2).



*Figura 4.5.3.2 En esta imagen se pueden apreciar: la pérdida de suelo por erosión laminar en los márgenes de las parcelas, y segundo, los mismos procesos de erosión laminar han dejado al descubierto las raíces de un árbol de eucalipto. Este último hecho se debe a que esta especie, en el área de su sistema radicular, no permite el establecimiento de otras especies menores que ayuden a proteger al suelo contra este tipo de erosión. Este tipo de procesos son parte de la dinámica erosiva actual en el área de estudio.*

También se observó un proceso de redistribución de material al interior de las obras de recuperación. Tanto en las áreas de terrazas como en las de zanjas trinchera, existen grandes extensiones en donde se dan procesos de transporte por *microrriles*, *riles*, por erosión *entre riles* y flujos laminares. En algunas áreas también se

observaron en campo flujos laminares a nivel local. Los materiales, que en algunos casos también son partículas de suelo, son transportados a los niveles altitudinalmente inferiores de las obras, en donde son depositados temporalmente para ser retransportados niveles abajo hasta encontrar algún drenaje inmediato y terminar depositados en las obras de retención de azolves (gaviones). Otros lugares en donde se depositan estos materiales, en el interior de las áreas en recuperación, son pequeñas microcuencas de impacto local. En éstas se observa un crecimiento vegetal favorable y posiblemente cierto desarrollo del suelo en los primeros centímetros de la superficie.

En resumen, las áreas antes mencionadas, funcionan como “escaleras” de la escorrentía, transporte, depósito y retransporte de material de partículas finas hacia las partes bajas en busca de un nivel de base local. Obsérvese lo dicho anteriormente en las imágenes (Figura 4.5.3.3) en donde se registraron flujos de material y sus depósitos al interior de una zona reforestada con especies de pinos sobre terrazas.

Por otra parte, se distinguieron procesos de erosión acelerada en los suelos de algunas áreas del bosque, alternadas con reforestación. Estas superficies sufrieron los efectos de los incendios forestales ocurridos en la parte alta de las cuencas en los meses de mayo y junio de 1998 (sobre las unidades de terreno de *ladera montañosa y lomerío principalmente*). Este fenómeno provocó la pérdida de la cobertura del estrato arbustivo y en algunas porciones, la del arbóreo. La eliminación de la cobertura del suelo propició la iniciación de su degradación por procesos de erosión en *riles*, flujos laminares, y erosión *entre riles*, y se explica enseguida.

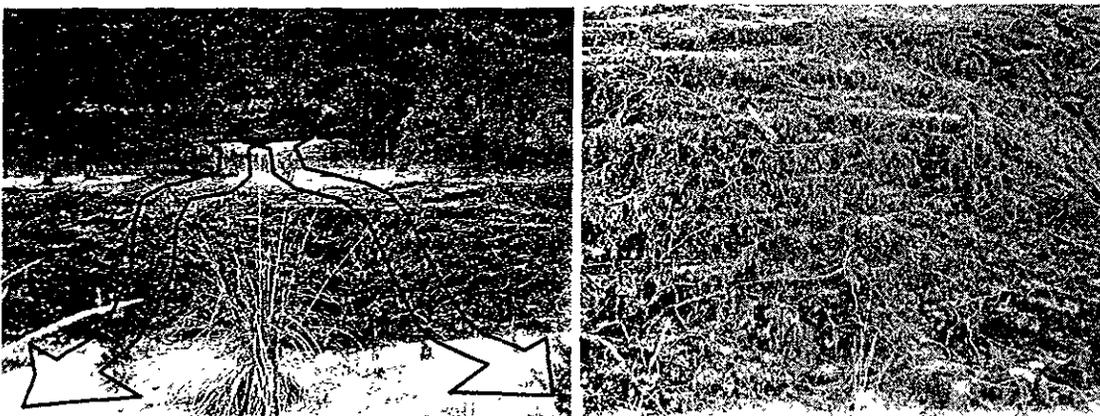


Figura 4.5.3.3 Las imágenes permiten observar los depósitos de material fino (arenas finas), tanto en el frente del “escalón” de la terraza (der.), como en nivel inferior inmediato (izq.). El proceso de redistribución de material al interior de las áreas reforestadas en terrazas y zanjas trinchera, ocurre a partir de los niveles altitudinalmente superiores hacia los niveles inferiores; dicho proceso está claramente sujeto a la influencia de la pendiente predominante de terreno.

Debido a que el fuego eliminó la cobertura vegetal que protege a los suelos, éstos quedan expuestos a la acción de los procesos de erosión hídrica. Con la presencia de la primeras lluvias en el área de estudio, siendo que el suelo se encuentra sin protección superficial, la energía de las gotas de lluvia incide directamente en él, debilitando y separando sus agregados y partículas dispersándolas consecutivamente. Este proceso se le conoce como erosión por salpicadura. Dicha remoción y redistribución de partículas de suelo representa una fase inicial de la erosión de los suelos en las zonas afectadas por el fuego de los incendios.

La siguiente etapa erosiva ocurre cuando interviene otro factor muy importante: la pendiente del terreno; una vez que las partículas del suelo han sido “preparadas” para su transporte, se generan flujos superficiales, los cuales pueden deberse a dos principales causas: la primera, a la compactación y sellamiento del suelo provocados por el impacto de las gotas de lluvia de manera directa sobre éste. También puede haberse generado un flujo subsuperficial debido a las características de permeabilidad de las cenizas volcánicas, provocando la saturación de humedad de la porción superficial del suelo, generando así lo que se conoce como flujo *hortoniano* de saturación.

Ambos procesos se pudieron haber presentado de manera aislada o alterna creando una superficie importante de escorrentía. La segunda causa que ocasiona la generación de la escorrentía superficial en los suelos de las áreas afectadas por los incendios es la pendiente del terreno. Cuando existe una superficie sellada o saturada del suelo, la gravedad ocasiona que el agua de la lluvia, que ya no puede infiltrarse, comience a escurrir hacia los niveles de base locales. Estos escurrimientos se presentan inicialmente, en forma de flujos laminares homogéneos, en donde el microrrelieve lo permite, y en *micro-riles* y *riles*, provocando un lavado en superficies con pendientes importantes. Esta combinación de factores que se presenta en las zonas afectadas por los incendios es muy importante, ya que se encuentran en áreas de lomerío, ladera montañosa y en áreas de transición entre esta última unidad de terreno con el *pedemonte superior*, las cuales poseen pendientes hasta de 30°.

Este tipo de procesos genera grandes movimientos de suelo, sobre todo al inicio de la temporada de lluvias, pues la cobertura vegetal es casi nula. Este lapso temprano de erosión acelerada es uno de los momentos más críticos en cuanto a la pérdida del suelo ya que, transcurridas las primeras lluvias, gracias a la humedad en el suelo o en

los depósitos al interior de las laderas, las especies pequeñas empiezan a repoblar los suelos ayudando a frenar relativamente los flujos que causan el transporte de material. Sin embargo, se observaron después de aprox. 3 meses que algunos procesos de transporte siguen activos, tales como los *riles* y erosión laminar. También se observó la dinámica de estos procesos por la presencia de depósitos de suelo y, en algunos casos, de cenizas volcánicas que han sido expuestas por la pérdida total del suelo en porciones altitudinalmente superiores (pendiente arriba). Estos depósitos se encuentran al interior de las unidades y en los cauces y barrancos contiguos a las zonas afectadas. Los *riles* pueden potencialmente concentrarse en *riles maestros* generando la creación de pequeños cauces con incisión vertical que pueden crecer y ser permanentes para los años y épocas de lluvia posteriores (Figura 4.5.3.4).



*Figura 4.5.3.4* Area lavada por riles y erosión laminar durante el inicio de la temporada de lluvias. La amplitud de los riles es de 10 cm, por 5 cm de profundidad (medida en promedio), aunque existen riles hasta de 15 cm de ancho. Esta zona pertenece a la unidad de lomerío y presentaba, hasta antes de los incendios, un bosque relativamente perturbado, como se observa en las fotografías digitales con las que se ensambló el fotomosaico previas al incendio.

Los incendios forestales también provocaron la creación de una especie de *semitúneles* debido a que el fuego calcinó e integró al suelo, la materia vegetal que constituía a algunos los árboles del bosque. Los espacios vacíos de estas formas huecos fueron ocupados por el sistema radicular de los árboles. Estos huecos permiten apreciar los materiales subyacentes de los suelos, como las cenizas y algunos tepetates, y sirven como verdaderas salidas de flujo subsuperficial, tal como se observó en campo. Éstas mismas formas pueden originar potencialmente, el rompimiento local de la pendiente y funcionar entonces, como caídas de agua de flujos superficiales concentrados e

iniciar una incisión vertical que pueda transformarse paulatinamente en alguna cabecera de un barranco menor, por la influencia de la pendiente (Figura 4.5.3.5). Esto puede ocurrir por las características de impermeabilidad que poseen las cenizas volcánicas que se situaban debajo del perfil del suelo.



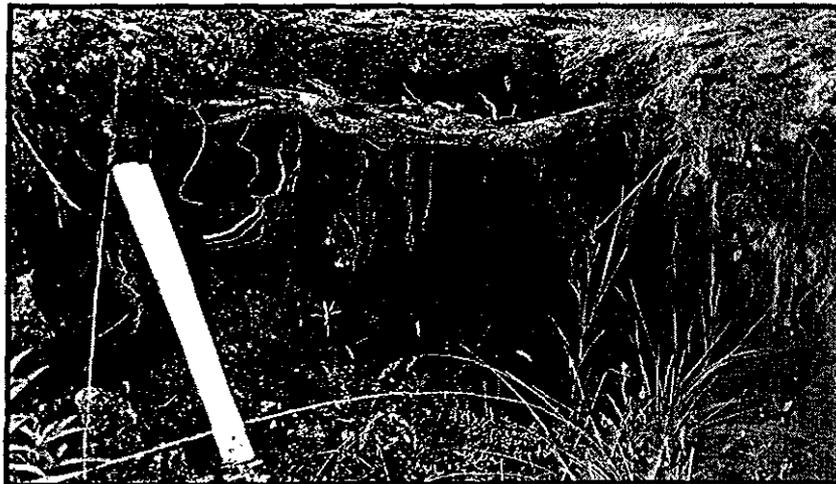
*Figura 4.5.3.5 Esta especie de túneles se forman por la calcinación en su totalidad de los árboles y sus raíces por el fuego, durante los incendios ocurridos de mayo y junio de 1998 en la partes altas del área de estudio. Algunas de las concavidades dejadas por las raíces funcionan como salidas de flujos subsuperficiales que se originan en las porciones ladera arriba.*

La presencia de pequeños valles rellenos por depósitos de suelo originados en las laderas de montaña, en las partes altas de la zona, son indicadores también de procesos de erosión de suelos. Dichos depósitos son utilizados, en la mayoría de los casos como zonas de cultivo y/o pastoreo.

Bocco (1990) señala que el entendimiento de la migración de cabeceras de las cárcavas es un proceso crítico, cuya explicación y entendimiento, puede contribuir al conocimiento de la dinámica actual de otros sistemas de cárcavas. Este autor también explica que la etapa inicial de la formación de las cárcavas no solamente comienza con la incisión vertical que se da cuando las fuerzas erosivas del flujo superficial exceden la resistencia de los materiales (Harvey *et al.*, 1985, *op cit.* por dicho autor, 1990) o exceden la resistencia de la superficie de escorrentía, sino también, es importante la acción de la lixiviación del agua. Éste proceso produce pequeños asentamientos, microdeslizamientos y soliflujión. Bajo esta perspectiva, no solo el flujo concentrado es importante para la iniciación de las cárcavas, sino también, los movimientos de remoción en masa ya que estos se relacionan con el alto contenido de agua en el suelo y este se relaciona con la cantidad de precipitación en donde se dan las cárcavas, de hecho ésta es una variable ambiental crítica para el crecimiento de las cárcavas en la zona de estudio. Debido a la semejanza de las características

geomorfológicas de la zona estudiada por Bocco (1990) es posible formular alguna hipótesis respecto a la iniciación de las cárcavas en la zona de estudio. Estas posibles explicaciones se basan en las formulaciones hechas por dicho autor y las realizadas por Córdova y Parsons (1997) así como por observaciones de campo.

La degradación de las vertientes en esta zona probablemente comenzó con pequeños microdeslizamientos y asentamientos de los horizontes superiores del suelo, debidos probablemente a la dinámica del flujo subsuperficial y a los flujos en los túneles causada por la alta impermeabilidad del tepetate. Estas capas operan como niveles de base internos. Por lo tanto, al saturarse los horizontes de tepetate y el horizonte B (argílico) estimulan la saturación de los horizontes superiores lo cual provoca asentamientos y deslizamientos en la superficie. Estos asentamientos y deslizamientos generan eventualmente cambios en la pendiente de la superficie de escorrentía, provocando alguna caída de agua junto con la concentración de flujo concentrado que comienza a incidir verticalmente. Este tipo de proceso se observó en las áreas de erosión extrema y en algunos bad-lands en las cabeceras de cárcavas ya que existen espacios o huecos debajo de los suelos que han sido construidos por la acción del flujo subsuperficial y que ocasiona la remoción de material en las zonas de debilidad (área de las cabeceras). Esto provocará el colapso del material superficial que ampliará el área de acción de las cárcavas y/o barrancos (Figura 4.5.3.6).



*Figura 4.5.3.6 En esta imagen se aprecia la caída de bloques debajo del perfil de suelo causada por flujos subsuperficiales. La imagen corresponde a una cabecera de cárcava dentro de un área de recuperación (reforestación en terrazas).*

Este proceso es probablemente uno de los principales iniciadores o generadores de las cárcavas en la zona, pues se observó dentro de diversas áreas. Otro factor potencial

para la formación de las cárcavas es el flujo subsuperficial ya que también puede generar zonas de debilidad en las cabeceras de las cárcavas provocando pequeños deslizamientos lo que a su vez, ensancha o amplía el área de acción de la cárcava.

Por lo tanto, uno de los factores críticos para la formación de las cárcavas así como para su desarrollo son los materiales, la pendiente y la geometría de las unidades en donde se sitúen.

En términos generales, al interior de la zona existen procesos de erosión acelerada que probablemente no aporten grandes cantidades de material a las estaciones de aforo situadas en las partes bajas de las cuencas, pero *sí* existe la evidencia de movimientos de material al interior de las unidades geomorfológicas de acuerdo a sus características como se verá en el siguiente capítulo. También es necesario tomar medidas en las áreas de las laderas montañosas y en las partes altas de la zona para contrarrestar los procesos de erosión acelerada desencadenados por los efectos de los incendios forestales, pues se observa que existe una gran cantidad de material transportado laderas abajo.

## CAPÍTULO V. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y AMBIENTAL DE LA EROSIÓN ACELERADA

### 5.1 Introducción

El manejo que el hombre tiene sobre las tierras determina el control o la aceleración de la degradación de éstas. Estos procesos de degradación pueden variar en el tiempo y en el espacio; por ejemplo, la erosión puede ser intensa durante algunos años y completamente ausente en otros. La interpretación de los factores ambientales que influyen en la degradación de la tierra dependen de la precisión de la información con que se cuente (Dudal, 1981).

Los estudios acerca de la degradación de la tierra son indispensables para planear y realizar estrategias a diferentes niveles regionales orientadas hacia el desarrollo agrícola. En este contexto, los mapeos y levantamientos a grandes escalas son muy útiles, sobre todo, cuando se integran algunos factores ambientales que permiten entender el origen, desarrollo y la evolución de los procesos de degradación de las tierras. Estos levantamientos, por el detalle de su escala, proveen de datos confiables que son útiles para la toma de decisiones a diferentes niveles de organización regional (*idem*).

### 5.2 Análisis geomorfológico y de uso del suelo de la erosión acelerada

Como se indica en el apartado del método del presente trabajo, las variables ambientales que se tomaron en cuenta para el análisis de la erosión acelerada fueron, la *geomorfología* y el *uso del suelo*. La geomorfología sintetiza los parámetros morfométricos del relieve, así como también, integra a las formas y los materiales que lo constituyen; ambos aspectos son de suma importancia para el entendimiento, desde el punto de vista geomorfológico, de los procesos de erosión acelerada.

Por otra parte, el recurso suelo ha sido uno de los elementos que ha sufrido las mayores alteraciones, ya que ha sido utilizado y manejado por el hombre para su subsistencia. Ambos factores, el geomorfológico y el antrópico (reflejado en la utilización del recurso suelo), han jugado una papel fundamental en los procesos de pérdida y degradación del suelo, asimismo, la actuación compleja de ambos elementos dio margen para que se alterara, de manera muy significativa, la dinámica exógena del área de estudio hasta antes de haber sido intervenida por el proyecto Lago de Texcoco en 1973. Otra de las variables ambientales significativas podría haber sido el

clima, expresado a través de las lluvias, ya que éstas, determinan la dinámica de la erosión de los suelos (Hudson, 1982). Dicha variable no se tomó en cuenta debido a que se ha mantenido estable y sin grandes alteraciones, salvo por la presencia de algunas tormentas extraordinarias en el siglo XVII (Córdova y Parsons, 1997). Cabe anotar, sin embargo, que la presencia de las lluvias está determinada por los cambios estacionales, factor que seguramente ha determinado en gran medida, las etapas iniciales de los procesos de erosión acelerada en la zona bajo estudio.

Por las razones expuestas con anterioridad, este trabajo solo se ocupa de exponer, algunas observaciones realizadas mediante ejercicios de fotointerpretación geomorfológica, manejo de materiales alternativos y convencionales de percepción remota, manejo de SIG y cartografía automatizada, junto con observaciones en campo, para obtener un primera aproximación a nivel hipotético sobre el, origen, evolución y situación actual de los procesos de erosión acelerada en las cuencas de estos dos ríos. También se realiza un análisis acerca de la distribución espacial de las unidades de erosión acelerada en relación con la unidad de *pedemonte superior* principalmente.

### 5.2.1 Unidades geomorfológicas y erosión acelerada

Mediante el uso del SIG se “cruzaron” los mapas de unidades de terreno (mapa geomorfológico) y el de las unidades de erosión (mapa inventario de erosión acelerada) junto con el mapa de pendientes de la zona de estudio.

Este procedimiento se realiza para analizar, por medio de los datos de una tabla, la distribución espacial de las unidades de erosión acelerada en relación con las unidades de terreno, asimismo, se obtiene el rango de pendiente y la pendiente predominante de las áreas espacialmente coincidentes.

En el Cuadro 5.1, se resumen los resultados del procedimiento antes mencionado, y en el cual, se puede observar que las áreas más extensas de las unidades de erosión acelerada de *cárcavas*, *áreas con erosión extrema*, y *los bad-lands*, se encuentran emplazadas sobre el *pedemonte superior* (estas áreas coincidentes se resaltan con caracteres en *cursivas* dentro del cuadro).

También se integran los valores de los rangos de pendiente de cada uno de las áreas coincidentes de ambos mapas (geomorfológico y de erosión acelerada); junto con la pendiente predominante. Cabe resaltar también la relación espacial que guardan

algunos sistemas de cárcavas con los barrancos, ya que estos últimos, influyen en el comportamiento fluvial de las cárcavas, tal como se indica más adelante.

*Cuadro 5.1 Tabla resultante de la relación espacial entre las unidades geomorfológicas y las unidades de erosión acelerada de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino.*

Unidades del inventario de erosión acelerada	Unidades del mapa geomorfológico	Area ha	Rango de pendiente en °	Pendiente predominante en °
<i>Cárcavas</i>	<i>Piedemonte Superior</i>	14	2 - 14	6
Cárcavas	Piedemonte Inferior	0.7	2 - 5	4
Cárcavas	Lomerío	0.9	5 - 14	13
Cárcavas	Barranco	4	4 - 35	6
<i>Area con erosión extrema</i>	<i>Piedemonte Superior</i>	25	1 - 40	5
Area con erosión extrema	Lomerío	0.5	4 - 16	6
Area con erosión extrema	Barranco	9	5 - 35	10
<i>Bad-land</i>	<i>Piedemonte Superior</i>	43	2 - 30	7
Bad-land	Barranco	0.2	10 - 13	11

La coincidencia espacial entre el mapeo geomorfológico y el de la erosión acelerada se da principalmente, como ya se mencionó, en la unidad de *pedemonte superior*. De acuerdo a los capítulos II y IV de este trabajo, esta es la unidad con mayor influencia sobre el paisaje por su función y su dinámica. Por esta razón se hace un breve análisis del funcionamiento morfodinámico de esta unidad.

La unidad de *pedemonte superior* funciona en algunas áreas como una zona de depositación de material erodado ladera arriba; pero en la mayor parte de ella, los procesos de erosión, tanto fluvial como de erosión acelerada, han tenido mayor influencia. Según los datos registrados de los gastos máximos para los dos ríos que conforman la zona (cuadro 5.2) se obtuvo que:

*Cuadro 5.2. Registros de gastos máximos de los dos ríos que forman la zona de estudio. Fuente: Arias et al., 1990. (\* datos obtenidos en un periodo de 37 años \*\* datos obtenidos en un periodo de 22 años).*

Río	Gasto máximo.	Área de drenaje
Chapingo**	65.4 m <sup>3</sup> /s	21.4 km <sup>2</sup>
San Bernardino*	55.5 m <sup>3</sup> /s	17 km <sup>2</sup>

Los datos corresponden a la zona de estudio aún después de iniciados los trabajos de recuperación de suelos y agua (hasta el año de 1982). Esta información indica que

han existido grandes volúmenes de escurrimiento con relación al área de drenaje de las cuencas (IISACH, 1990), e indirectamente muestran la importancia en la generación de escurrimientos superficiales por la falta de infiltración y retención de agua en el suelo y en mantos freáticos.

Por la configuración actual del paisaje, se observa que la unidad de  *piedemonte superior* ha sido muy dinámica en términos de dinámica exógena de erosión de suelos. Un factor que ha influido de manera significativa en la actividad de esta unidad es su ángulo de inclinación de la pendiente (pendiente media  $17.5^\circ$ ), y que ha interactuado con el arreglo y las características de los materiales que lo conforman.

Como se apuntó en el capítulo II de este trabajo, los materiales que constituyen esta unidad son cenizas volcánicas depositadas horizontalmente por lluvia piroclástica proveniente de los volcanes de la Sierra Nevada, algunas de las cuales, han sido cementadas pedogenéticamente; en otros sitios se trata también de material redepositado por flujos superficiales con un arreglo estratificado (Córdova y Parsons, 1997); estos depósitos se encuentran sobre un volumen uniforme de material piroclástico, proveniente de un depósito de lahar. Las propiedades de permeabilidad de las cenizas (cementadas o no), su estructura y/o arreglo estratificado (de acuerdo al depósito del lahar), han propiciado junto con la pendiente, el predominio de los flujos superficiales y subsuperficiales con dirección preferencial este-oeste (de acuerdo con la dirección de la pendiente). Estas condiciones geomorfológicas han facilitado la remoción del material superficial, como los suelos, y actualmente es posible observar, procesos de remoción de material tepetatoso en dicha dirección.

De acuerdo con lo anterior, la interacción entre la pendiente, la morfología al interior de las unidades (microrrelieve) y los materiales, se ha dado a través de los procesos de erosión de suelos y otros materiales, pues la mayoría de las capas cementadas han generado, por su alta impermeabilidad, una superficie local sobre las cuales, los suelos saturados de humedad, fueron erosionados por la esorrentía difusa y concentrada y por flujos subsuperficiales, éstos últimos incidieron en las zonas de transición de los suelos a los tepetates. En la Figura 5.1, se esquematiza, a través de un perfil longitudinal de la zona de estudio, el arreglo y estructura de los materiales, así como las unidades de terreno existentes.

Hipotéticamente, de acuerdo a lo observado en el área de estudio y conforme a lo que teóricamente Hall (1983) dice, las principales características de los materiales que

han influido en los movimientos del agua en la unidad del *pedemonte superior* son: la permeabilidad de los suelos, la permeabilidad del material subyacente (material tepetatoso), la cobertura vegetal (y su manejo) y las propiedades físicas de la capa más superficial del suelo. De hecho, en la unidad de *pedemonte superior*, el movimiento superficial y subsuperficial del agua ha sido la causa principal de la remoción de material hacia su interior. El grado de dinamismo de los procesos de erosión acelerada en la zona de estudio se debe entonces a la interacción compleja entre la gravedad (pendiente del terreno), la geometría al interior del *pedemonte superior*, las características de permeabilidad de los materiales y el uso y manejo del suelo en un periodo reciente, el cual comprende un lapso de 2000 años a la fecha.

Existen áreas que aún muestran puntualmente algunos de los procesos de la morfodinámica la unidad de *pedemonte superior*; tales como barrancos, los bad-lands y las cárcavas. Aunque la mayoría de las formas de erosión acelerada y paisajes degradados han sido modificados por las obras de preparación del terreno para restauración del suelo, aun es posible encontrar, como se indicó en el capítulo IV, zonas extensas con relictos de suelo (como pedestales y pináculos) que indican la cantidad volumétrica de material que se ha perdido por erosión hídrica.

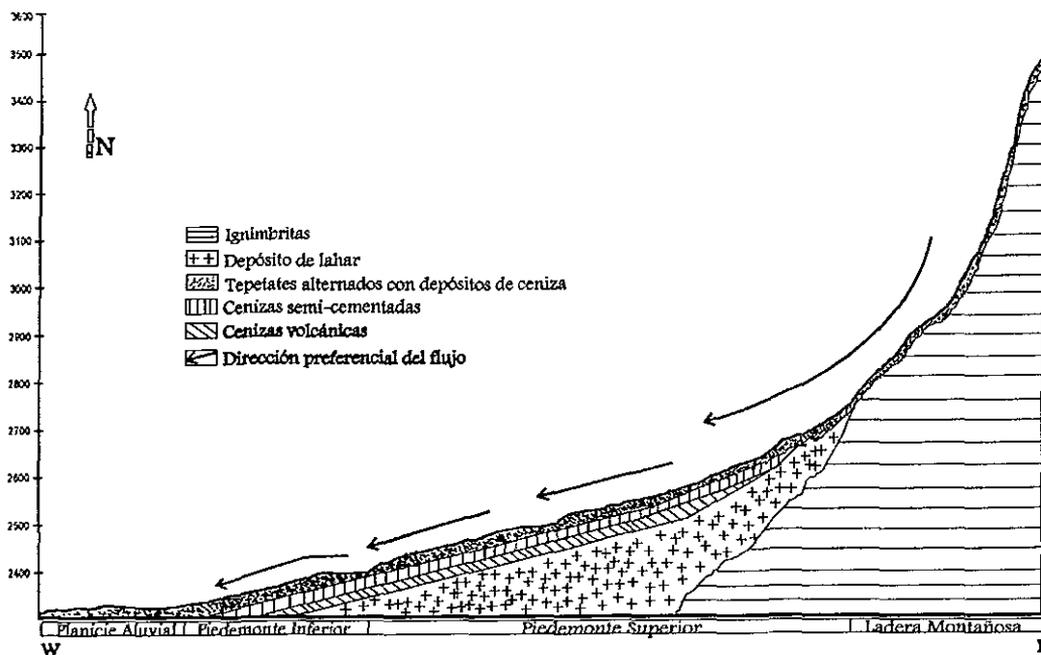


Figura 5.1 Perfil longitudinal del área de estudio en el cual se puede apreciar el arreglo (estructura) de los materiales que la componen. Obsérvese al piedemonte superior que por su posición geomorfológica en el paisaje, su ángulo de pendiente (valor medio:  $17.5^\circ$ ), el acomodo y características de permeabilidad de los materiales y las prácticas de uso del suelo, han propiciado la erosión acelerada de los suelos por flujos en la dirección preferencial e-w. (Esc. vertical 1: 14,300. Esc. horizontal 1:75,900. Fuente geológica Mooser, 1992. Mapa de localización de perfiles al final de este capítulo, Figura 5.16).

### 5.2.2 *Piedemonte superior y las cárcavas*

De acuerdo con lo expuesto arriba, en este apartado se plantea, en base de la fotointerpretación geomorfológica y a las observaciones en campo, posibles *bases explicativas* de lo que sucede entre el funcionamiento de algunas unidades de erosión acelerada y la morfología al interior de la unidad del *pedemonte superior*.

Estas formulaciones pueden sentar una base hipotética para estudios y observaciones posteriores de manera más detallada y periódica en donde se involucren el seguimiento y las estimaciones de pérdida de material de manera directa, para que coadyuven al total entendimiento del origen (causalidad) y evolución de los procesos de erosión acelerada en el área de estudio. Cabe destacar también, que no existe una subdivisión del relieve previamente elaborada para ambientes geomórficos pedemontanos con características similares al del área de estudio, por lo que se adaptaron algunos de los principios establecidos para laderas “típicas” en ambientes templados no glaciáricos (Parsons, 1988).

Además, como ya se dijo con anterioridad, la condición principal para que se hayan presentado etapas muy agudas de erosión acelerada en la unidad de *pedemonte superior*, es la disposición de los materiales subyacentes (capas horizontalmente estratificadas de cenizas provenientes de diversos eventos piroclásticos), la pendiente del terreno, la función geomorfológica “natural” de esta unidad y por supuesto, el uso y manejo del suelo. Esta condición influye en la dirección preferencial de la escorrentía y los flujos subsuperficiales (e-w).

Al interior del *pedemonte superior* se observa que el comportamiento fluvial de las cárcavas está controlado por la dirección de la pendiente dominante y por la disposición y características de los materiales; además por la morfología al interior de la unidad (el micro-relieve en esta unidad geomorfológica es predominantemente de morfología convexa) y la inclinación de la pendiente local. Existe una relación estrecha entonces, entre la morfología interna del *pedemonte superior* y los sistemas de cárcavas; esta relación es observable en el control de la dirección de los escurrimientos de las cárcavas en la parte alta del *pedemonte superior* de la cuenca del río Chapingo, aunque en las zonas dentro del área del río San Bernardino, también es posible apreciarla solo que en una escala menor, debido a que las dimensiones (amplitud y profundidad) de los barrancos son menores en relación con los del río del norte. Sin embargo, existe la posibilidad de explicar el funcionamiento de manera

similar ya que existen similitudes morfológicas en ambas cuencas. Estas son las superficies cumbrales interfluviales ocupadas por agricultura, laderas de barranco modificadas por los trabajos de reforestación, y además presentar el mismo arreglo de materiales, entre otras afinidades geomorfológicas. En el siguiente perfil esquemático (Figura 5.2) se muestra gráficamente esta relación:

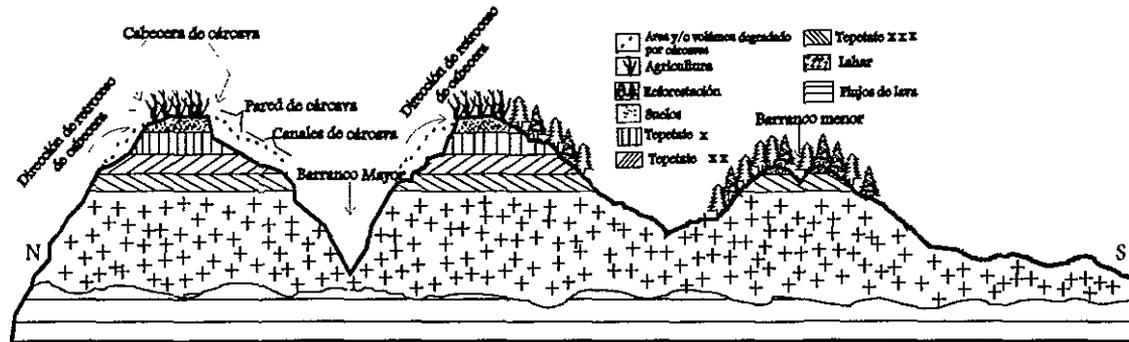


Figura 5.2 Perfil esquemático en donde se presenta la distribución de los sistemas de cárcavas en el interior del piedemonte superior, así como la cobertura del terreno y arreglo de los materiales que lo componen. Los diferentes depósitos de ceniza están representados como tepetates dentro del gráfico y se plasmaron en base a las observaciones de campo más no se utilizó una nomenclatura específica de clasificación de estos materiales.

De acuerdo con el perfil, las zonas en donde actualmente inciden algunos sistemas de cárcavas corresponden a las *superficies cumbrales interfluviales* de los depósitos de los lahares cubiertas de piroclastos finos; así como también a las zonas de transición de dichas superficies hacia lo que sería propiamente la porción superior de las paredes de barrancos.

Según Hall (1983) y Conacher y Dalrymple (1977 *op. cit.* en Parsons, 1988) las zonas planas en las *superficies cumbrales de ladera*, los procesos de formación de suelo se facilitan por ser la unidad relativamente más estable del paisaje. Este principio coincide con las características de los suelos de la zona de estudio ya que las áreas agrícolas se establecieron en las cumbres interfluviales de los lahares, en donde los suelos alcanzaron un gran desarrollo por su forma semi-plana y su poca inclinación local. En estas subunidades el movimiento de agua es predominantemente vertical (Parsons, 1988) excepto donde el terreno presenta ondulaciones y cerca de la zona de transición hacia el *hombro de ladera* ( así lo llama Hall, 1983, citando a Ruhe, 1975). Según lo anteriormente citado, el punto crítico del desarrollo y extensión de las cárcavas se encuentra precisamente en las superficies a las que sus cabeceras “buscan” remontar y que corresponden a las partes planas interfluviales que

presentan pendientes de 5 a 10° (suelos agrícolas y reforestados establecidos en las superficies interfluviales).

En algunos sistemas de cárcavas la superficie del *canal principal* así como sus *paredes* se encuentran dentro de la transición de las áreas cumbreles hacia el *hombro*, esta subunidad de ladera, Dalrymple (1968) llama *ladera superior convexa*, por esta característica morfológica; en dicha subunidad se puede esperar que suceda la salida de flujo subsuperficial, caída de bloques, así como microdeslizamientos (hecho que se corroboró en algunos sitios). La morfología convexa que caracteriza a estos terrenos provoca que las superficies de escorrentía sean maximizadas por lo que resultan ser superficies altamente erosivas y relativamente inestables (Parsons, 1988; Hall, 1983) (suceso que se observó en algunos límites de cárcavas). En estas superficies también se pudo apreciar el movimiento lateral de material de acuerdo al incremento del grado de la pendiente por flujos no concentrados y concentrados (canalillos y pequeños barrancos).

En las zonas de transición del *hombro de ladera* hacia lo que es propiamente, lo que Dalrymple llama (1968 *op. cit.* en Siebe *et al.*, 1996) *pared de caída*, (y Hall llama *dorso de ladera*, citando a Ruhe, 1975), los procesos dominantes que teóricamente pueden ocurrir, coinciden con lo que sucede en algunos sistemas de cárcavas establecidos en estas subunidades: caída y (micro) deslizamientos de bloques e intemperismo físico y químico, en tepetates sobre todo.

En las partes altimétricamente inferiores (*pared de caída inferior*) de estas zonas, se forman abarrancamientos pequeños (de algunos metros de incisión), pues las superficies de transporte de material se dan en forma de flujos concentrados (erosión fluvial).

Por esta razón, las cárcavas funcionan, mediante procesos puramente fluviales, prácticamente dentro del área de influencia de los barrancos, ocupando las porciones superiores de sus paredes que tienen un alto grado de pendiente, lo cual explica su gran dinámica. Estas áreas llegan a alcanzar hasta 20° de inclinación de la pendiente, y por su escasa cobertura y procesos dominantes, son ya una transición a bad-lands.

Por lo tanto, existe una relación funcional de las cárcavas con la morfología del relieve (microrrelieve) ya que la configuración de éste, en la gran mayoría de las áreas donde se ubican las cárcavas, es predominantemente convexo (transversal y longitudinalmente).

La pendiente local y la predominante también influyen en su dinámica pues el incremento de la pendiente de las áreas convexas (*hombros de ladera*) hacia las superficies interfluviales (*cumbrales*) provoca la intensificación de los procesos de erosión hídrica, traducida en una transición de erosión en cárcavas hacia erosión fluvial por barrancos con transporte de sedimentos hacia la *pared de caída o dorso de ladera* (observar los esquemas de Dalrymple, Figura. 5.3 y Hall, Figura 5.4).

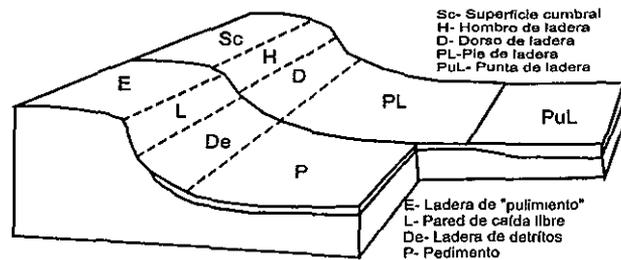


Figura 5.3 Elementos de las laderas tomado de Hall (1983) y éste a su vez de Ruhe (1975). Primer plano de Wood (1942) y segundo plano de Ruhe (1960). Las subunidades para fragmentar al piedemonte superior en subunidades y de las cuales se han mencionado algunas están basadas en este esquema. Algunos de los principales procesos de ladera pueden consultarse en Hall (1983), Parsons (1988), y Dalrymple (1968).

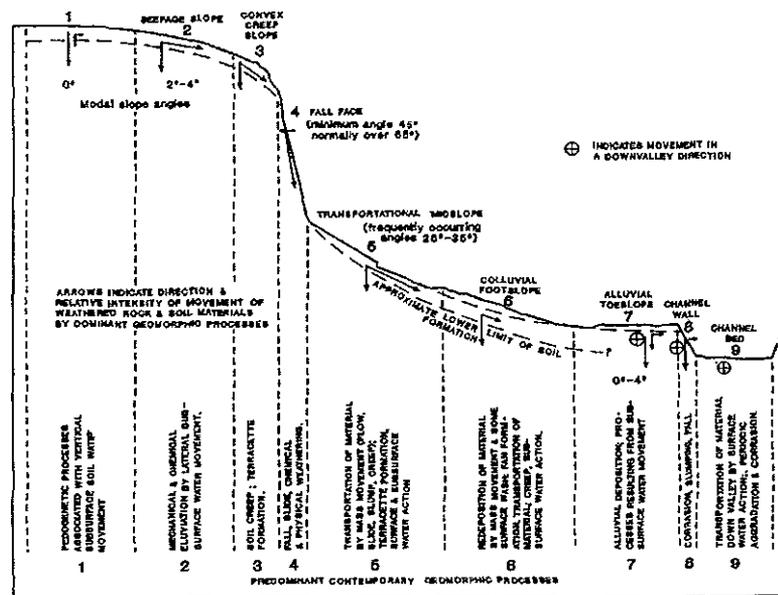


Figura 5.4 Modelo de las nueve unidades de ladera y procesos geomórficos predominantes contemporáneos. Tomado de Parsons (1988, en base a Dalrymple et al., 1968). Algunos de estos principios teóricos pueden apreciarse de manera cualitativa en la zona bajo análisis, tal como se ha mencionado.

En síntesis, en estas subunidades del *piedemonte superior* es donde los sistemas de cárcavas operan gracias a la interacción compleja de la morfología del microrrelieve, la pendiente dominante y local, las propiedades de permeabilidad de los materiales más superficiales (suelos, capas de cenizas endurecidas "tepetates") y el uso y manejo

del suelo a lo largo de la historia en la zona. Este último hecho radica en la cobertura a que fueron sometidos los suelos. Por otra parte, en los sistemas de cárcavas no se observan medidas contra la erosión en las cabeceras. En algunas partes, el canal principal de los sistemas solo cuenta con un muro de retención de azolves.

En la gran mayoría de las superficies agrícolas que se encuentran sobre el *pedemonte superior* existen hileras de magueyes plantadas paralelamente a las curvas de nivel, ayudando a la retención del material del suelo que se mueve preferencialmente en la dirección de la pendiente (este-oeste). En algunos casos, la dirección de los flujos de agua está controlada por la morfología local del terreno, y por lo tanto, la salida del material se presenta en direcciones predominantes sur-norte. Estos flujos están controlados por los niveles de base inmediatos (locales) que son los cauces de barrancos. En dichas áreas “laterales” de las zonas agrícolas no se observa ninguna medida para evitar los proceso de erosión por *riles* y flujos laminares y por lo tanto, conservar el suelo.

En el caso del acarcavamiento en la unidad de *Iomerío* responde también a la morfología en su interior, pues el área en la que funcionan las cárcavas, incrementa su pendiente hacia los niveles altitudinalmente superiores, ladera arriba (esta pendiente alcanza hasta 15° de inclinación).

Esta porción del terreno en donde se encuentra este acarcavamiento, presenta una forma convexa, tanto en su perfil transversal como longitudinal. Por lo tanto, se plantea que la configuración morfológica de esta unidad influye en la formación de la escorrentía así como en el control de la infiltración.

Estas características podrían bien ser relacionadas con las propiedades de los suelos y los materiales subyacentes, ya que al igual que en el *pedemonte superior*, podrían ser suelos poco desarrollados a partir de cenizas volcánicas depositados estratificadamente (por lluvia piroclástica); aunque éstas, se encuentran sobre un flujo lávico andesítico. Por lo tanto, las características de los materiales y la morfología y pendiente de esta unidad geomorfológica permitirían la formación de escorrentía (difusa y concentrada) así como también las generación de flujos subsuperficiales por la saturación de suelos, su sellamiento y la impermeabilidad de los tepetates.

Esta sistema de cárcavas no sería muy significativo si se observa desde un punto de vista estático, pero debido a las características geomorfológicas arriba mencionadas se podría esperar el crecimiento periódico de dicho sistema.

### 5.2.3 Piedemonte superior y los Bad-Lands

Los bad-lands, como se indicó en el capítulo del levantamiento de erosión, son terrenos en donde los procesos de erosión hídrica han actuado muy intensamente dejando grandes extensiones con pedestales, pináculos y cenizas volcánicas cementadas expuestas (afloradas). Estos paisajes muestran, por un lado, la cantidad en términos de volumen, de la pérdida de suelo ocurrida, y por otra, indican la diferente erodabilidad de los distintos tipos de tepetate. La dinámica actual y seguramente, el grado de intensidad de la erosión alcanzado en el pasado de estas áreas, tuvieron una estrecha relación con su posición al interior del terreno de la unidad geomorfológica *piedemonte superior*. De acuerdo con la delimitación del microrrelieve, que se ha hecho anteriormente para el caso de las cárcavas, la mayor parte de los bad-lands se han desarrollado en los *hombros* (Hall, 1983) o en los sectores de la *ladera superior convexa* (Dalrymple, 1968 *op. cit.* en Siebe 1996). Incluyendo a los materiales y la morfología del terreno, una vez que se han alterado las condiciones originales de la vegetación, es decir, se ha desprotegido a los suelos, lo que contribuye de gran manera a la dinámica de estas unidades es la longitud y el grado de inclinación de la pendiente local, que en algunos casos rebasa los 20°. Los niveles de base locales también juegan un papel importante en el control de la dirección de la esorrentía. Obsérvese Figura 5.5 en donde se representan la dirección de los flujos, y la posición de estas unidades en el terreno del *piedemonte superior*.

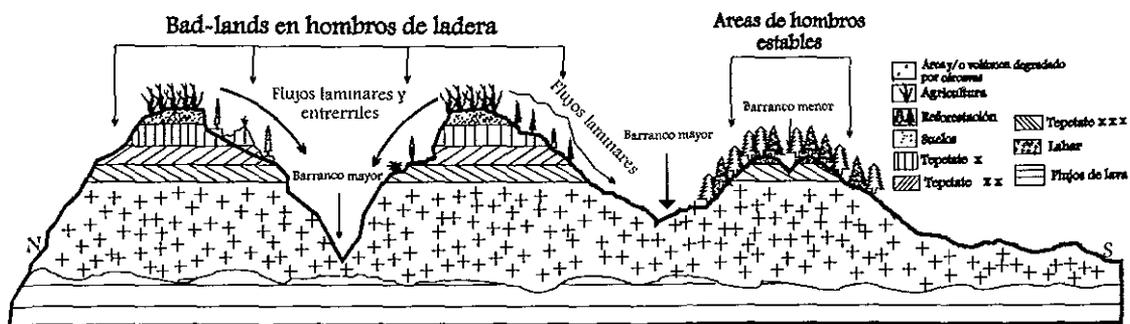


Figura 5.5. Esquema de la distribución espacial de los bad-lands en los "hombros" de las superficies cumbreles interfluviales dentro del piedemonte superior. La mayoría de estas áreas permanecen activas por su posición en el terreno, hecho que se refleja en el desarrollo incipiente de la vegetación implantada por las obras de reforestación.

Uno de los criterios para la delimitación de las unidades de bad-lands fue la carencia de cobertura del suelo y de materiales como los tepetates, lo cual indica cierta dinámica de procesos erosivos laminares y concentrados; este hecho se verificó en campo, puntualmente, en los depósitos recientes durante la época de lluvias en estas

unidades. Los bad-lands se originaron cuando se *transgredió el umbral geomórfico* por causa del mal uso y manejo del suelo, modificando el régimen hidrológico por el cambio en la cubierta vegetal natural de los suelos. Este hecho a su vez, generó el *incremento en la erosividad de la escorrentía*, regulada por las condiciones de pendiente, estructura acomodo y propiedades de los materiales en el *pedemonte superior* así como por el microrrelieve, como se observa en los perfiles esquemáticos. Aunque es difícil hacer conjeturas acerca del origen de los bad-lands, ya que éstos se pudieron haber originado a partir de diversas combinaciones de procesos de erosión hídrica, así como también, a partir de diversas facetas y periodos erosivos.

Se puede asumir que una de las etapas iniciales de los actuales bad-lands seguramente fue el *acarcavamiento*, proceso remontante que erosionó las porciones cumbreles de los interfluvios. Estos procesos pueden observarse en las áreas adyacentes de los sistemas de cárcavas, en donde las superficies están completamente desprovistas de suelo. Estas áreas pueden ser entonces, zonas degradadas por *acarcavamientos* y *abarrancamientos* originados por un proceso que aún sigue latente en alguna zona cercana a éstos: las cárcavas. La unidad de bad-land que se sitúa en la parte centro-oriental de la cuenca del río San Bernardino, puede ser un buen ejemplo de la influencia del relieve en el control de la escorrentía. Esquemáticamente, puede explicarse su apariencia y forma en base a su perfil transversal y longitudinal, el cual es una combinación de *ladera convexa con contorno convexo* (según Huggett 1975, *op. cit.* en Hall, 1983). Ver diagrama de Huggett y perfil del bad-land en la Figura 5.6.

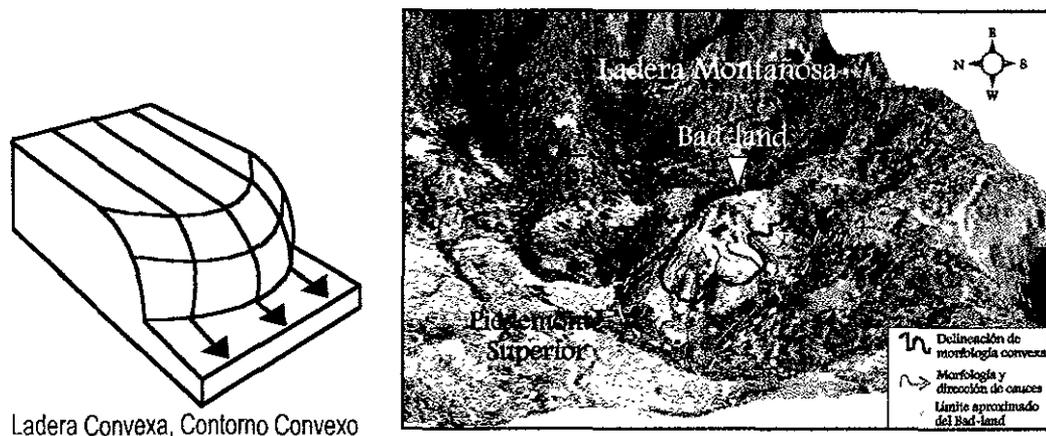


Figura 5.6 Esquema en donde se puede apreciar la influencia de la morfología convexa del relieve en la dirección de las líneas de flujo (izq.) (según Huggett, 1975, *op. cit.*, en Hall, 1983). En la imagen derecha, se aprecia un modelo (vista) en 3D del Bad-land de la porción centro-oriental de la cuenca del río San Bernardino. Esta vista exagerada en su escala vertical tres veces permite visualizar la morfología de la unidad en la que se encuentran funcionando los barrancos, así como su dirección preferencial (este-oeste). El principio teórico sobre la morfología de este bad-land podría servir como un elemento explicativo acerca del origen y evolución de esta área degradada junto con otras variables, como los materiales, uso histórico del suelo, etc.

De la figura anterior, puede decirse que la convexidad del relieve influye en el control de la dirección de las líneas de flujo (cauces), las cuales, se “abren” en cauces paralelos siguiendo la dirección de acuerdo a la pendiente; conforme se acercan al área de transición con el *pedemonte superior*, confluyen en un cauce de segundo orden a una altura de 2580 msnm aprox.

Los pináculos del bad-land, así como, las áreas tepetatosas desprovistas de suelo y vegetación, en la porción central del bad-land, aportan gran parte del material a los barrancos que lo disecan.

Este material se origina por caída de pequeños bloques (de algunos cm de diámetro) debido al “desmoronamiento” del tepetate, proceso causado por el intemperismo y los flujos hídricos.

Los barrancos centrales de este bad-land son los de mayor profundidad de incisión (25 m) y los que presentan paredes más verticales. Por lo tanto, la morfología convexa del límite inferior de la unidad de *ladera montañosa* junto con los grandes “paquetes” de ceniza volcánica cementada y la pendiente, han provocado la extensión de esta zona ladera arriba. Probablemente, el impacto humano en esta área o por un fenómeno, como un incendio, generaron la iniciación de procesos de erosión muy severos.

#### 5.2.4 *Piedemonte superior y las áreas con erosión extrema*

Estas unidades, como ya se mencionó en los capítulos anteriores, son zonas muy degradadas por procesos de erosión hídrica que han sufrido un impacto positivo de las obras de recuperación, pero en donde todavía se registra cierta actividad erosiva por barrancos pequeños y sobre todo, operan procesos de erosión entresurcos, flujos laminares, y erosión en *riles* o canalillos.

Estas unidades es muy común encontrarlas en zonas con pendientes locales con un importante grado de inclinación, las cuales alcanzan hasta 18° y que, han impedido su completa estabilización. Otro factor muy importante que se observa que puede influir en la recuperación por completo de estas áreas es, la posición en el relieve (observación en fotointerpretación y en campo) y las características de impermeabilidad de los materiales.

Algunas áreas con *erosión extrema* ocupan porciones convexas de los depósitos de los lahares, en las áreas superiores de las paredes de los barrancos mayores. Estos

barrancos poseen paredes verticales con valles en formas de “V”. El material de lahar cubierto de piroclastos finos (tefras) ha provocado el modelamiento de *laderas superiores* en forma convexa por erosión fluvial y que forman parte de las paredes superiores de barrancos. Lo que se observó en campo respecto a estas zonas, bien puede ser explicado por lo que Parsons (1988) y Hall (1983) resaltan. Dicho autores mencionan que los procesos dominantes en estas fracciones del terreno, en ambientes templados (Parsons, 1988), generalmente tienden a convertirlas en superficies extensas de degradación por la acción de la erosión laminar, flujos subsuperficiales y por la acción del lavado de *riles* o canalillos..

Algunas de estas áreas, por procesos erosivos y por la convexidad del terreno, pueden desarrollar inclusive, áreas de aporte de material para movimientos gravitacionales de remoción en masa (ver Figura 5.7). De hecho, dentro de las paredes de los barrancos del río Chapingo, es posible encontrar antiguas cicatrices de desprendimiento que indican, que en algún momento existió la remoción de importantes volúmenes de material hacia el lecho del río.

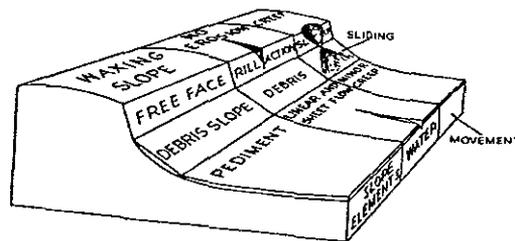


Figura 5.7 Los cuatro elementos de ladera y los principales procesos que pueden ocurrir (de acuerdo a King, 1957 op. cit. en Parsons, 1988)

Algunas zonas de *hombros* de pared de barranco, en el afluente principal del río Chapingo, fueron intervenidas con terraceo con fines de reforestación. Estas áreas, como ya se mencionó arriba, son sectores geomorfológicamente muy dinámicos, lo que explica que aún exista el transporte y redistribución de material por flujos laminares y en *riles* o canalillos al interior de las terrazas.

Las especies de pinos en estas áreas son otro indicador de la dinámica en estas zonas en recuperación, pues debido al desnivel generado entre cada terraza y por estar emplazadas sobre un *hombro* de pared superior de barranco mayor, los flujos laminares se dirigen durante las tormentas hacia el nivel de base local, representado por el fondo del barranco. Por esta razón, desde los niveles superiores de las terrazas, existe una migración de material hacia los niveles altitudinalmente inferiores, a través de flujos laminares, *enterriles* y por *riles*. Dentro de estas zonas, cada árbol

(individuo) se encuentra sobre pequeños montículos, que se han generado por el lavado del material a su alrededor, siendo su tronco y su sistema radicular, la única protección contra los procesos erosivos. Existen individuos a los cuales, el lavado en *riles* (o canalillos) y laminar, han dejado al descubierto sus raíces, lo cual representa un riesgo potencial para la mortalidad de las especies implantadas en estas zonas.

La dinámica geomorfológica general, a pesar de que se intentó nivelar el terreno, parece dominar e influir el movimiento de material en estas unidades de erosión. Obsérvese la Figura 5.8. que contiene las imágenes de una zona “típica” de esta clase de procesos en la parte superior una pared de barranco mayor en el Río Chapingo.



### 5.2.5 Erosión acelerada y uso del suelo

Los procesos de erosión acelerada pueden ser analizados en relación a los cambios de uso de suelo y las prácticas agrícolas (Morgan, 1979). Retomando el capítulo del uso del suelo y el de erosión acelerada de este trabajo, existe una estrecha relación entre ambas entidades. Esta relación puede explicarse a partir de la coincidencia espacial entre las unidades de erosión acelerada y las unidades de uso del suelo. El siguiente cuadro (5.3) resume dicha relación espacial. Las relaciones más importantes, (coincidencia espacial de las unidades de ambos mapas) indicadas por la extensión superficial de las unidades de erosión acelerada sobre las del uso del suelo, se resaltan en *cursivas*. La coincidencia espacial se realizó por medio de la sobreposición digital de las unidades del mapa-inventario de erosión acelerada y del de uso del suelo (cobertura del terreno) con una operación de “cruzamiento” en el SIG. Las unidades de la tabla, corresponden al área de estudio, es decir, a ambas cuencas.

*Cuadro 5.3 Tabla resultante de la relación (espacial) entre el uso del suelo (cobertura del terreno) y la erosión acelerada.*

Unidades del inventario de erosión acelerada	Unidades del mapa del uso del suelo (cobertura del terreno)	Área en ha
<i>Cárcavas</i>	<i>Agricultura</i>	<i>3</i>
<i>Cárcavas</i>	<i>Área reforestada</i>	<i>17</i>
Cárcavas	Bosque	0.1
Bad-land	Agricultura	0.2
Bad-land	Superficie sin cobertura aparente	0.7
<i>Bad-land</i>	<i>Área reforestada</i>	<i>41</i>
Bad-land	Bosque	0.2
Área con erosión extrema	Área reforestada	33
Áreas con erosión extrema	Agricultura	0.6

Las formas de erosión acelerada parecen no ser significativas en cuanto a su extensión, más su importancia estriba en que podrían intensificar su actividad erosiva y seguir extendiéndose sobre las áreas agrícolas, erosionando sus suelos por completo; además existe un riesgo de que su desarrollo tienda hacia las áreas en vías de recuperación. Los resultados del cuadro 5.3 indican que los procesos y las unidades de erosión acelerada inciden principalmente en las áreas reforestadas. Los bad-land son,

como ya se indicó con anterioridad, zonas muy degradadas por procesos de erosión acelerada en las cuales la estabilización y la recuperación han sido muy lentos.

Los procesos de erosión en cárcavas se presentan principalmente en las áreas agrícolas, en sus bordes laterales. No se aprecia una relación (espacial) numérica directa, como en el caso de los bad-land, lo cual se explica por que los sistemas de cárcavas y sus cabeceras se encuentran, como ya se dijo, en los límites de las áreas de cultivo; estas áreas poseen un perfil de suelo mayormente desarrollado que las áreas adyacentes. La erosión en cárcavas también se presenta sobre las zonas en recuperación en sistemas transitorios hacia barrancos, lo que señala que además de incidir sobre los suelos agrícolas, también lo hacen sobre suelos en áreas reforestadas y tepetates. Sobre éstos últimos, se desarrollan procesos de erosión laminar y fluvial en (pequeños barrancos de algunos metros de amplitud y profundidad).

La dinámica remontante de las cárcavas también se observa en los remanentes de áreas agrícolas por procesos de retroceso constante en las cabeceras y por la depositación de material en las áreas contiguas.

En las partes de las cabeceras es posible apreciar cicatrices recientes originados por la caída de “paquetes” de suelo y por el asentamiento de las cabeceras provocado por la salida de flujos subsuperficiales. También se puede advertir la existencia de formas resultantes de los lavados laminares y de *riles* en sus paredes. Los depósitos se encuentran en la parte inferior, junto a los canales de desagüe. Esto es un claro ejemplo de erosión remontante.

Como ya se ha resaltado a lo largo de este trabajo, existen áreas agrícolas que no tienen alguna práctica de conservación de suelos en sus porciones laterales (límites paralelos a la dirección preferencial de los depósitos que forman a los piedemonte, superior e inferior, y es e-w). Algunas en el mejor de los casos, solo tienen una línea de refuerzo de magueyes en sus límites transversales (transversales a la pendiente predominante). También es factible encontrar *riles* o canalillos y flujos laminares al interior de estas áreas al comienzo de la temporada de lluvias (observación de campo). Debido a que existen grandes extensiones de *bad-lands* y de *áreas con erosión extrema* que se encuentran emplazadas sobre las áreas de recuperación (áreas reforestadas en diferentes obras y técnicas de preparación del terreno como zanjas, terrazas, etc.), los procesos en los que actualmente se presentan dichas áreas afectan a las especies arbóreas implantadas.

Estos procesos son los abarrancamientos, los lavados laminares y la erosión en *riles* sobre tepetates. Estos procesos pueden existir de manera aislada o en combinación.

La relación del uso del suelo y los procesos de erosión acelerada, se da a partir de la utilización, para fines agrícolas y de pastoreo, de algunos depósitos aluviales originados en las laderas montañosas. Estos sedimentos se encuentran rellenando pequeños valles “encajonados” situados al pie de las laderas.

Por otro lado, los acontecimientos históricos han modificado los cambios de uso del suelo, los que a su vez, han modificado la dinámica geomorfológica exógena que se ha reflejado en la aceleración de la erosión de los suelos. Los problemas más severos o las etapas erosivas que han llevado a la disecación del paisaje han ocurrido bajo ciertas características del uso del suelo, en donde no se tomó ningún tipo de medida para controlar la pérdida del estrato. Actualmente el proyecto Lago de Texcoco lleva a cabo prácticas de recuperación del suelo, agua y vegetación a través de trabajos de restauración ecológica de muy altos costos, lo que se traduce en un cambio muy importante en la dinámica del paisaje. Conjuntando los resultados obtenidos del análisis geomorfológico de la erosión acelerada y del uso del suelo, se puede abordar el siguiente apartado de análisis conjunto.

### 5.3 Análisis ambiental de la erosión acelerada

Uno de los criterios de regionalización geomorfológica para manejo y utilización de los recursos naturales se basa en la síntesis entre las unidades y elementos espaciales del terreno. Estas unidades deben contener variables relativamente estables, como la forma del relieve y la roca, junto con elementos menos estables, tales como la vegetación y el uso del suelo, por ejemplo (Bocco y Mendoza, 1997).

Los componentes de estas unidades espaciales homogéneas se definen utilizando técnicas de observación del terreno, cartografía digital y verificación de campo (Bocco y Mendoza *op. cit.*). Bajo este esquema, se analizan e integran las variables geomorfológicas, del uso del suelo y de erosión acelerada, en base a su localización y distribución espacial relativa.

Una de las maneras de sintetizar la relación geomorfológica y de uso del suelo con la erosión acelerada es por medio del análisis de perfiles geomorfológicos. El análisis de perfiles es un método geomorfológico muy útil para entender y complementar la

información contenida en un mapa elaborado bajo los criterios de esta disciplina (Palacio, 1985). De esta forma, se realizaron cuatro perfiles en la zona de estudio, tres de ellos transversales y uno longitudinal, (este último, a lo largo del parteaguas común de las cuencas de río Chapingo y San Bernardino). Para la localización de los perfiles, consultar Figura 5.16 en la parte final de este capítulo.

Dichos perfiles sintetizan la coincidencia espacial (relación) de los factores que intervienen en el desarrollo de los procesos erosivos de la zona de estudio y se obtuvieron a partir del mapa final de este trabajo (del cual se habla en el apartado de resultados posteriormente).

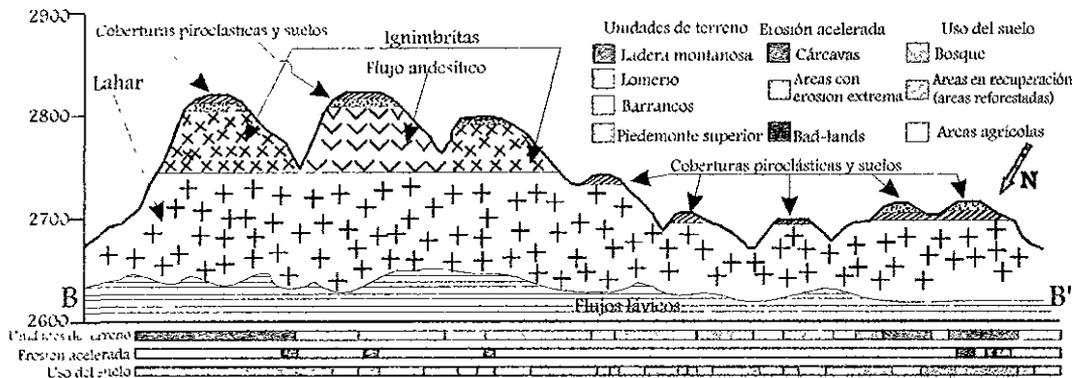


Figura 5. 9. Perfil transversal B-B' de las cuencas de los ríos Chapingo y San Bernardino. Los perfiles incluyen litología (en base a Mooser, 1992), materiales, geomorfología, erosión acelerada y uso del suelo. Esta figura representa la distribución espacial de cada una de las variables del estudio. (La escala horizontal es 1: 50 000, y la vertical es 1: 7 100).

El primer perfil transversal (Figura 5.9) se puede observar cómo los barrancos han disecado al terreno con valle de diferentes profundidades en forma de "V". También se puede apreciar la relación que guardan las formas y unidades del terreno con el uso del suelo. En general, las áreas agrícolas sobre el *pedemonte superior* se establecieron sobre las áreas de los interfluvios; esto se explica por que los suelos se desarrollaron gracias a la estabilidad relativa que existe en estas superficies semiplanas. Sin embargo, con el cambio en la cobertura vegetal provocada por la extensión de las superficies agrícolas, estas áreas, junto con casi todas las superficies potencialmente agrícolas, fueron degradadas por los procesos de erosión hídrica en una dirección, como ya se apuntó antes, este-oeste.

Las superficies en donde se han transportado casi totalmente los materiales que conformaban al suelo son las superficies cumbreales interfluviales, sus *hombros* y las áreas adyacentes. Cabe mencionar que en este perfil, se pueden apreciar también las

coincidencias espaciales las unidades mapeadas, por ejemplo, el bosque con la unidad de ladera, las áreas agrícolas y las áreas reforestadas emplazadas en las paredes de los barrancos, así como los materiales sobre los que se encuentran. Respecto a éstos últimos, se resaltan solamente en las superficies interfluviales ya que se pudieron observar en campo, pero las emisiones y depósitos de las cenizas, así como los tepetates, se encuentran en todo el *pedemonte superior*.

En el siguiente perfil transversal C-C', Figura 5. 10, de igual manera que en el perfil anterior, se observa la distribución del uso del suelo en las geoformas al interior de la unidad del *pedemonte superior*. En este perfil, se aprecia claramente una *suavización* muy notable del terreno en las áreas de los interfluvios y en general, de toda esta porción del *pedemonte superior*, también se presenta una menor incisión de los barrancos. Esto se debe a que la pendiente ha disminuido y la cercanía al nivel de base regional, representado por el nivel del ex-lago de Texcoco, se encuentran muy próximo; esto seguramente provocó que el flujo del lahar en movimiento empezara a perder fuerza de transporte y comenzara su deposición. Sin embargo, esta zona en términos de erosión de suelos también se encuentra muy degradada y se observan importantes esfuerzos, en términos de extensión ocupada, de las prácticas de reforestación. Es posible observar, de igual manera, la ocupación de las cárcavas sobre las porciones, tanto agrícolas como de reforestación, en los bordes de las áreas cumbreales y en los *hombros* de dichas superficies. Este perfil se encuentra muy cercano a la transición con el *pedemonte inferior*.

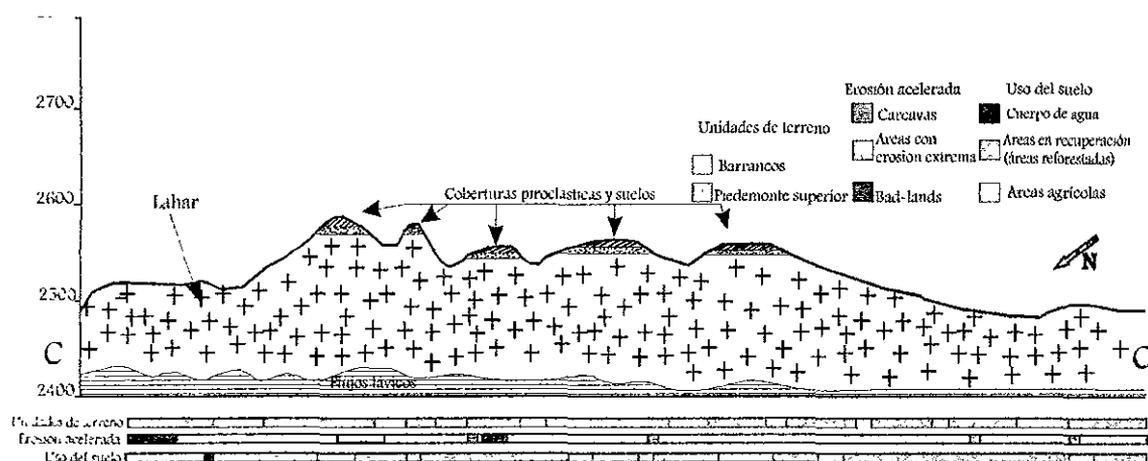


Figura 5. 10. Perfil transversal C-C', en el cual se observa una suavización del relieve y menores profundidades de disección en los barrancos. En esta zona también se aprecia una distribución relacionada con la forma del terreno y los usos del suelo. Las áreas agrícolas quedaron disminuidas por los procesos de erosión hídrica a porciones muy pequeñas con relación a las zonas reforestadas (la escala horizontal es 1:50 000, y la vertical es 1: 5,500; para su localización, consultar Figura 5.16).

En el último de los perfiles transversales (D-D') en la Figura 5.11, se exageró la escala vertical para poder apreciar la morfología del terreno. Esta zona se encuentra en el *picdemonte inferior*, y se observan los tres eventos laháricos que conforman esta unidad. Sus límites aproximados se resaltan con las líneas continuas verticales trazadas en su interior.

Esta unidad es la más *suavizada*, en términos de morfología, ya que presenta amplias superficies aplanadas. Dichas áreas son los depósitos superficiales de los tres eventos laháricos. Esta característica del *pie demonte inferior*, junto con el poco grado de pendiente que posee ( $5.5^\circ$ ), permitió el desarrollo y conservación del suelo. Esta unidad es, en términos de degradación por erosión acelerada en áreas agrícolas, la más conservada de la zona de estudio para ambas cuencas; aunque haya sido utilizada antes que el *pie demonte superior*. La diferencia se debe sobre todo al grado de pendiente del terreno, la altura relativa entre las unidades de terreno con respecto a la altura del nivel de base regional, que es la actual planicie lacustre del ex-lago de Texcoco, y por supuesto al mal manejo del recurso suelo, pues existen referencias acerca de que las áreas agrícolas actuales en el *pie demonte superior* se ocuparon para el pastoreo intensivo en la época colonial.

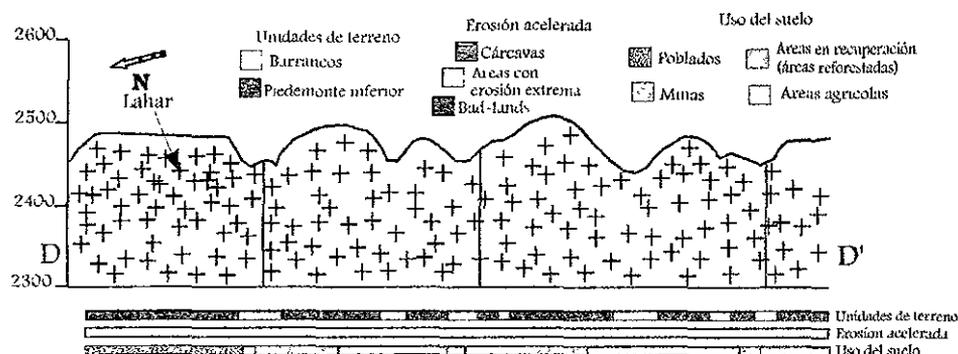


Figura 5.11. Perfil transversal D-D' en el que se aprecian los tres eventos laháricos que componen al *pie demonte inferior*. En esta unidad el uso predominante es el agrícola con la presencia inexistente de erosión acelerada (o por lo menos no bajo los parámetros del presente trabajo). Se observa también la relación del uso del suelo con la geomorfología de la zona en la extracción de material para construcción de los depósitos de los lahares. (escala hor. 1: 50 000; esc. vert. 1: 10 000).

En el perfil longitudinal A-A' de la zona de estudio (Figura 5.12), se pueden observar las áreas de transición entre las unidades de terreno (geomorfológicas), su morfología de cada una de ellas, los materiales y su litología; asimismo, se observa el uso del suelo predominante de cada una unidad del terreno. No se incluyeron a las unidades de erosión acelerada ya que por la escala del perfil, no se apreciaban.

Es posible resumir, el hecho de que la mayor erosión de suelos se ha presentado en la unidad del *pedemonte superior*, como respuesta a este proceso, la cobertura principal de dicha unidad es la forestal, inducida antrópicamente por la Comisión Lago de Texcoco. Esta cobertura, según el análisis histórico, es la que le correspondía originalmente antes de ser alterada para su uso agrícola, sin embargo, el papel geomorfológico, sin la existencia de un suelo desarrollado, que a su vez, esté cubierto de vegetación que genere estabilidad, predomina en la dinámica del terreno. Esto se observa sobre todo en zonas con rompimientos de pendiente, en áreas morfológicamente convexas y en zonas cercanas a los cauces de barrancos. En este perfil también es posible observar la pendiente de la unidad de ladera montañosa, que corresponde a  $22^\circ$  de pendiente media. Es importante ya que la cobertura de pastos y el bosque, fueron afectados por los incendios en la primera mitad de 1988. Esta unidad presenta, por lo tanto, un peligro potencial de pérdida del suelos por erosión hídrica en la temporada de lluvias inmediata a los incendios; de hecho, por las primeras lluvias se reportaron avenidas extraordinarias en los cauces del río San Bernardino y Santa Mónica (río colindante al sur), de las presas de control de azolves establecidas en los cauces de ambos ríos, se encontraban saturadas de sedimentos y se observó también que las corrientes se desbordaron de sus cauces.

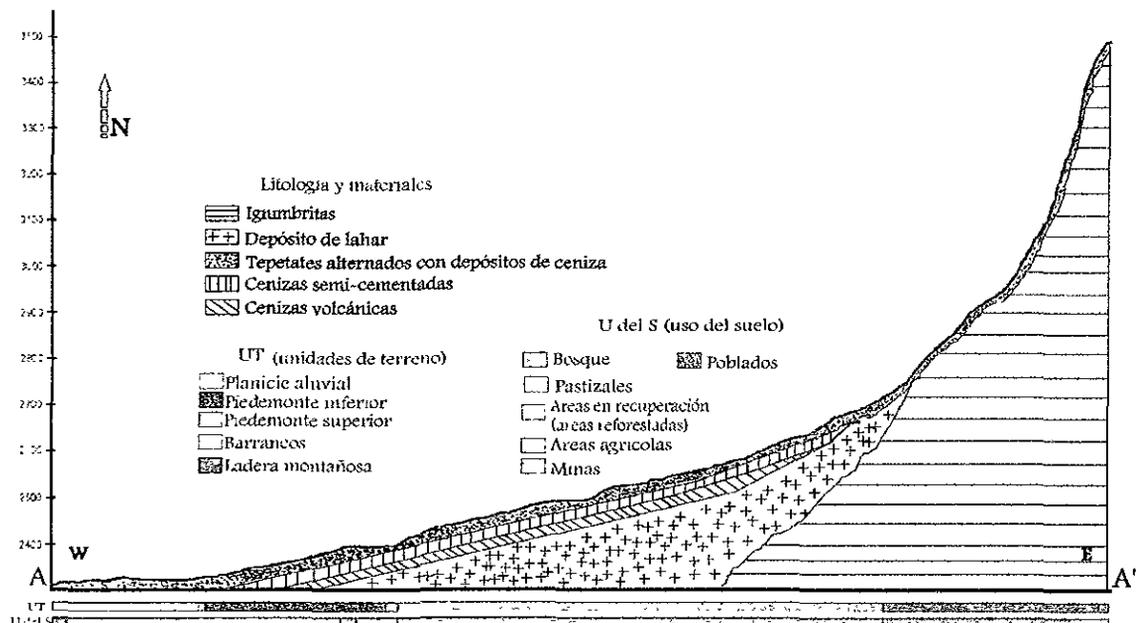


Figura 5.12 En este perfil se observa la distribución del uso del suelo con relación a las unidades de terreno, la litología y los materiales que componen a dichas unidades geomorfológicas. El tipo de uso del suelo o cobertura del terreno predominante, por ejemplo, en la unidad de ladera montañosa es el bosque. Esta relación toma mayor importancia cuando ocurre un suceso perturbador como los incendios forestales (esc. vert. 1: 14 200. Esc. hor. 1: 76 00).

Por lo tanto, con y el análisis de perfiles geomorfológicos, y lo descrito anteriormente en este trabajo, se reconoce una clara relación entre los usos del suelo, sus cambios a lo largo de la historia de la ocupación humana y los procesos geomorfológicos de erosión acelerada. El área en donde se han reflejado los cambios más significativos es la unidad de terreno del *pedemonte superior*.

La Figura 5.13, muestra la extensión en cuanto a superficie que ocupan actualmente las unidades de *uso del suelo* y las de *erosión acelerada* sobre esta unidad de terreno.

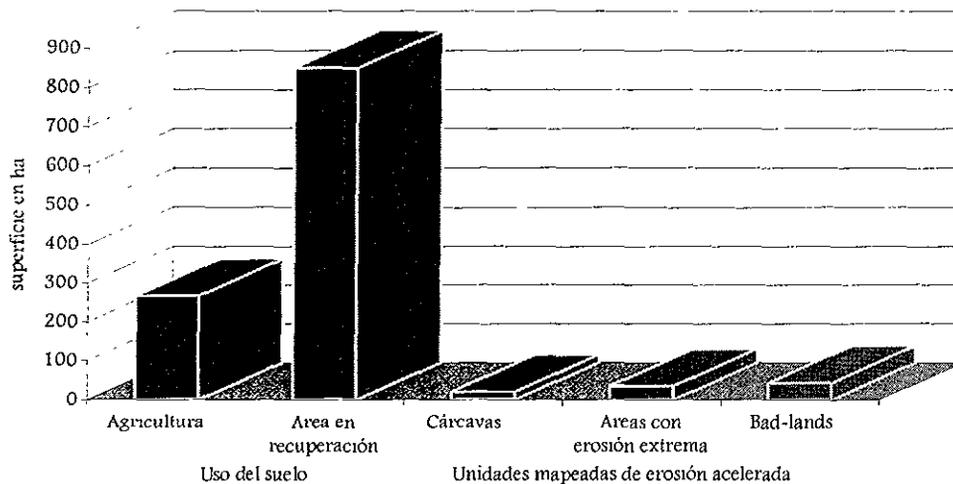


Figura 5.13 Gráfico de áreas de uso del suelo y erosión en la unidad de *pedemonte superior*.

En la zona existen áreas activas desde el punto de vista erosivo, que en relación con su cobertura parecen ser mínimas (cuadro 5.4), pero representan un peligro potencial para las obras de conservación y más aún para las áreas agrícolas aun subsisten en la unidad de *pedemonte superior*. Estas áreas no aportan grandes cantidades de material hacia los cauces principales (IISACH, 1990) pero es importante su dinámica local para la distribución y redistribución del material hacia el interior de esta unidad del paisaje.

El papel geomorfológico ha influido de manera muy importante desde que se modificaron las condiciones de estabilidad de los materiales por la utilización del suelo para uso agrícola desde la época prehispánica. Además, la mayor parte de los procesos que aun persisten en la zona de estudio, muestran la morfodinámica general a la que estuvieron sujetas las tierras hasta antes de comenzar las obras de recuperación de suelos por parte de la ex-Comisión Lago de Texcoco en 1973.

Según Córdova y Parsons (1997), en base a los métodos geomorfológicos y arqueológicos (“*geoarqueológico*”) obtuvieron que, en la región del piedemonte de Texcoco (“*texcocano*”), hubo una etapa de inestabilidad y erosión geológica muy intensa en el periodo correspondiente al Holoceno. Dicha observación se basó en el análisis microestratigráfico de pináculos. Se registró la presencia de tres horizontes consecutivos de tepetate que se encuentran expuestos en la mayoría de las áreas erosionadas. Según sus interpretaciones, al observar una capa de tepetate en un pedestal que se conservó, antes de una emisión de ceniza hace 5300 años aprox., indica un periodo de erosión geológica rápida muy severa para el Holoceno temprano y medio.

El desarrollo de los suelos sobre estas capas de ceniza cementadas sugiere un largo periodo de estabilidad hasta que se presentan los primeros asentamientos humanos (550 a.C.). La *primera fase de erosión acelerada* se presenta entre el periodo de 500 al año 1000 d.C., y *la segunda* en el año 1600 d.C.

La primera etapa se debió principalmente al abandono del área, y por ende, el abandono de las áreas agrícolas; esto trajo consigo el deterioro de las únicas obras de conservación de suelos en terrazas agrícolas conocidas como *metepantlis* junto con algunos muros de contención de sedimentos en dichas terrazas. Como se mencionó en capítulos anteriores, los *metepantlis* son un tipo de terraceo prehispánico que consiste en hileras de magueyes que se plantan perpendicular a la pendiente para retener el suelo (aunque en el área de Texcoco las filas o hileras pueden ser formadas por tierra y roca).

Muchos de los *metepantlis* fueron irrigados aprovechando la escorrentía de la zona y no a través de canales artificiales.

Este periodo de abandono provocó la compactación de los suelos en las terrazas, por la acción de la salpicadura de las gotas de lluvia y por el aumento de la escorrentía superficial; estos procesos generaron también la destrucción de muchas otras áreas, pues esta etapa se prolongó hasta probablemente 1250 d.C., cuando se inicia históricamente, la etapa temprana de la ocupación azteca.

La erosión de esta etapa es difícil de evaluar según los autores, ya que no existen acumulaciones o restos de los suelos que fueron erosionados, sin embargo, se tienen localizados algunos depósitos en las partes bajas de los valles de los ríos San Juan Teotihuacán y Papalotla. Estos depósitos fueron transportados a partir de flujos

constantes durante la etapa del “abandono” de la población y durante un periodo de lluvias muy abundante.

En dicha etapa, fue más importante la formación de *riles* que la incisión vertical en los barrancos. El lavado por *riles* (canalillos) fue el proceso dominante de erosión acelerada que degradó gran parte de las áreas con suelos desarrolladas sobre tepetates. Posteriormente, hubo cambios muy notables cuando se inicia la etapa de “recuperación” azteca, pues se reconstruyeron muchos de los *metepantlis* arruinados y se generaron obras para que se desarrollaran los suelos de manera artificial sobre éstos. Se lograron controlar las incisiones de barrancos y cárcavas con la construcción de muros de retención.

El sitio pudo ser totalmente recuperado para el año de 1450. En base a una datación de radiocarbono de una pieza de carbón vegetal, que Córdova y Parsons (1997) encontraron a 15 cm de profundidad de un pedestal, obtuvieron que, las últimas etapas de utilización del terreno para uso agrícola fue en año 1485 ±73 d.C., lo cual apunta, que las zonas alrededor del pedestal pudieron estar rellenas y en producción todavía para el año 1500 de nuestra era.

Para esta fecha se presentó un declive en la población por la colonización y comenzó un rápido proceso de degradación de tierras. Se volvieron a destruir todas las obras de ingeniería azteca y comenzó la incisión vertical por sistemas de barrancos y la erosión remontante de las cárcavas. La escorrentía superficial fue el proceso más importante en la pérdida y destrucción de los suelos de esta época. Los procesos en esta etapa final definieron gran parte de la configuración actual del terreno.

Aunado al abandono de estas tierras, durante las primeras tres décadas del siglo XVII se registraron grandes avenidas de aguas producidos por las frecuentes lluvias en la cuenca de México (Gibson, 1964, *op cit.* en Córdova y Parsons, 1997). En la zona del piedemonte texcocano se identificaron grandes volúmenes de material originados por eventos catastróficos que probablemente provienen de las tierras abandonadas en el *piedemonte superior e inferior*.

Estos autores concluyen que han sido más importantes los cambios de uso del suelo y su uso intensivo, que los cambios climáticos, pues éstos solo han influido por los cortos periodos de intensas lluvias registrados en los últimos 400 años.

De acuerdo con los autores citados la reconstrucción geomorfológica del área de estudio es básica para entender la situación actual del paisaje.

En cuanto al uso del suelo, se refiere, en contraste con Córdova y Parsons (1997), Pérez (1974) habla de que la unidad del *pedemonte superior* sufrió los principales cambios de uso hacia el inicio de la etapa azteca media, alrededor del S. XI (1200) y no hasta los años 1350's, como lo indican Córdova y Parsons (1997); sin embargo, esta información posiblemente se complementa para indicar una intensificación muy importante de uso del suelo para estas fechas y de la iniciación de su degradación por procesos de erosión acelerada. Estas primeras poblaciones tenían prácticas de conservación de suelos, tal vez no tan extensas como en la época de los reyes Texcocanos, pero con cierto control de la pérdida del suelo (*metepantlis* y muros para la retención de sedimentos).

Con el abandono de las tierras y de las obras de conservación comienza un incremento en la intensidad erosiva de los terrenos agrícolas.

Probablemente los principales procesos que se presentaron fueron la erosión entresurcos, la erosión en *riles* y la incisión vertical, como cárcavas y barrancos pequeños ya que la presencia de los materiales altamente erodables y la inclinación de la pendiente así lo sugieren. Una hipótesis probable es la posibilidad de que el origen de la degradación del *pedemonte superior* se haya dado a partir de la formación de túneles, ya que estos procesos pueden llegar a modelar laderas enteras en terrenos con materiales altamente impermeables (Parsons, 1988), como los tepetates. A lo largo de los terrenos agrícolas de grandes extensiones, seguramente dominaron los procesos de erosión superficial, en combinación con la iniciación de escorrentía concentrada, en los rompimientos de pendiente locales (en el borde de terrazas), como cárcavas y sistemas de barrancos. Las cárcavas posiblemente tuvieron varios orígenes, aunque muy complejos, tal vez implicaron asentamientos provocados por el flujo subsuperficial y el colapso de túneles tal como lo registró Bocco (1990) en un ambiente volcánico con estratos cementados (*duripanes*), característica semejante al área de estudio.

Estos procesos actuaron aprox. por un periodo de 1200 años. Para el inicio del repoblamiento (año 1250 d.C. aprox.) se intensifican las obras de recuperación y protección de suelos contra los procesos erosivos por medio de obras más extensas de conservación de suelo y agua. Estas obras controlaron los procesos erosivos casi en su totalidad aprox. para el año 1400, en un lapso de tiempo de 200 años, en donde la cobertura de bosque en el *pedemonte superior* había desaparecido completamente.

Dichas obras incluyeron la creación de suelos de manera artificial sobre depósitos de tepetates a través de la construcción de terrazas.

Córdova y Parsons (1997) evaluaron un perfil de un pedestal perteneciente a un *metepantli* en la porción oeste del *pedemonte superior* en la cuenca del río Chapingo. Esta obra se construyó sobre un horizonte truncado por erosión acelerada (horizonte 2Bt), en donde el horizonte 1Ap es, básicamente un depósito artificial de material de arenas mezclado con arcillas y limos que fueron depositados por flujos superficiales.

El contenido de materia orgánica es relativamente alto, comparado con otros suelos en el área. Estas terrazas fueron explotadas de manera muy intensa, según lo indican, los restos de alfarería encontrados en sus alrededores, debida a la existencia de una población elevada. El análisis del horizonte 1Ap muestra un depósito de arena bien ordenado con una estratificación horizontal de arcillas junto con partículas arenosas. Su compactación y alta densidad se debe al arreglo de las partículas y además muestra un uso intensivo por la falta de fósforo.

En resumen, este tipo de obra es un tipo especial dentro de las obras de recuperación de suelos azteca que se construían sobre horizontes endurecidos. Su distribución de partículas presenta un buen arreglo y son mayormente arenosos con partículas finas introducidas por flujos superficiales (ver Figura 5.14 ).

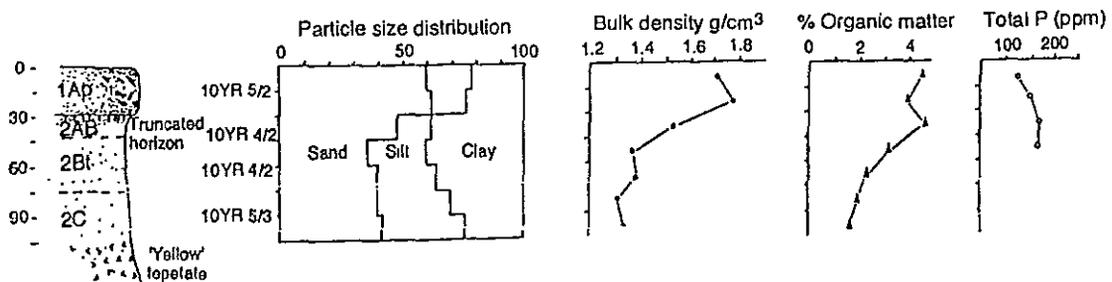


Figura 5.14 Perfiles típicos de suelo de los Metepantlis (tomado de Córdova y Parsons, 1997).

En general, este tipo de obras de control de la erosión fueron abandonadas al iniciar el proceso de colonización. Según un balance histórico de la relación entre las etapas erosivas más importantes, en la época pre-colonial de la zona, y su número de pobladores empírica e hipotéticamente quedaría de la siguiente forma (Figura 5.15):

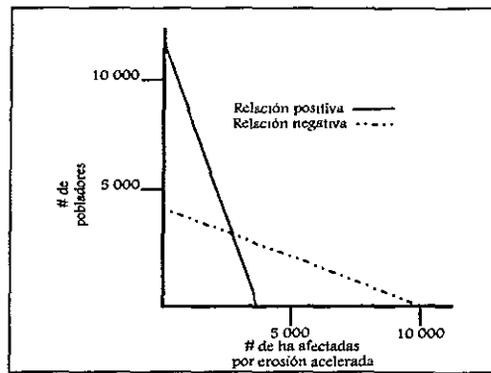


Figura 5.15 Relación (hipotética) entre erosión acelerada y población en la época prehispánica

Esta relación parecería no ser objetiva ya que muchos de los problemas de erosión acelerada se agudizan junto con el crecimiento de la población (FAO, 1979, Morgan, 1979, Bergsma, 1996). En este caso la relación es inversa debido a las medidas y estrategias conservacionistas y sostenibles de los modos de producción azteca, las cuales, evitaban la pérdida del suelo y la explotación desmedida de los recursos naturales de su entorno geográfico (Pérez, 1975).

Con la ocupación del área por la nueva población española, se introducen nuevos métodos de producción de las tierras diferentes que provocan su rápida degradación por erosión acelerada y la destrucción de muchas de las obras de conservación de suelos aztecas. Al entrar una nueva etapa de poblamiento sin una política ni una estrategia concreta para la conservación del uso del suelo, los procesos erosivos dominantes son los de pérdida de suelos por *riles*, *enterriles* y por los procesos de erosión remontante y los procesos fluviales en los sistemas de pequeños barrancos.

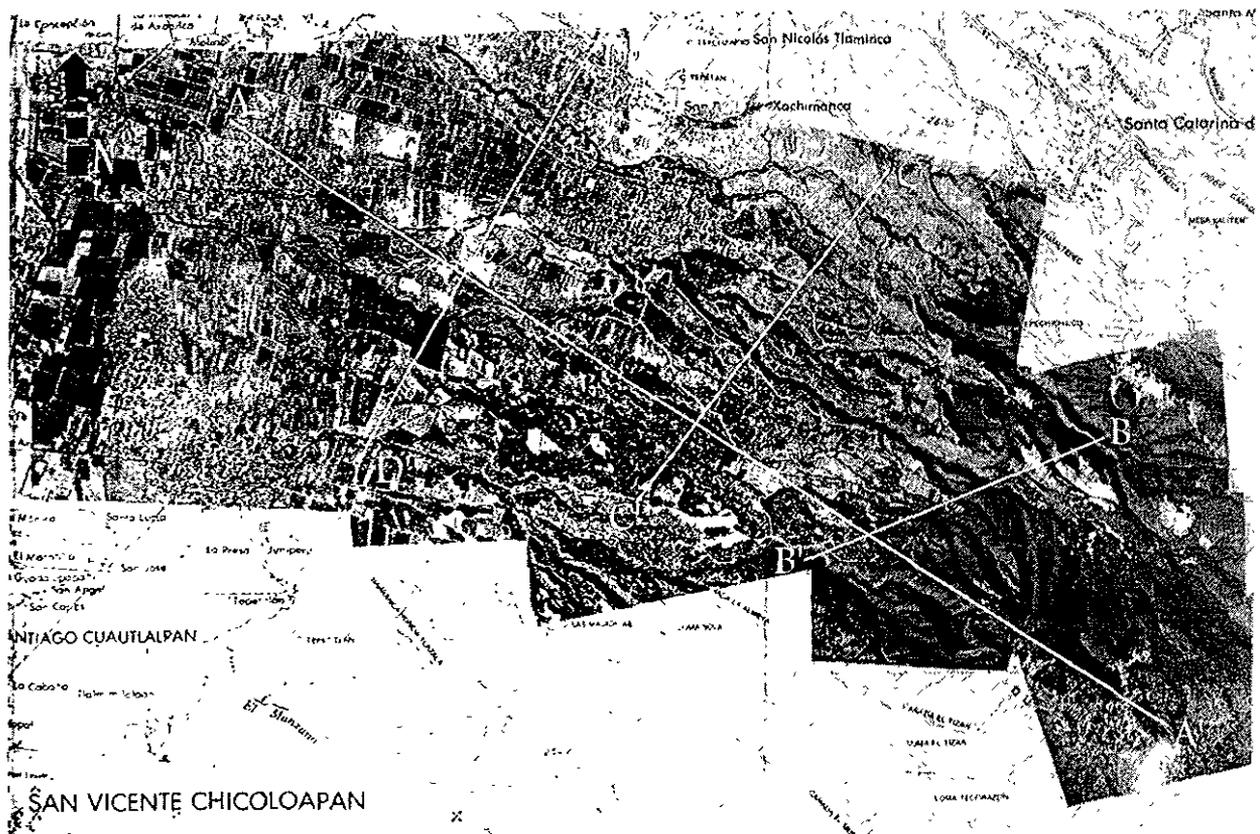
Por lo tanto, la combinación entre las condiciones geomorfológicas del terreno, las características del uso del suelo y el clima, en especial de la lluvia, originaron un paisaje sumamente erosionado que hasta 1972 por medio del cálculo con la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), se calculaba en 16.31 ton/ha/año de suelo en las áreas de tepetates (IISACH, 1990).

Con respecto al incendio forestal que afectó en los meses de mayo a junio de 1998 a las masas de bosque y pastizales establecidas dentro de la unidad de ladera montañosa y de lomerío volcánico de la zona de estudio, la presencia de procesos de lavado en *riles* y la erosión *enterriles* y la laminar, efectúan su trabajo de transporte de suelos y también es posible observar el lavado de cenizas volcánicas no cementadas. La pendiente de la unidad de ladera montañosa es de 22.5°. La del lomerío es de 15°. Es posible observar por el gran dinamismo en las presas de retención de azolves

inmediatas en los cauces principales a estas dos zonas. El material acumulado en ellas, indica la importancia de la erosión de los suelos debida a: la eliminación de la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la morfología al interior de las unidades. El transporte mayor del suelo y los materiales más superficiales se da en las etapas iniciales de la época de lluvias, en donde el suelo está absolutamente desprovisto de vegetación. A lo largo de la temporada de lluvias se observa, de manera diferencial, la recuperación del área incendiada.

Esta diferenciación se debe principalmente a los factores de exposición de laderas, posición en el terreno y características locales, propias de las áreas, como las propiedades físicas y químicas del suelo, historia de utilización, etc. Debido al crecimiento de la vegetación en pequeñas especies, en algunos sectores, la intensidad de la erosión hídrica es menor. Este factor está influenciado, según observaciones de campo, con la exposición de las laderas, la densidad arbórea, y la morfología de las laderas.

Figura 5.16 Mapa de localización de los perfiles geomorfológicos (esc. aprox 1: 41 600)



## CAPITULO VI RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES

Cabe comentar, que a lo largo del presente trabajo, se han reportado pertinentemente, algunos de los resultados encontrados a lo largo de dicha investigación; sin embargo, en este apartado se resumen los resultados más genéricos obtenidos.

### 6.1 Resultados

Dentro de la conformación de la base de datos necesaria para este estudio, se llevó a cabo la generación del mapa base. Éste consistió en un fotomosaico elaborado mediante el acoplamiento de imágenes fotográficas, bajo métodos totalmente digitales. En lo que al *método de elaboración* se refiere, la rapidez que brindan los programas de manipulación de las imágenes es una gran ventaja para la generación de cartografía geomorfológica de manera automatizada. Este hecho resulta importante especialmente cuando se trata de áreas en constante monitoreo y control para su adecuada gestión. La zona de estudio es un buen ejemplo de este tipo de áreas. La transferencia de información proveniente de la de fotointerpretación es prácticamente directa pues los rasgos identificados en el formato analógico son fácilmente identificados en el fotomosaico desplegado en pantalla. Esta es una ventaja sobre la manera tradicional de hacerlo, la cual consistía en la mayoría de los casos en la transferencia de información a mapas topográficos.

La exactitud del fotomosaico digital que se obtuvo, al aplicar una corrección geométrica por medio de un polinomio del tercer orden, dentro del SIG, fue de un sigma de 19.2. Esto significa que existen 19.2 pixeles de desplazamiento del total del mosaico. Esto equivale a 64.5 m de desplazamiento total, ya que la resolución de dicho mosaico es de 3.36 m.

El sigma de error no influye en la precisión de la cartografía resultante, pues dentro de los ámbitos de la geomorfología aplicada, no son requeridas las estimaciones de alta exactitud, ya que los límites en escalas como la que se trabajó, se definen por áreas de transición entre las unidades, por lo que es válido el rango de pixeles desplazados.

Referente al *análisis geomorfológico de la erosión acelerada*, el producto cartográfico resultante es un mapa escala 1:20 000 en donde se sintetizan los elementos que intervienen el análisis que se realizó\* :

---

\* El presente mapa se encuentra en la parte final de este trabajo dentro de un anexo cartográfico. La escala original fue modificada para fines de presentación de esta tesis.

- ▲ Mapa de unidades geomorfológicas
- ▲ Uso del suelo y/o cobertura del terreno
- ▲ Unidades de erosión acelerada.

Este mapa presenta un carácter sintético de los factores que intervinieron e intervienen en el desarrollo de los procesos erosivos de la zona de estudio (geomorfología y uso del suelo). También es una base cartográfica de carácter integral que puede servir como base de regionalización ecológica a detalle para la planeación ambiental y para retomar esfuerzos de recuperación de suelo, agua y vegetación.

Se encontró una estrecha relación entre las áreas que aún presentan actividad erosiva y unidad geomorfológica correspondiente al *pedemonte superior*. De hecho, esta unidad es la que concentra la actividad erosiva más intensa en términos de procesos actuales y áreas degradadas; asimismo, esta entidad espacial representa la zona de mayor intervención antrópica, y actualmente sujeta a obras de recuperación ambiental y restauración de suelo, agua y vegetación de retención de sedimentos.

Esta relación se observa al interior de la subunidad del *pedemonte superior* por las características geométricas del relieve, como forma y pendiente, así como por la estructura y composición de los materiales que lo componen.

## 6.2 Conclusiones

Ha sido de fundamental importancia el uso de la tierra para la intensificación o disminución de los procesos erosivos en el área de estudio; el análisis de los eventos históricos, en un primer acercamiento, así lo muestran.

El manejo que el hombre ha tenido sobre las tierras ha determinado el grado de deterioro, en un periodo determinado.

Dentro de un ambiente geomorfológico con las características del área, los estudios desde el enfoque geomorfológico permiten evaluar aquellas zonas, a través del mapeo, en donde se pueden emplazar sin riesgo a su destrucción, las obras para el control de la erosión de suelos, ya que se observó que la dinámica geomorfológica en la mayoría de los casos, influye de manera muy importante en la estabilización del terreno. Esto ocurre sobre todo en el *pedemonte superior*.

La retrospectiva histórica también manifiesta una respuesta del ambiente geográfico al uso de la tierra para la agricultura con y sin medidas de conservación de suelos:

por un lado, las obras conservacionistas para la producción sostenida del modelo económico azteca, y por otro, el modo de producción intensivo de la época de la

colonia, con un abandono absoluto de las prácticas de conservación del suelo, la sobreexplotación de las tierras, la utilización de las áreas agrícolas para la alimentación de ganado menor (pastoreo), la sobreexplotación de la zona boscosa sin ningún control, etc.

Aunado a estos factores, el elemento geodinámico exógeno, provocan la iniciación de un periodo de inestabilidad que ha modelado el paisaje hasta años recientes, cuando en una cuarta etapa de intervención, se establecen obras de recuperación y conservación de las zonas degradadas por la erosión hídrica. Esta cuarta etapa de intervención ha generado efectos positivos sobre las áreas, ya que se han logrado controlar algunos de los procesos de erosión acelerada. Dicho efecto se observa en la existencia de algunas áreas con verdaderos microclimas boscosos, debido a la iniciación del desarrollo del suelo en base a la sedimentación lo cual ha permitido cierto desarrollo de mantillo y la conservación y proliferación de las especies arbóreas introducidas junto con otras especies vegetales asociadas.

Existe una clara relación entre la geomorfología del área de estudio y la dinámica erosiva. El *pedemonte superior* posee un dinámica propia a nivel unidad. Ésta fue alterada (transgredida) por la intervención del hombre, provocando la aceleración morfodinámica del relieve, a través de procesos de erosión acelerada, como cárcavas y barrancos, que han degradado gran parte de las tierras que yacían sobre dicha unidad. Su dinámica se basa en la interacción de tres factores principales: las características y propiedades de los materiales (de manera central, los tepetates), el grado y longitud de las pendientes, y las características del manejo del suelo.

Al interior del *pedemonte superior*, las características de los materiales subyacentes, el grado de la pendiente local, la morfología y posición en las laderas (microrrelieve), junto con el manejo de la tierra, han generado la pérdida del suelo de manera diferencial, así como también, dichos factores siguen influyendo para la estabilización absoluta de las áreas en donde sigue existiendo aporte, transporte y redepositación de material.

Por lo tanto, los estudios desde el enfoque geomorfológico, permiten entender la dinámica general de las unidades y los procesos al interior de éstas, por medio del análisis y estudios de ladera, estudios funcionales de escalas más detalladas. Por lo tanto, se plantea como una alternativa, el estudio de los procesos de ladera como una posible alternativa para abordar las áreas ya mapeadas en este trabajo, así como el apoyo en métodos de análisis geomorfológico, tales como, las mediciones en campo, de

perdida de suelo, como de regresión de cabeceras por ejemplo. Estos estudios pueden realizarse con la ayuda de técnicas recientes de medición de sedimentos, y de percepción remota como la videografía, fotografía aérea digital de alta resolución y los SIG.

Tocante a este último punto, los materiales derivados de los levantamientos videográficos y de fotografía aérea digital de alta resolución, representan una alternativa ventajosa sobre los materiales que se han utilizado de manera tradicional en estudios de esta naturaleza. La integración de las herramientas y productos generados de los sistemas de percepción remota alternativos, en interacción con los SIG y los métodos de análisis geomorfológico, son una posibilidad viable para abordar los estudios de erosión acelerada. Una de las principales ventajas es el manejo, casi en su totalidad, de la información de manera digital (automatizada), que permite realizar el intercambio de información en diversos formatos para su manejo para diferentes fines. Un ejemplo concreto de lo anterior es la construcción del mapa base: el fotomosaico digital, el cual fue utilizado para diversos fines del presente trabajo. La generación de las impresiones a partir del procesamiento digital de las fotografías es otro buen ejemplo de esto. Otra de las ventajas principales es la información en color contenida en las fotografías digitales, ya que permite identificar los rasgos y formas de erosión de manera más objetiva con relación a la fotografía pancromática en grises. La respuesta espectral de las áreas erosionadas, de las que carecen de cobertura, las áreas de cárcavas, los bad-lands y la vegetación, poseen un rango espectral característico, aunado a su alta resolución espacial, hace más sencilla su discriminación pues su respuesta en color es muy parecida a la realidad de campo. La temporalidad de los materiales es una ventaja esencial para la detección de cambios en forma periódica y multitemporal, de procesos muy dinámicos como las cárcavas por ejemplo. También, la ventaja de poder realizar monitoreos constantes bajo estos métodos, permite cubrir las carencias en cuanto a la producción de materiales aéreo-fotográficos, necesarios para el estudio de eventos como los incendios forestales. Dichos materiales son de gran apoyo para evaluar de primera mano, la extensión y los efectos de estos fenómenos.

Con respecto a los incendios ocurridos, en los meses de mayo y junio de 1988, dentro de la zona de estudio es necesario recurrir a la observación directa de los procesos de erosión acelerada desencadenados por la desaparición de la cobertura vegetal. Además deben realizarse estudios que propongan alternativas acerca de la recuperación de

estas áreas, ya que se encuentran en un proceso inminente de degradación ambiental, los bosques emplazados en la unidad de ladera montañosa.

A manera de recomendación general, se debe poner mayor atención en las áreas que aún muestran alguna actividad erosiva, ya que ponen en riesgo la permanencia y estabilidad de las áreas reforestadas así como también, representan una amenaza para las pocas hectáreas de suelo de las áreas agrícolas en el piedemonte superior, pues no muestran medidas de conservación importantes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adame S. 1998. Evaluación ex-post del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del río Texcoco. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Chapingo, edo. de México, México. 187 págs.
- Arias R., Gómez G., Adame S., Miranda M. 1990. Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco. INEISACH-Proyecto Lago de Texcoco. Montecillo, México. 94 págs.
- Bennema J. De Meester T. 1981. The role of soil erosion and land degradation in process of land evaluation. En Morgan R.P.C. 1981. Soil Conservation Problemas and Porspects Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs 77-86.
- Bergsma Ir. E. 1982. Aerial Photo-Interpretation For Soil Erosion and Conservation Surveys. International Institute For Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, Netherlands. págs 1-57, 1-47, 1-56.
- Bergsma Ir. E. 1996. Terminology For Soil Erosion and Conservation. Subcomission C. Soil and Water Convservation of the International Society of Soil Science. Netherlands. 313 págs
- Bloom A. 1991 Geomorfphology. A Systematic Analisys of Late Cenozoic Landforms. Zond. edition. Prentice Hall. USA. 532 págs.
- Bocco G. 1989a. Cartografía Geomorfológica y Análisis Morfométrico para Estudios de Erosión Acelerada. Estudio de Caso en la Cuenca del Río Tlalpujahua, México. Instituto de Geografía-UNAM. Boletín No.19. México. págs. 39-54.
- Bocco G. 1989b. El Inventario de Erosión Antrópica: Acarcavamientos en la Cuenca del Río Tlalpujahua, México. Instituto de Geografía-UNAM. Boletín No.19. México. págs. 56-68.
- Bocco G. 1990. Gully Erosion Analysis Using Remote Sensing and Geographic Information Systems A Case Study in Central Mexico. Universiteit van Amsterdam. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede. 130 págs.
- Bocco G, Mendoza M.. 1997. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. Instituto de Ecología-UNAM. En imprenta México. 20 págs.
- Bocco G., Palacio J.L., Valenzuela C.R. 1991. Erosión en Cárcavas en el Sistema Volcánico Transmexicano. Un modelo utilizando Percepción Remota, SIG y análisis Geomorfológico. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía No. 22, UNAM, México. págs. 1-24.

Bocco G., Palacio J.L., Valenzuela R. 1991. Integración de la Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográfica. En *Ciencia y Desarrollo*, marzo-abril 1991, Vol XVII, No. 97. México. págs. 79-89.

Bork H. Rohdenburg A. 1981. Rainfall Simulation in Southeast Spain. En Morgan R.P.C. 1981. *Soil Conservation Problemas and Forspects*. Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs. 293-302.

Coll-Hurtado A. 1993. Recursos Naturales para las Actividades Agropecuarias y Forestales en México. Alternativas para el Campo Mexicano Tomo II. Coord. José Luis Calva. Edit. Fontamara. México. págs. 15-30.

Córdova C.E., Parsons J. R. 1997. Geoarchaeology of an Aztec Dispersed Village on the Texcoco Piedmont of Central Mexico. *Geoarchaeology an International Journal*, Vol. 12, No.3., John Wiley & Sons, Inc. USA. págs. 177-210

Cruickshank G. 1995. Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico. Proyecto para mejorar las condiciones ambientales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México. Comisión Nacional del Agua. México. 111 págs.

Daniels R., Hammer R. 1992. Hillslope Processes and Mass Movement. En *Soil Geomorphology*. Edit by John Wiley and Sons, Inc. Canada-USA. Págs. 179-201.

De Cserna Z., De la Fuente M., Palacios M., Triay L., Mitre L., Mota R. 1988. Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neo-tectónicas Regionales en la cuenca de México. Boletín No. 104 del Instituto de Geología, UNAM. México. 71 págs.

Dudal R. 1981. An Evaluation of Conservation Needs. En Morgan R.P.C. 1981. *Soil Conservation Problemas and Forspects*. Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs. 3-12.

Enciclopedia de México 1987. Acolhuacan. Enciclopedias de México S.A de C.V. México. 583 págs.

Escobar D., Everitt J., Noriega J., Cavazos I., Davis M. 1995. A Multispectral Digital Video Computer Sistem for Use as a Research Tool. 15<sup>th</sup> Biennial Workshop on Videography and Color Photography in resource Assensment. Terre hautle, Indiana, May American Society for Photogrammetry . Weslaco, Texas, and Remote Sening, Department of Geography , Geology and Antropology. E.U. págs. 23-30.

Etchevers B., Cruz L., Mares A., Zebrowski C. 1992. Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates en la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). En *Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo*. Terra Suelos Volcánicos endurecidos, V.10 No. especial. Primer Simposio Internacional. UACH. Edo. de México, México. págs. 379-384.

- Evans R. 1980. Mechanics of Water Erosion and their Spatial and Temporal Controls: an empirical viewpoint. En Soil Erosion. Edit by M. Kirkby y R.P.C. Morgan. John Wiley and Sons. England. Págs. 109-125.
- Evans R. 1981. Assessments of Soil Erosion and Peat Wastage for Parts of East Anglia, England. En Morgan R.P.C. 1981. Soil Conservation Problemas and Porspects Jhon Wiley and Sons. Great Britain, U.K. págs. 521-532.
- Everitt J. Escobar D. 1995. Using Video Imagenig Technology for Remote Sensing of Natural Resources. En Memorias del XII Simpósium Latinoamericano de Percepción Remota. SELPER-México. Puerto Vallarta Jal., México. págs. 753-773.
- Everitt J., Gerberman A., Escobar D., Nixon P., Alaniz M. 1987. Detecting Saline Soils with Video Imagery. En Eleventh Biennial Workshop on Color aerial photography and Videography, april 27-may 1. Weslaco, Texas. E.U. págs. 218-223.
- FAO 1967. La erosión del suelo por el Agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Cuadernos de Fomento Agropecuario No. 18. Edit. Por FAO-Roma, Italia. 207 págs.
- García E. 1968. Los climas del Valle de México. Sobretiro No 6. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- García-Oliva F., Maass J. 1990. Consideraciones a las Prácticas de Conservación de Suelos en las Zonas Tropicales. En Revista de difusión Científica, Tecnología y Humanidades No. 2. Vol. 1. México. págs. 11-18.
- Garrido A., López-Blanco J., Palacio J.L. 1998. Procesamiento de Fotografías Digitales de Alta Resolución Dentro de un SIG para Clasificación de Tipos y Rasgos de Erosión en la Vertiente Oriental de la Cuenca de México. En Libro de resúmenes de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, UNAM. México. pág. 12.
- Gerberman, H.A., D.E. Escobar, R.R., Rodriguez, J.H. Everitt. 1988. Color and Multispectral Video Imagery for detecting Soil Mapping Units. En First Workshop on Videography. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Págs. 37-47.
- Gutiérrez M. C., Ortiz C. 1992. Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México. En Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. Terra Suelos Volcánicos endurecidos, V.10 No. especial. Primer Simposio Internacional. UACH. Edo. de México, México. págs. 202-209.
- Hall F. G. 1983. Pedology and Geomorphology. Pub. en Pedogenesis and soil taxonomy. I. concepts and interactions. By L.P. Wilding.N.E. Smeck and G.F. Hall. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands. págs. 117-140.
- Hart, W.G., C.A. Stutte, and M. Newell, 1988. Comparing Imaging Systems for Assessment of diverse Conditions of agricultural Resources. En First Workshop on

- Videography. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. págs. 160-165.
- Hauck F. 1981. The relevance of Soil Conservation. En Morgan R.P.C. 1981. Soil Conservation Problemas and Porspects. Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs. 543-548.
- Hudson N. 1981. Sicial, Politic and Economic Aspects of Soli Conservation. En Morgan R.P.C. 1981. Soil Conservation Problemas and Porspects. Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs. 45-54.
- Hudson N. 1982. Conservación de Suelos. Ediciones Reverté en Español. España. 335 págs.
- ILWIS 1997. Aplications Guide. ILWIS 2.1 for Windows.ILWIS Departament, ITC, Enschede. The Netherlands. 351 págs.
- ILWIS 1997. Reference Guide. ILWIS 2.1 for Windows.ILWIS Departament, ITC, Enschede. The Netherlands. 616 págs.
- Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios Agripefor, Chapingo, 1990. Evaluación del programa de reforestación del proyecto Lago de Texcoco. SARH-CNA-Proyecto Lago de Texcoco. México. 94 págs.
- Instituto de Geografía, UNAM. 1997. Anexo de Términos de Referencia. Del proyecto "Estudio Videográfico de las áreas degradadas en la Cuenca Oriental y la Zona Federal del ex-lago de Texcoco, edo. de México", entre el Instituto de Geografía y la Comisión Nacional del Agua, UNAM, México. 3 págs.
- Instituto Nacional de Ecología, 1996. Transformación de los Sistemas Naturales en México. Gaceta Ecológica INE-SEMARNAP. No. 40, México. págs. 17-21.
- Jones D. 1995. Environmental Change, Geomorphological Change an Sustainability. En Geomorphology and Land Management in a Changing Environment. John Wiley and Sons. England. págs. 11-34.
- Keech M. 1980. Remote Sensing in Planning the Control of Erosion. En Assesment of erosion. Edit, M. de Boodt and D. Gabriels. Jhon Wiley and Sons, Great Britian. págs. 419-425.
- Kirkby J. 1980. The problem. En Soil Erosion. Edit by M. Kirkby y R.P.C. Morgan. John Wiley and Sons. England. págs. 1-16.
- Lal R. 1981. Soil Conservation: Preventive and Control Measures. En Morgan R.P.C. 1981. Soil Conservation Problemas and Porspects Jhon Wilwy and Sons. Great Britain, U.K. págs. 175-184.

- Lal R. 1988. Erodability and Erosivity. Problems and Prospects. En Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society 7515 Northeast Ankeny Road. Nkeny, Iowa. USA. págs. 141-160.
- Lal R. 1988. Soil erosion by wind and water: Problems and prospects. Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society 7515 Northeast Ankeny Road. Nkeny, Iowa. USA. págs. 1-6.
- Lillesand T. Kiefer R., 1979. Remote sensing and image interpretation. Jhon Wiley & Sunsinc. USA. 612 págs.
- Lillesand T., Kiefer R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. USA. 750 págs.
- López-Blanco J. 1998. Sistemas de Información Geográfica (SIG): conceptos, definiciones y contexto metodológico que involucra su uso. En Quivera. Año 1. Número 0, julio 1998. Toluca edo. de México, México. págs. 27-38.
- López-Blanco J. Palacio J.L. 1995. Cuantificación del Crecimiento de las Áreas Erosionadas en Cabeceras de Cárcavas Procesando Imágenes de Video. En Boletín de Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México. págs. 77-100.
- López-Blanco J., 1995. Imágenes digitales de video en evaluaciones de terreno. En Memorias del XII Simposium Latinoamericano de Percepción Remota. SELPER-México. Puerto Vallarta Jal., México. págs. 146-154.
- Lugo J. 1988. Elementos de Geomorfología Aplicada. Instituto de Geografía, UNAM. México. 128 págs.
- Lugo J. 1989. Diccionario Geomorfológico. Editado por el Instituto de Geografía, UNAM. México. 337 págs.
- Lugo J., Ortíz M.A., Bocco G., Palacio J.L. 1998. Conferencia Magistral. En la V Reunión de Geomorfología. En Libro de resúmenes de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 19-21 págs.
- Luján C. 1991. Fotogrametría, principios básicos. Editado por la colección de Textos Universitarios. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua. México. 132 págs.
- Llerena A. y Sánchez B. 1992. Recuperación de tepetates en la vertiente oriental del valle de México. En Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. Terra Suelos Volcánicos endurecidos, V.10 No. especial. Primer Simposio Internacional. UACH. Edo. de México, México. págs. 301-308.
- Maass J. y Martínez-Yrizar A. 1990. Los ecosistemas definición, origen e importancia del concepto. En revista Ciencias especial No. 4. Facultad de ciencias, UNAM. México. págs. 10-27.

Maass M. y García-Oliva F. 1990. La Conservación de Suelos en Zonas Tropicales: El Caso de México. Ciencia y Desarrollo No. 90, Enero-Febrero 1990. CONACYT México. págs. 22-38.

Martínez E. 1996. La restauración ecológica. En revista Ciencias No. 43. Facultad de Ciencias, UNAM. México. págs. 56-61.

Mason S., Rüther H., Smith J. 1997. Investigatiion of the Kodak DCS460 Digital Camera for small-area mapping. En ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remoting Sensing No. 52. Elsevier Science B.V. págs. 202-214.

Mausel P.W. .Edit.. 1988. Introduction to Videography: historical overview, relation to remote sensing, advantages and disvantages. En First Workshop on Videography. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Terre Haute, Indiana, USA. págs. 1-4.

Mausel W. And Wilson J. 1997. The use of High Spatial Resolution Multispectral Digital Camera Data in Soil Applications. 16<sup>TH</sup>. Biennial WorkshoPON Videography and Color Photography. Weslaco, Texas Apr. 29-May 1. USA. págs. 245-259.

Mausel W. Dias W. Wiseman 1997. Determination of Optimal spatial resolution for selected soil, aplicaciones using multispectral digital camera data. 16<sup>TH</sup>. Biennial WorkshoPON Videography and Color Photography. Weslaco, Texas Apr. 29-May 1. USA. págs. 260-273.

Mooser F., Martínez A., Zuñiga A. 1996. Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, Tectónica y Aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad. México. 27 págs.

Morgan R. 1979. Erosion Hazard Assessment. En Topics in Applied Geography Soil Erosion. Longman, London and Great Britain. págs. 26-39.

Navarrete J.A. 1999. El uso de Fotografías Aéreas Digitales y SIG en la Actualización Cartográfica de la Zona Federal del Ex-Lago de Texcoco. Tesis de Licenciatura en Geografía. Colegio de Geografía. FF y L. UNAM, México. 79 págs.

Nayaranan S., Swirsky R., Corboy D., Spight M. 1995. Guía del usuario de Adobe Photoshop ver. 3.0. Adobe Systems. England. 265 págs.

Nayaranan S., Swirsky R., Corboy D., Spight M. 1995. Puesta en marcha de Adobe Photoshop ver 3.0. Adobe Systems. England. 15 págs.

Nimlos J. T. 1987. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. Pub. en Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Edit. Feliciano Ruíz Figueroa. Dpto. de suelos Universidad Autónoma de Chapingo, México. págs. 10-37.

- Ortiz M. 1986. Evaluación de la Velocidad de Desertificación en la Cuenca del río Texcoco. Efecto de la Tecnología Aplicada, Inversiones y Factores Humanos. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. De México. México. 314 págs.
- Palacio J.L. 1985. El croquis geomorfológico: una alternativa en geomorfología aplicada. *Divulgación Geográfica* No. 3. Instituto de Geografía, UNAM. México. 24 págs.
- Palacio J.L. 1988. Destrucción de Tierras en el Flanco Oriental del Nevado de Toluca, el caso de la Cuenca del Arroyo el Zaguán. *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM* No. 18. México. págs. 9-29.
- Palacio J.L. 1996. Apuntes sobre Percepción Remota y Videografía. Escrito para la materia de Laboratorio de Cartografía 2. Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM. México. 20 págs.
- Palacio J.L. López-Blanco J. 1994. Videography: an alternative remote sensing tool for monitoring gully erosion. *En ITC Journal* 1994-3. Al Enschede The Netherlands. págs. 233-237.
- Palacio J.L., López-Blanco J., Ortiz M.A. 1992. Zonificación de magnitudes de tormentas máximas probables (en 24 horas) para periodos de retorno de dos mil años usando un SIG; el caso de la República Mexicana. *En Boletín de Investigaciones Geográficas* No. 25. Instituto de Geografía, UNAM, México. págs. 65-79.
- Palacio J.L., Peralta A., Luna L. 1997. Video Remoting Sensing and Digital Photography en Mexico; an Overview and present Status. *En 16<sup>th</sup> Biennial Workshop on Videography and Color Photography*. Weslaco, Texas, april 29-may 1 E.U. págs. 300-307.
- Palacio-Prieto J:L: 1989. Evaluating Gully Erosion Using ILWIS, an Example in Central Mexico. *ITC The Netherlands*. 45 págs.
- Parsons A. 1988. Hillslope Form. Biddles LTD. Guilford and King's Lynn. Great Britain. 212 págs.
- Peña D., Zebrowski C. 1992. Los suelos y tepetates de la vertiente oriental occidental de la Sierra Nevada. *En Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. Terra Suelos Volcánicos endurecidos*, V.10 No. especial. Primer Simposio Internacional. UACH. Edo. de México, México. págs. 151-155.
- Pérez M. 1975. Población y Sociedad. Cuatro comunidades de Acolhuacan. Centro de Investigaciones Superiores del INHA. SEP-INAH, México. 227 págs.
- Robinson A. 1995. Elements of Cartography. John Wiley and Sons. USA. 647 págs.
- Siebe C., Jahn R., Stahr K. 1996. Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de los Suelos en Campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, Edo. de México. 57 págs.

Strahler A. 1981. Geografía Física. Trad. Por A. Gulló y F. Albert. John Wiley and Sons, Inc. Y Ediciones Omega, Barcelona. España. 767 págs.

Tricart J., Killian J. 1982. La Eco-geografía y la ordenación del medio natural. Trad. De J. Jordás, C. Nieto y N. Pérez. Editorial Anagrama, Barcelona, España. 285 págs.

Vargas M., Ortiz A., Ojeda E., Ríos D., 1998. Cartografía de Erosión en el Municipio de Texcoco I: Estudio de Fotointerpretación. En Boletín SELPER No. 44. México, Ciudad Universitaria. México. págs. 8-14.

Vázquez C., Batis A. 1996. La Restauración Ecológica: árboles exóticos vs. árboles nativos. En revista Ciencias Especial No. 4. Facultad de ciencias, UNAM. México. págs. 16-23.

Verstappen TH.H 1983. Applied Geomorphology. Geomorphological Srveys for Environmental Development. Elsevier Publ. Comp. Amsterdam. 473 págs.

Vestappen Th.H. 1992. Geomorphological Remote Sensing and the study of environment. Associazione Italiana Telerilevamento, Estratto dagli. Atti del V Convegno Nazionale, Italia. págs. 1-12.

Verstappen TH. And Zuidam H. 1991. El Sistema ITC para levantamientos Geomorfológicos. En ITC Publications Number 10. Netherlands. págs. 29-41.

Wolf P. 1983. Elements of Photogrametry: with air photo interpretation and remoting sensing. Mc Graw-Hill. USA 628 págs.

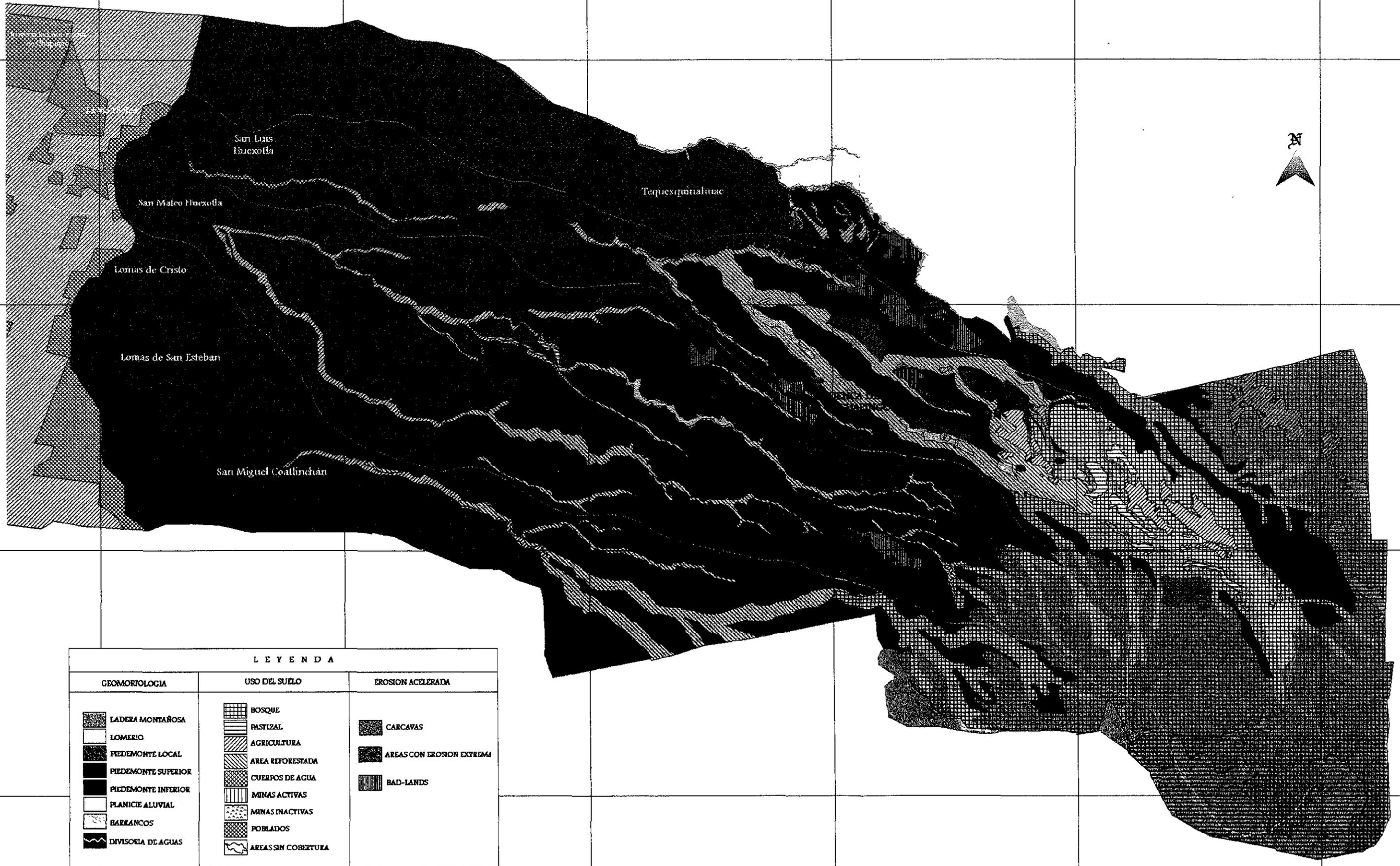
Zebrowski C. 1992. Los suelos endurecidos en América Latina. En Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. Terra Suelos Volcánicos endurecidos, V.10 No. especial. Primer Simposio Internacional. UACH. Edo. de México, México. págs. 15-23.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFIA

# ANEXO CARTOGRÁFICO

GEOMORFOLOGIA, USO DEL SUELO (Cobertura del terreno) Y EROSION ACELERADA DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS CHAPINGO Y SAN BERNARDINO



LEYENDA

GEOMORFOLOGIA	USO DEL SUELO	EROSION ACELERADA
LADERA MONTAÑOSA	BOSQUE	CARCAVAS
LOMERIO	PASTIZAL	AREAS CON EROSION EXTREMA
PIEDEMONTES LOCAL	AGRICULTURA	BAD-LANDS
PIEDEMONTES SUPERIOR	AREA REFORESTADA	
PIEDEMONTES INFERIOR	CUERPOS DE AGUA	
PLANICIE ALUVIAL	MINAS ACTIVAS	
BARRANCOS	MINAS INACTIVAS	
DIVISORIA DE AGUAS	POBLADOS	
	AREAS SIN COBERTURA	



