

01026
30



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

la Dirección General de Bibliotecas
UNAM a difundir en formato electrónico e imprimir
el contenido de mi trabajo de tesis

NOMBRE: Jose Marcos Lopez

FECHA: 01 - Julio - 2003

"DISTRIBUCION ESPACIAL DE LOS PROCESOS
DE REMOCIÓN EN MASA Y RIESGOS ASOCIADOS
EN EL MUNICIPIO DE TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

JOSÉ MARCOS LÓPEZ

ASESORA: IRASEMA ALCÁNTARA AYALA

MEXICO.D.F.

2003



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A



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.



San José Chagchatzin, Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla (Marzo 2003).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ciencia sin conciencia no es más que la ruina del alma. **Rabelais**

¿Se cae o no se cae?. **Irasema Alcántara A**

Dedicada a:

A mi madre, quien siempre ha confiado en mi capacidad, que no ha perdido la esperanza de verme seguir adelante y que siempre me ha inculcado la filosofía de que el límite de las capacidades es uno mismo. A quien con su esfuerzo y dedicación me ha enseñado que no hay futuro escrito, sino solamente el que uno mismo crea.

A Emma quien me ha apoyado incondicionalmente durante todo este tiempo, porque me ha enseñado que la seguridad en uno mismo es la mejor arma para triunfar en la vida, por haber estado al pendiente de mi persona y su compañía en los momentos mas difíciles durante mi carrera.

A todos aquellos compañeros y amigos que me han apoyado y privilegiado con sus experiencias, que han confiado en mi, a todas las personas que con sus criticas han creado mi persona y que me han ayudado incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, **Dra. Irasema Alcántara Ayala**, quien mucho mas que asesora, me ha brindado su amistad y confianza, por haber establecido un ambiente de trabajo inigualable, agradable y haberme brindado todo el apoyo necesario durante la realización de mi tesis. **Muchas Gracias.**

Al **CONACYT**, por el apoyo económico y equipo brindado para la elaboración de la tesis, a través del proyecto J33428-T "Estrategias de prevención de desastres para la región Puebla-Veracruz".

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente a través de la Facultad de Filosofía y Letras y el Colegio de Geografía. A todos los profesores que me enseñaron la geografía a su modo pero sin llegar a un excepcionalismo. Al **Instituto de Geografía** por haberme permitido el uso de sus instalaciones, lugar donde inicio mi fascinación por la geografía física y donde he desarrollado hasta el momento otra parte de mi formación profesional.

A la **Secretaria de Protección Civil de Puebla**, por su apoyo brindado en el trabajo de campo y facilidades otorgadas, en especial al profesor **Guillermo Melgarejo Palafox**, **Ing. Rubén Acevo** e **Ing. Abel**.

Al **Dr. José Juan Zamorano Orozco**, por los comentarios acertados y valiosos al trabajo, enriqueciendo el contenido de la tesis. Al **Dr. Mario Arturo Ortiz**, **Mtra. Oralia Oropeza Orozco** y **Dr. José Lugo Hubp** por las revisiones hechas al trabajo.

A la **Presidencia Municipal de Tlatlaauquitepec**, que con su apoyo se logro cubrir el trabajo de campo, en especial a: **C. Ángel Pedro Guerrero** presidente municipal por las facilidades otorgadas; **Lic. Imelda López Calderón** secretaria general del ayuntamiento por ser el primer contacto que se tuvo con las autoridades municipales; al secretario técnico del Sistema Municipal de Protección Civil **Ingeniero Jaime Varela García** por el apoyo en información, al Sindico Municipal del Ayuntamiento **Martín Gilberto Viveros Borzani** y al Regidor de Gobernación **Dr. Pablo Manuel Landero Manilla**; al comandante de municipal **Teniente Benjamín Caldera Guevara** por el apoyo terrestre con vehículos brindado durante la estancia en el municipio, a **los oficiales de policía** que nos acompañaron durante el recorrido en el municipio y a **todos los inspectores** de las localidades visitadas por su disponibilidad en el trabajo de campo.

A todos mis compañeros de proyecto que me apoyaron y me brindaron su ayuda durante la realización de la tesis: "**La comunidad de la ladera**" formada por **Roberto Borja Baeza** por sus consejos, **Omar Esteban Chávez** por su ayuda en la primer salida a campo, **Ricardo Garnica Peña** y **Marlene López** por su ayuda en campo y gabinete. Y por todos los momentos que hemos vivido juntos y que estoy seguro nunca será un día igual. A **Pablo Flores Lorenzo** por sus consejos al inicio de la tesis.

A **Emma Silva Morales** quien me ha apoyado a siempre salir adelante y por haberme convencido de realizar esta tesis.

A **todos los que me faltaron**, amigos, compañeros y personas que de una u otra manera ayudaron en la elaboración de la tesis.

INDICE

Introducción.....	I
Referencias.....	VI

Capítulo 1. Principios básicos de la inestabilidad de laderas

1.1 Procesos de remoción en masa.....	1
1.1.1. Conceptualización.....	1
1.1.2. Clasificaciones y características morfológicas.....	1
1.1.3. Causas de los procesos de remoción en masa.....	7
1.2 Riesgos asociados.....	9
1.2.1 Concepto de peligros naturales.....	9
1.2.2 Concepto de vulnerabilidad.....	11
1.2.3 Concepto de riesgo.....	12
1.2.4 Metodología para la evaluación del riesgo.....	13
Referencias.....	18

Capítulo 2. Geología y Geomorfología del Municipio de Tlatlauquitepec

2.1 Geología.....	20
2.2 Estratigrafía del área de estudio.....	24
2.3 Geomorfología (Análisis Morfométrico).....	32
2.4 Regionalización Geomorfológica.....	37
Referencias.....	55

Capítulo 3. Los procesos de remoción en masa en México, Puebla y Tlatlauquitepec

3.1 Estudios realizados en México.....	57
3.2 Influencia de la precipitación en el desarrollo de los procesos de remoción en masa.....	58
3.3 Procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec.....	60
3.4 Factores internos y externos que controlaron a los procesos de remoción en masa.....	65
3.5 Distribución de daños por los procesos de remoción en masa en el Municipio de Tlatlauquitepec.....	66
Referencias.....	74

Capítulo 4. Índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en Tlatlauquitepec

4.1 Conceptualización del índice de susceptibilidad.....	76
4.2 Uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE).....	78
4.2.1 Conceptualización de modelos.....	78
4.2.2 Uso del MDE en el análisis de procesos de remoción en masa.....	80
4.3 Información digital utilizada.....	81
4.4 Fundamentos teóricos del sistema de información geográfica SINMAP.....	83
4.5 Cálculo del índice de susceptibilidad para el municipio de Tlatlauquitepec.....	87
4.5.1 Correcciones al MDE por relleno de espacios.....	87
4.5.2 Calibración de parámetros por regiones.....	91
4.5.3 Mapa de dirección de flujo.....	93
4.5.4 Mapa de área específica de la cuenca.....	95
4.5.5 Mapa de índice de humedad.....	96
4.5.6 Mapa de índice de estabilidad.....	98
4.6 Parámetros externos al SINMAP utilizados en el análisis del índice de susceptibilidad.....	104
4.6.1 Mapa de concavidad-convexidad del terreno.....	104
4.6.2 Mapa de asociaciones morfométricas.....	108
4.6.3 Determinación de volumen de masa movilizada.....	110
Referencias.....	121

Capítulo 5. Riesgos por procesos de remoción en masa en el Municipio de Tlatlauquitepec

5.1 Características socio-económicas.....	124
5.2 Cálculo del índice de vulnerabilidad.....	129
5.2.1 Definición del índice de vulnerabilidad.....	129
5.2.2 Grupos de información utilizada.....	130
5.2.3 Metodología del índice de vulnerabilidad.....	132
5.2.4 Mapa de índice de vulnerabilidad para el municipio de Tlatlauquitepec.....	133
5.3 Riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Tlatlauquitepec.....	137
5.3.1 Definición del mapa de riesgos.....	137
5.3.2 Elementos del mapa de riesgos.....	138
5.3.3 Mapa de riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Tlatlauquitepec.....	140
Referencias.....	147
Conclusiones.....	148

PAGINACION DISCONTINUA

Introducción

El presente trabajo se elaboró con la finalidad de presentar una manera de estudiar a los procesos de remoción en masa, debido a que estos fenómenos son poco investigados dentro de la perspectiva geográfica debido a que se ha analizado como un fenómeno aislado dentro del espacio geográfico. Al estudiar los procesos de remoción en masa es recomendable tomar en cuenta aspectos como los socio-económicos implícitos dentro de la dinámica de este tipo de fenómenos. De ahí que exista un trinomio de conceptos de estudio que esta formado por los peligros, la vulnerabilidad y el riesgo, este último como producto de la interacción de los dos primeros.

Este trabajo se desarrolló tomando en cuenta una tipología de procesos de remoción en masa que abarca por un lado los distintos tipos de procesos, y por otro los tipos de materiales involucrados. De igual forma los conceptos de vulnerabilidad y riesgo se adecuaron lo mejor posible al espacio estudiado. Para el estudio específico del municipio de Tlatlauquitepec, se requirió de la identificación de las condiciones geológicas y morfogenéticas, a partir de ello se utilizó un modelo matemático donde se combinaron, tanto valores numéricos del terreno, como características de tipo geográfico, de tal manera que fue posible obtener un índice de susceptibilidad del terreno a procesos de remoción en masa.

El objetivo general del presente trabajo el análisis de la distribución de los procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec y de las condiciones de vulnerabilidad de la población, para la elaboración de un mapa de riesgos asociados a estos procesos. Los objetivos particulares incluyen: un esbozo de los daños y el fenómeno ocurrido en octubre de 1999, la realización de un análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, la determinación del grado de vulnerabilidad de las localidades existentes en el municipio y la elaboración de un mapa de riesgos.

A partir del objetivo general de trabajo, cada capítulo se desarrolló contemplando un objetivo particular asociado a la temática principal, por lo que en cada uno se consideran los aspectos más importantes vinculados al estudio de procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec.

El capítulo uno trata los aspectos teóricos fundamentales para el estudio de los procesos de remoción en masa. En primer lugar se abordaron los conceptos principales existentes para este tipo de fenómenos de los cuales se utilizó aquel que se ajustara a las condiciones del territorio estudiado, considerando clasificaciones, características y causas. A su vez se abordaron los conceptos peligro, vulnerabilidad y riesgo que se vinculen al objetivo de estudio del presente trabajo.

En el capítulo dos se incluyen las características geológicas del área de estudio, que sirvieron de base para modificar una regionalización de área en cuestión a partir del análisis de la configuración de las curvas de nivel y la revisión preliminar de fotografías aéreas. También se utilizó como base la información morfométrica elaborada para la Sierra Norte de Puebla (Alcántara-Ayala, et al 2002) y detallando dicha información en el área de estudio, se obtuvieron los siguientes mapas: densidad de disección, profundidad de disección y energía del relieve.

En el capítulo tres se presenta una recapitulación de los primeros trabajos relacionados con el estudio de procesos de remoción en masa, así como un análisis de la influencia de la precipitación en los procesos de remoción, ya que en el caso del municipio de Tlatlauquitepec en octubre de 1999, ésta funcionó como un detonador de la inestabilidad. Dicho análisis se realizó por medio del estudio de las normales climáticas y de los valores diarios de precipitación obtenidos durante los días que ocurrió el desastre. De igual manera, se hizo un esbozo de la distribución de los daños ocasionados durante octubre de 1999 en el municipio.

El capítulo cuatro se enfocó al cálculo del índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, a partir de la información derivada del modelo digital de elevación del municipio y las características de los materiales; todo lo anterior manipulado con el software SINMAP (Stability Index Mapping) en la plataforma del sistema de información geográfica ArcView. Como parte del análisis de los procesos de remoción en masa en el municipio, se obtuvieron otros indicadores asociados a la inestabilidad de laderas; se calcularon los mapas de geometría del relieve y asociaciones morfométricas. Finalmente se realizó un cálculo para la determinación del volumen de un deslizamiento en particular.

A partir de la información obtenida en el capítulo cuatro, en el capítulo cinco se desarrolló el mapa de índice de vulnerabilidad. La finalidad de este mapa es la expresión de las características socio-económicas de la población en los posibles

efectos dañinos que pudiera ocasionar un fenómeno natural. Una vez obtenido este mapa se calculó el mapa de riesgo por procesos de remoción en masa para el municipio, para lo cual se utilizó la información del índice de susceptibilidad y el índice de vulnerabilidad.

El municipio de Tlatlauquitepec (Cerro que colorea) se localiza en la zona noroeste del estado de Puebla (Figura 1.1), en la región denominada como Sierra Norte, la cual abarca desde la población de Tulancingo hasta Perote. El municipio está comprendido dentro de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcanico y la Sierra Madre Oriental (Commons, 1971).

Las coordenadas extremas en las que se ubica el municipio son 19°36'24'' y 20°03'18'' de latitud norte, y los meridianos 97°14'42'' y 97°28'06'' de longitud oeste. Cuenta además con una superficie de 247 Km². Los municipios con los que colinda son: al norte con Zacapoaxtla, Cuetzalan del Progreso y Ayotoxco de Guerrero; al este con los municipios de Ayotoxco de Guerrero, Hueyapan y Atempán; al sur con los municipios de Atempán, Chignautla y Cuyoaco; y al oeste con los municipios de Cuyoaco, Zautla, Zaragoza y Zacapoaxtla (INEGI, 1999).

El municipio cuenta con un total de 77 Localidades, de las cuales las más importantes son: Ciudad de Tlatlauquitepec, Xonocuautila, Oyameles, Ocotlán, Tatazoquico, Mazatepec, Gómez Poniente, Ahuatamimilol, Calatepec, Chiacuaco, Ixmattlaco y Loma de la Yerba (INEGI, 1999). El centro de gobierno del municipio está en la ciudad de Tlatlauquitepec, la cual cuenta con la mayor concentración de población (8,935 habitantes) del municipio. La población total del municipio según datos de INEGI en el año 2000 era de 47,106 habitantes. De este total, el 25% era considerado como de tipo urbano y el 75% como rural.

La estructura por sexo en el municipio está representada por un 48.35% de hombres y 51.65% de mujeres. Del total de la población registrada en el año 2000, el 31.33% representaba a la población económicamente activa. En cuanto a la distribución por sectores el 52.2% de la población se ocupa en el sector primario, 17.76% en el sector secundario y el 26.69% en el sector terciario.

El municipio presenta infraestructura de educación de preprimaria, primaria, secundaria y bachillerato en el ámbito local. Se cuenta con 191 centros educativos 79 de primaria, 27 de secundaria, 3 de profesional medio, 2 de normal y 3 de bachillerato.

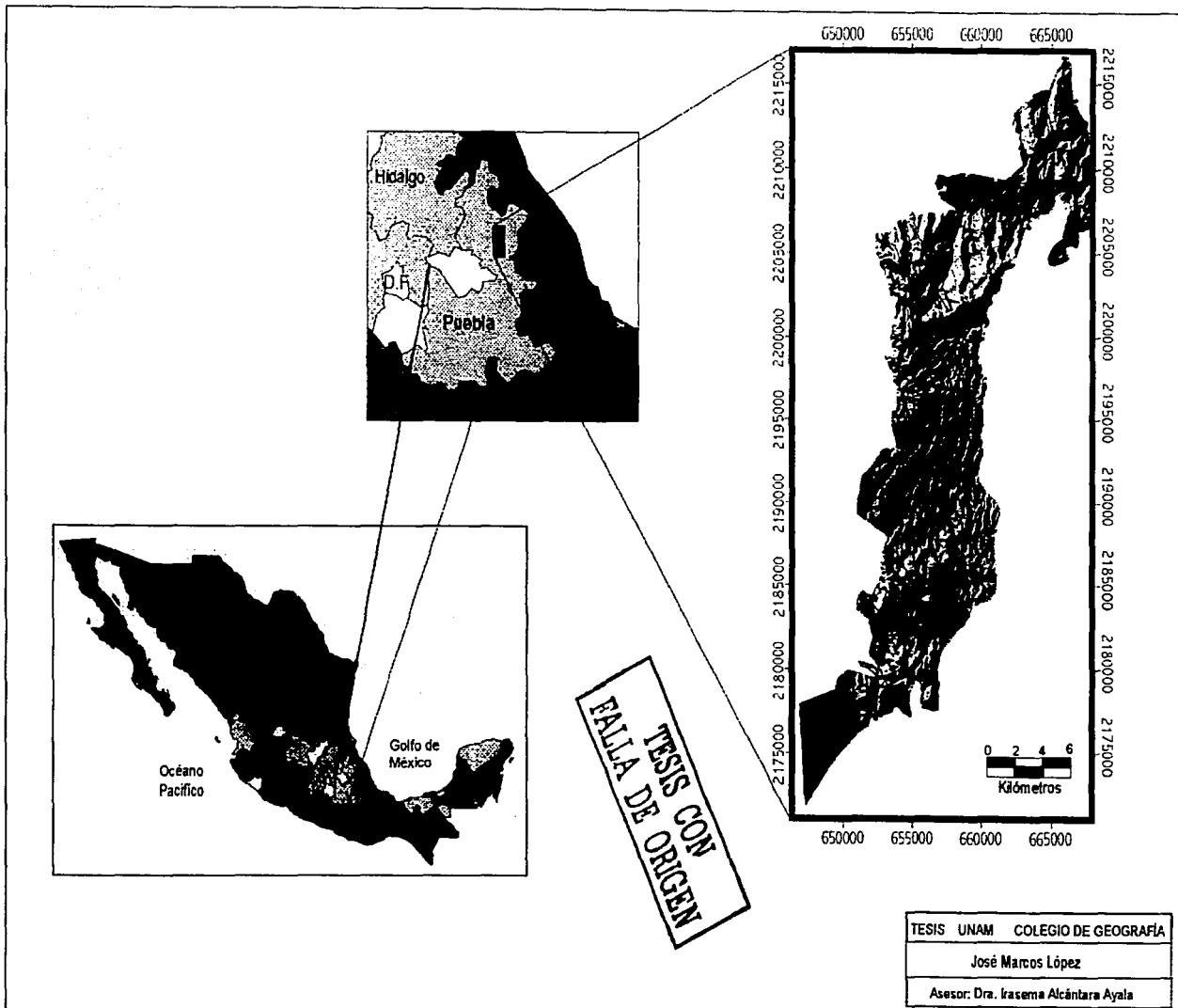


Figura I.1 Localización del municipio de Tlatlaquitepec

Se cuenta además con servicios de biblioteca municipal, casa de cultura y casa de DIF para educación preescolar. Para el año 2000 según INEGI se tenían registradas un total de 9,689 viviendas en el municipio con un promedio de ocupación de 4 a 7 habitantes. Los servicios de salud existentes en el municipio son, un hospital general de la Secretaría de Salud, clínicas familiares del IMSS, ISSTE e ISSTEP y servicios de la Cruz Roja municipal. Un total de 79.86% de la población no tiene servicios de salud y el 20.14% se halla registrada oficialmente como derechohabiente de alguna institución de salud.

En cuanto a infraestructura el municipio cuenta con la carretera 129 con la ciudad de Puebla y Teziutlán; a nivel local se hallan carreteras menores que comunican a la cabecera municipal con la parte norte y sur del municipio. Se tienen servicios de 5 oficinas de correos, red de telégrafos, telefonía local y de larga distancia, además de servicios bancarios. Los servicios de autotransporte se concentran principalmente en la cabecera municipal. Sólo se cuentan con estaciones de paso para autobuses que se dirigen a la ciudad de México o Puebla.

Entre las actividades económicas que destacan en el municipio está, el sector primario con la agricultura de maíz, haba, café, ciruela y manzana entre otros. Se practica la ganadería de traspatio, pesca de autoconsumo y la explotación forestal en las zonas montañosas. El sector secundario está representado por la maquila de ropa y modelado de materiales artesanales. Las actividades de tipo terciario se enfocan principalmente a servicios públicos y se concentran en la cabecera municipal y localidades importantes (SEGOB, 1988).

En cuanto a su relieve, el municipio presenta una serie de contrastes altitudinales en sentido sur-norte. En la porción norte se localizan elevaciones de altitud de más de 3,000 msnm, en cambio en la porción sur existen altitudes de 100 msnm. El municipio se ubica en una zona de transición entre dos provincias fisiográficas, al sur se encuentra el Eje Neovolcánico representado por el centro volcánico Los Hornos, y en la porción norte elevaciones de tipo sedimentario representativas de la Sierra Madre Oriental. La zona centro se caracteriza por ser una de las que presenta la mayor cantidad de contrastes en cuanto a topografía, ya que en esta se localiza la zona de transición entre una provincia y otra. La configuración de la topografía del municipio presenta una serie de contrastes en cuanto a configuración y formas. En el sur se caracteriza por presentar elevaciones de poca altura en relación con su nivel de base local, además de una topografía en forma de rampa con un descenso suave de sur a

norte; ésta se encuentra disectada por valles erosivos con profundidad de hasta 150 metros. En la zona centro existen porciones de pequeñas planicies y formas de rampa que son continuación de las ubicadas al sur; de igual manera hay elevaciones de gran altura entre las que destacan el cerro Cabezón, Las Animas, Acamalota y Punta La Bandera (Figura 1.2). La zona centro-norte y norte se caracteriza por ser la zona más abrupta del municipio y que presenta los contrastes altitudinales más marcados, destacando los cerros Cuateczin, Hueytepec y El Campanario. Además, en esta zona es donde se alcanzan los valores más bajos de altitud dentro del municipio llegando a ser de hasta 100 msnm.

En cuanto a la hidrografía, el municipio se encuentra dentro de la región hidrológica Tuxpan-Nautla, en la cuenca del río Tecolutla y sub-cuenca del río Apulco (INEGI, 1999). La mayor parte de los ríos dentro del territorio presentan una orientación de sur a norte. Uno de los ríos más importantes dentro del municipio es el Apulco, que atraviesa de oeste a este en la porción norte y forma parte del cuerpo de agua presa La Soledad, después toma una dirección hacia el norte y se une con el río Ayotoxco (Figura 1.3). Los ríos que se forman en la zona sur toman una dirección hacia el norte hasta unirse cerca de la cabecera municipal para formar el río Xucayucan. A este río lo conforman las corrientes El Atemeza, Xochihuatzaloyan, Atemochicha, Acongo, Balastreta, Tochimpa, Acojotzingo, Camalco y Santiago. En la zona centro-norte, los ríos funcionan como afluentes del río Apulco, entre los que se ubican están: Chalchihuapan, Coxolesco, Mina de Guadalupe y Xocololoyaco. Existe otras corrientes menores y manantiales que nacen en Gómez Poniente y Tepeteno, estos se unen a los ríos que drenan al Xucayucan en la parte sur de la cabecera municipal (SEGOB, 1988).

La distribución de los climas está condicionada por los cambios altitudinales del municipio; en el sur existen climas de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y humedad media (C(w1)), en el centro se encuentra un templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad mayor (C(w2)); en la zona norte, que es la que presenta los cambios altitudinales más marcados, llegando a alcanzar altitudes de hasta 100 msnm, se encuentran climas como templado húmedo con abundantes lluvias en verano (C(m)), templado húmedo con lluvias todo el año (C(f)) y semicálido húmedo con lluvias todo el año (Acf).

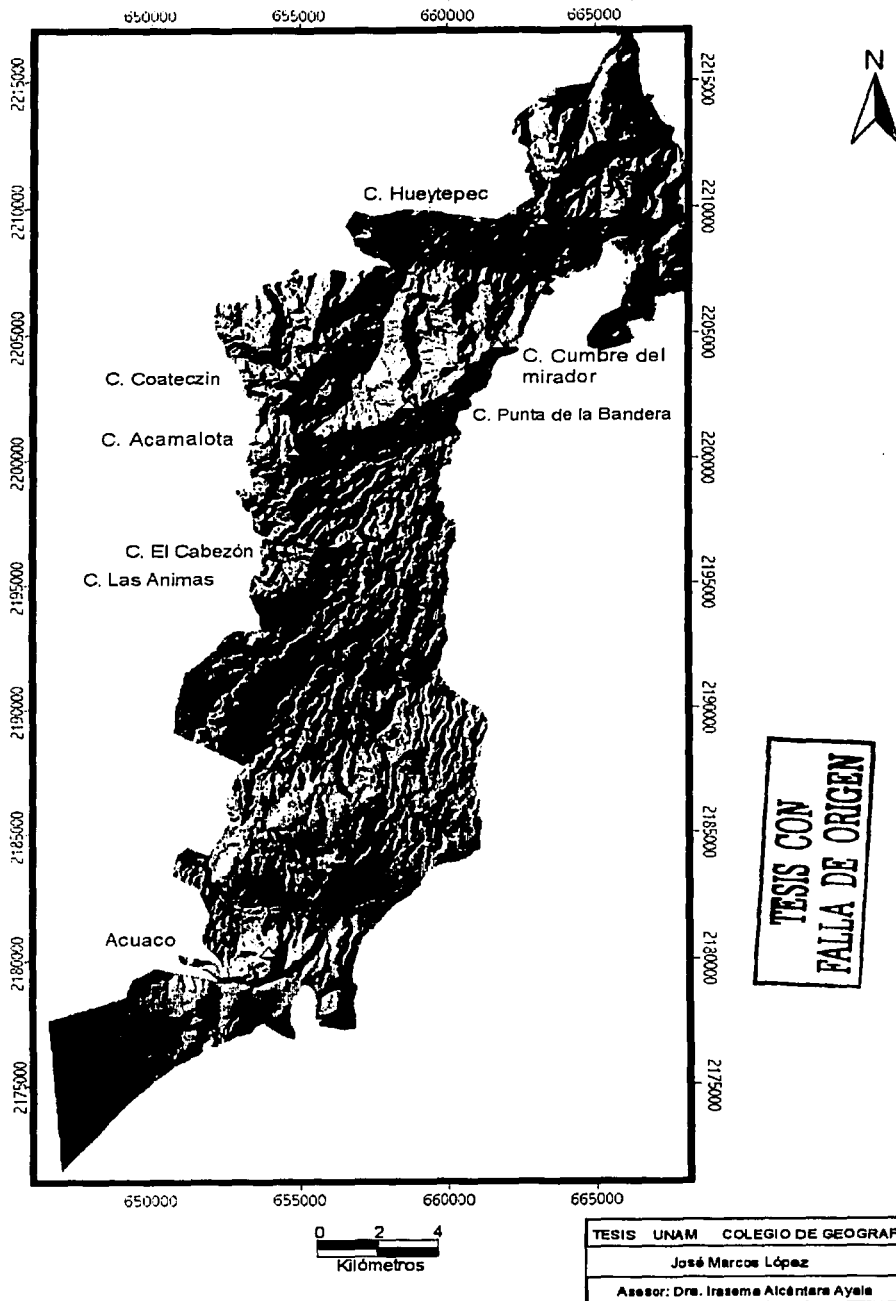


Figura 1.2 Principales elevaciones del municipio de Tlatlaquitepec.

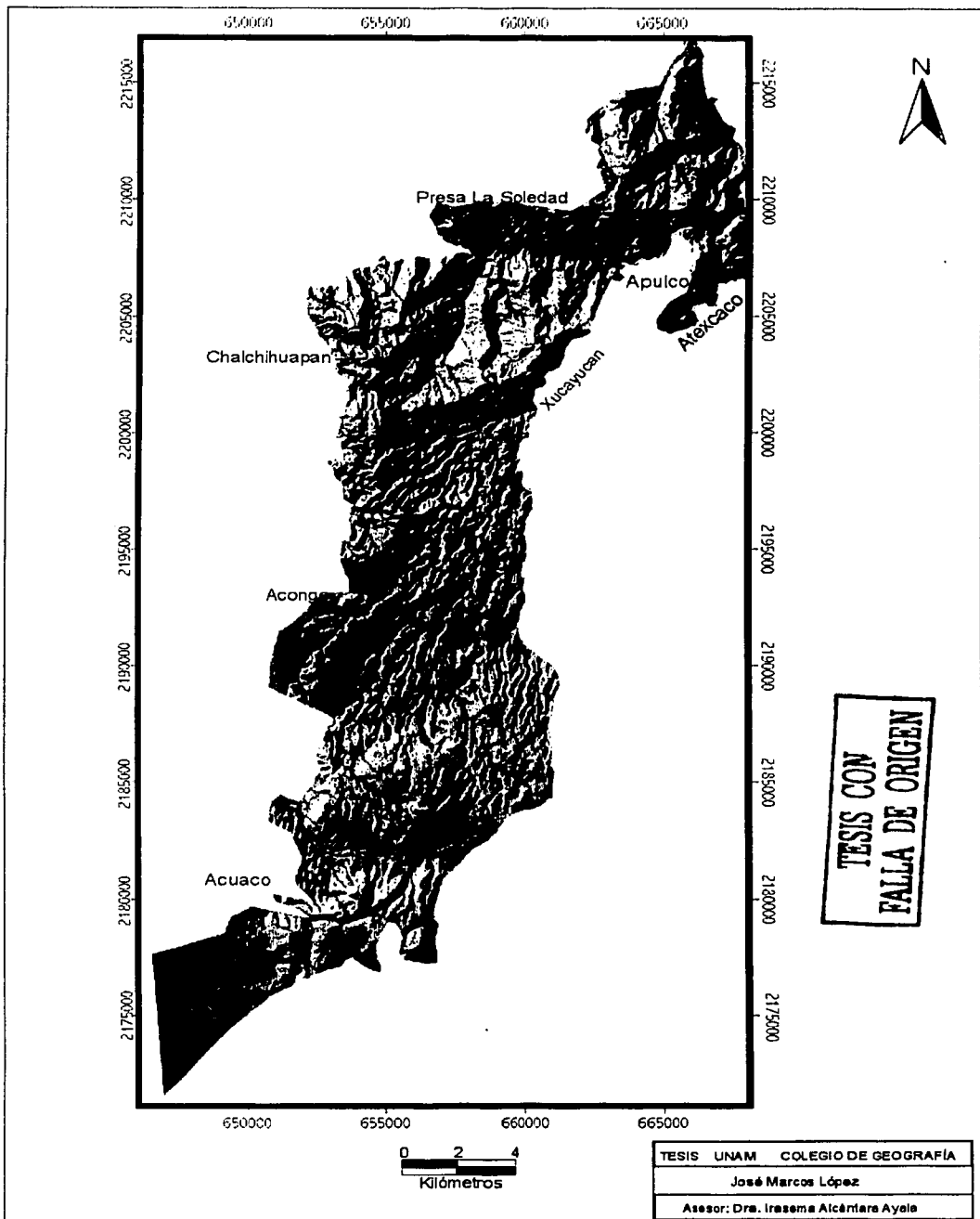


Figura 1.3 Principales corrientes fluviales del municipio de Tlatlauquitepec.

Referencias

Alcántara Ayala, I. Zamorano, J. Lugo, J. Franco, O. (2002) **Estudio morfométrico y geomorfológico aplicado a procesos de ladera en la Sierra Norte de Puebla**. GEOS Unión Geofísica Mexicana. México.

Commons-de la Rosa, A. (1971) **Geohistoria de las divisiones territoriales del Estado de Puebla**. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-9.

INEGI (1999) **Cuadernillo Estadístico Municipal. Tlatlauquitepec Estado de Puebla México**

INEGI (2000) **XII Censo General de Población y Vivienda**. Tabulados Básicos. México

Secretaría de Gobernación (1988) **Los municipios de Puebla**. México.

Capítulo 1. Principios básicos de la inestabilidad de laderas

1.1 Procesos de remoción en masa

1.1.1 Conceptualización

Existen diferentes términos para definir los procesos de remoción en masa, entre ellas esta la del Grupo Internacional de Trabajo para el Inventario Mundial de Movimientos del Terreno (WP/WLI, 1990), el concepto se refiere al movimiento de una masa de roca, tierra o detritos ladera abajo

Para la elaboración de esta investigación el concepto utilizado fue el propuesto por Brunnsden (1979), debido a que este presenta una orientación geomorfológica, además de adecuarse al territorio estudiado, en el cual los procesos de remoción en masa involucran el movimiento de los materiales formadores de la ladera bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia primordial de algún agente fluido.

1.1.2 Clasificaciones y características morfológicas

Los criterios utilizados para la clasificación de los procesos de remoción en masa suelen ser variados, cada una está elaborada según los tipos de investigaciones que le dieron origen. Una clasificación muy utilizada es la realizada por Varnes (1978) en donde toma como criterio principal el tipo de movimiento y el material involucrado, además de ser considerada como una de las primeras y más completas en cuanto a este tipo de fenómenos (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Clasificación de procesos de remoción en masa de Varnes (1978).

Tipo de movimiento		En roca	Tipo de suelo.	
			Grueso	Fino
Caídas		Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de tierra
Vuelcos		Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de tierra
Deslizamientos	Rotacional	En gran cantidad	Rotación de rocas	Rotación de detritos
		En menor cantidad	Deslizamiento de rocas en bloque	Deslizamiento de suelo en bloque
	Translacional	En gran cantidad	Rotación de rocas	Rotación de detritos
		En menor cantidad	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos
Expansiones laterales		Expansión de rocas	Expansión de detritos	Expansión de tierra
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de tierra
Movimientos complejos.		Combinación de más de dos tipos principales.		

También se suelen hacer clasificaciones en función de los siguientes factores: edad del movimiento, grado de actividad, tipo geográfico, localización geográfica, tipo climático, tipo y tamaño de material movilizado, sustrato geológico, tipo de movimiento, velocidad del movimiento, contenido de agua, aire o hielo, causas y mecanismo del movimiento, morfología del material desplazado, morfología de la superficie de ruptura y propiedades geotécnicas (Hansen, 1984).

El siguiente cuadro indica los principales tipos de clasificaciones realizadas por diversos autores (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Principales factores de clasificación usados para los procesos de remoción en masa.

<i>Factor de clasificación.</i>	<i>Autores</i>
Edad del movimiento	Popov (1946), Zaruba y Mencil (1969), Nosin (1972), Klengel y Pasek(1974)
Grado de actividad	Zaruba y Mencil (1969), Erskine (1973)
Tipo geográfico	Reynolds (1932), Reiche (1937), Shereve (1968)
Localización geográfica	Reynolds (1932), Reiche (1937), Skolov (1963), Shereve (1968)
Tipo climático	Sharpe (1938), Ward (1945), Hutchinson (1968)
Tipo y tamaño de material moviilizado	Baltzer (1875), Ward (1945), Zaruba y Mencil (1969), Crozier (1973), Coates (1977), Varnes (1978), EPOCH (1993), Alcántara (2000)
Sustrato geológico	Laad (1935), Savarenskii (1937), Zaruba y Mencil (1969)
Tipo de movimiento	Sharpe (1938), Ward (1945), Hutchinson (1968), Zaruba y Mencil (1969), Blong (1973), Crozier (1973), Coates (1977), Varnes (1978), EPOCH (1993), Alcántara (2000)
Velocidad del movimiento	Sharpe (1938), Ward (1945), Coates (1977), Varnes (1978)
Contenido de agua aire o hielo	Sharpe (1938), Shereve (1968), Brunsten (1979)
Causas y mecanismos del movimiento	Laad (1935), Sharpe (1938), Bendel (1948), Terzaghi (1950), Legget (1962), Zaruba y Mencil (1969), Coates (1977), Varnes (1978), Brunsten (1979)
Morfología del material desplazado	Skempton (1953), Blong (1973), Brunsten (1973), Crozier (1973)
Propiedades geotécnicas	Brunsten (1984)

Fuente: Compilación Varía: Varnes (1978), Brunsten (1979), Hansen (1984) y Flores (2002)

En esta investigación se utilizó la clasificación elaborada por el programa EPOCH (1993) citado en Alcántara-Ayala (2000) con la finalidad de englobar los tipos principales de procesos existentes para la comprensión del fenómeno a estudiar, además de esbozar los posibles procesos que se pudieran encontrar el área de estudio. Esta clasificación fue elaborada con base a una clasificación realizada por Varnes (1978) y Hutchinson (1988), y hace la diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Clasificación de los procesos de remoción en masa según el EPOCH (1993).

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca (<i>Rock</i>)	Derrubios (<i>debris</i>)	Suelo (<i>soil</i>)
Desprendimientos (<i>fall</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>rock fall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelcos o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>)	Individual (<i>simple</i>)	Individual (<i>simple</i>)
	Múltiple (<i>multiple</i>)	Múltiple (<i>multiple</i>)	Múltiple (<i>multiple</i>)
	Sucesivo (<i>successive</i>)	Sucesivo (<i>successive</i>)	Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques no rotacional (<i>traslational slide, non rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Fuente: EPOCH 1993 en Alcántara-Ayala (2000).

Esta clasificación presenta grandes ventajas para su utilización dentro del idioma español entre las que se encuentran:

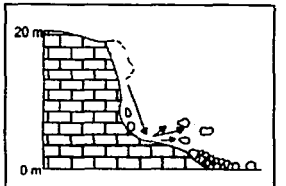
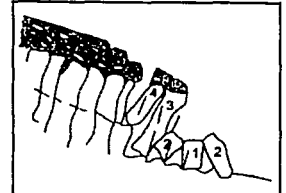
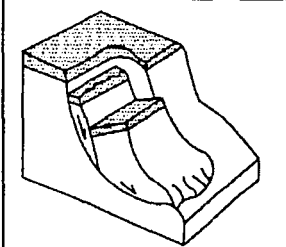
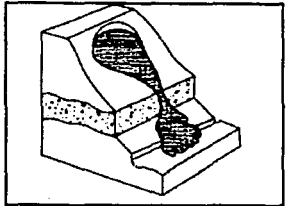
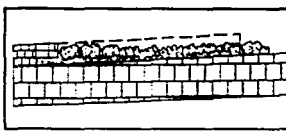
- Es la primer clasificación en idioma español que uniformiza los conceptos en un criterio común en cuanto a los tipos de procesos de remoción en masa de utilidad para las ciencias de la Tierra.
- El criterio utilizado para clasificación presenta un aplicabilidad según las condiciones del territorio mexicano debido a que: la comprensión del fenómeno se hace a partir de los

mecanismos particulares e individuales, pudiéndose hacer combinaciones entre los tipos principales; los tipos de materiales se dividen de dos grandes grupos: rocas y detritos, lo cual facilita su comprensión y aplicación; y de manera indirecta se puede conocer la velocidad del fenómeno o la magnitud del mismo.

- La utilidad de este criterio de clasificación se ha plasmado en que ha sido ocupada en diversos trabajos en el ámbito geomorfológico en México entre los que destacan: Flores (2002) donde se realizó un estudio de riesgos a procesos de remoción en masa para el municipio de Teziutlán, Puebla; Frausto (2002) donde se analizó a los procesos dentro de un enfoque geomorfológico en la Sierra de Guadalupe en el Distrito Federal; Alcántara-Ayala, et al (2002) en el cual se analizó la susceptibilidad a procesos de remoción en masa para la Sierra Norte de Puebla a partir de un enfoque geomorfológico; Borja (2003) en el cual se elaboró un análisis de riesgos en el municipio de Zacapoaxtla, Puebla; y Toscana (2003) donde se emplea la clasificación para la identificación de los principales procesos que afectaron al puerto de Acapulco durante la presencia del huracán Paulina.

De acuerdo con esta clasificación adaptada al castellano por Alcántara-Ayala (2000), los diferentes movimientos se dividen en seis principales: desprendimientos, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos; estos pueden variar de acuerdo al material en el que se originen: rocas, detritos y suelos (Cuadro 1.4).

Las características o atributos morfológicos de los procesos de remoción en masa son indicativos del mecanismo que les da origen, para lo cual se debe de entender cuales son aquellas características que se pueden o no presentar cuando se esté estudiando algún proceso. Debido a la diversidad de criterios en cuanto los tipos de características morfológicas, la Comisión de Movimientos del Terreno de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG), con la finalidad de uniformizar criterios diseñó y propuso el siguiente diagrama y una lista de formas idealizadas para un proceso de remoción en masa, todo ello diseñado en función a un diagrama elaborado por Varnes (1978) para un deslizamiento de tierras (Figura 1.1).

Tipo principal	Descripción	Subtipos	Esquema idealizado
Caídas o desprendimientos	La característica principal es que el movimiento de los materiales se da en caída libre. El movimiento inicia con el desprendimiento de los materiales y posteriormente al transportarse pueden rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo.	Caída de rocas, de detritos y suelos	
Vuelcos o desplomes	Se caracteriza por una rotación de una masa de material, este da en función de un eje o pivote determinado por su centro de gravedad, expresado en un movimiento hacia delante o la parte externa. Se desarrolla principalmente en la presencia de sistemas de discontinuidades como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares.	Vuelcos de rocas, derrubios, detritos o suelo.	
Deslizamientos	La formación de grietas transversales es el primer indicio de la formación de este tipo movimiento. Superficies de ruptura curva, cóncava o de cuchara se asocian al subtipo rotacional, las de tipo plano al subtipo planar, también existen los de subtipo traslacional donde las modificaciones al material original son bajas.	Deslizamientos rotacionales simples, múltiples y sucesivos. Deslizamientos traslacionales de roca, derrubios y suelos. Deslizamientos planares de roca, derrubios y coladas de barro.	
Flujos	Es un movimiento espacialmente continuo y de poca duración. Las propiedades del material se asemejan a un fluido viscoso con una distribución de velocidades heterogénea resultando una morfología de lóbulos por el movimiento intergranular.	Flujos de roca, derrubios y suelo	
Expansión lateral	Son movimiento debidos a la fracturación y expansión de masas de suelo o rocas donde existe la característica de licuefacción y pueden durar incluso algunos minutos. Se localiza principalmente en ambientes de tipo lacustre y marino somero.	Expansiones laterales de roca, derrubios y suelos.	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

- 1.- Corona
- 2.-Escarpe principal
- 3.-Margen superior
- 4.-Cabecera.
- 5.-Escarpe secundario.
- 6.-Cuerpo principal.
- 7.-Pie.
- 8.-Margen inferior
- 9.-Lóbulo frontal.
- 10.-Superficie de ruptura.
- 11.-Pie de superficie de ruptura
- 12.-Superficie de separación.
- 13.- material desplazado
- 14.-Zona de hundimiento.
- 15.-Zona de acumulación.
- 16.-Hundimiento.
17. Masa hundida.
- 18.- Acumulación
- 19.- Flanco.
- 20.- Superficie original.

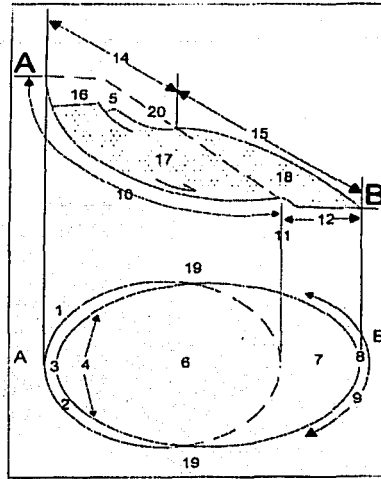


Figura 1.1. Atributos morfológicos idealizados para un proceso de remoción en masa. Fuente: Alcántara-Ayala (2000).

1.1.3 Causas de los procesos de remoción en masa

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Los procesos de remoción en masa pueden ser originados por dos tipos de causas: Una de carácter externo, cuando se produce un incremento en las tensiones o esfuerzos de la ladera, pero sin afectar a la resistencia de los materiales formadores. Y otra de carácter interno, que actúa de forma inversa a la anterior, o sea, que disminuye la resistencia de los materiales formadores, pero no modifica la tensión o los esfuerzos. Un proceso de remoción en masa es un movimiento que presentan los materiales formadores de una ladera, cuando hay una relación directa entre la gravedad y los factores internos o externos, que hacen que la ladera, no soporte su propio peso y esto se exprese en un movimiento (Terzaghi, 1950 en Alcántara-Ayala, 2000).

En la superficie de la ladera, pueden ocurrir una serie de cambios ligados a los dos tipos de causas, estos se dividen en:

Cambios de tipo externo:

- Geométricos de la ladera: erosión, socavamiento, incisión de ríos y excavaciones artificiales.
- Tensiones transitorias naturales y artificiales: vibraciones originadas por explosiones y uso de maquinaria pesada
- Cambios en el sistema hidrológico: intensidad y duración de precipitación.

Cambios de tipo interno:

- Transformación del material de forma progresiva: expansión lateral y fisuras.
- Procesos de intemperismo.

Con base en los factores mencionados, Cruden y Varnes (1996) en Alcántara-Ayala (2000) elaboraron una clasificación de las causas internas y externas que originan a los procesos de remoción en masa. Esta incluye el estudio de varios tipos de procesos y la combinación de varios de estos factores. Cabe destacar que también existen otros factores, como el incremento de la cantidad de precipitación en ciertos materiales, que pueden ser considerados como detonantes o desencadenantes de ciertos procesos (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5 Principales causas de los procesos de remoción en masa según Cruden y Varnes (1996). Fuente: Alcántara- Ayala (2000).

Tipo de causa	Factores
Índole geológica	Materiales débiles, sensibles, intemperizados, sujetos a cizallamiento; Discontinuidades orientadas adversamente y estructurales; Permeabilidad contrastante; y contraste de materiales de diferente plasticidad.
Por procesos físicos	Precipitación intensa, derretimiento de hielo o nieve, eventos de precipitación extraordinaria, actividad sísmica, erupciones volcánicas, gelifracción y expansión e hidratación de arcillas.
Morfológicas	Levantamientos tectónicos; Erosión de tipo glacial; fluvial al pie de las laderas; marina al pie de los acantilados; glacial al pie de las laderas; en las márgenes laterales; subterránea; y remoción de vegetación.
Origen antrópico	Excavación de laderas o del pie de las laderas; incremento de peso en las laderas; desecación de cuerpos de agua; deforestación; Irrigación; actividad minera; y vibraciones artificiales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2 Riesgos asociados

1.2.1 Concepto de peligros naturales

Dentro del estudio de fenómenos que pueden considerarse como desastres cuando interactúan con elementos sociales, es necesario el conocimiento de las componentes que se involucran. Uno de estos son los peligros naturales, los cuales han sido analizados de distintas formas según la finalidad y la postura teórica en la que se desarrollen.

Durante los primeros estudios realizados sobre los peligros naturales, las investigaciones se enfocaban al estudio de estos como la principal, incluso algunas veces como la única causa de los desastres; no es sino hasta la década de los años 80 cuando se empieza a estudiar al factor social, y en consecuencia a la vulnerabilidad como parte fundamental para el estudio, entendimiento y prevención de estos fenómenos denominados como peligros naturales.

En sus inicios el estudio de los peligros naturales se enfocó también a aquellos eventos extremos o extraordinarios que llegaban a afectar a la población. Posteriormente el objetivo se dirigió hacia la determinación de sus posibles daños y la mitigación de efectos. A partir de estos enfoques, se observó que el análisis de los desastres naturales era imposible de realizarse a través de una sola disciplina, ya que se requería de los conocimientos de diversas ciencias que estudiaran tanto a los sistemas humanos como los físicos.

White (1974) fue uno de los pioneros en estudiar a los peligros naturales en la década de los años 40; se le atribuye a este autor, el desarrollo de los primeros paradigmas de esta línea de estudio. Sus investigaciones incluyen la importancia de la identificación y la valoración del riesgo; para lo cual se debe determinar la vulnerabilidad natural de la población, con la finalidad de calcular la probable ocurrencia de algún fenómeno natural que les pueda llegar a causar daño. Hewitt (1983), considerado como uno de los principales teóricos marxistas en el estudio de los peligros naturales, en su investigación

asocia los peligros naturales al sistema económico; esto expresado en las modificaciones que se han hecho al sistema natural, además de que la ocurrencia de estos fenómenos está en relación directa con la estructura política de la zona en estudio. Mitchell y Devine (1989) proponen un modelo más concreto en el estudio de los peligros naturales, donde los componentes básicos son: los procesos físicos, población, políticas de prevención y la cantidad de pérdidas en infraestructura y humanas.

En la década de los años 90, Palm (1990) incorpora la variable social y política en el estudio de los riesgos naturales, sin llegar a una postura marxista como la propuesta por Hewitt; es uno de los primeros en utilizar la variable histórica con la finalidad de explicar y determinar las causas de la vulnerabilidad. Burton, Kates y White (1993) incluyen el conocimiento histórico de la recurrencia del fenómeno para determinar la vulnerabilidad de la población, además de reconocer que anteriormente los daños de éstos fenómenos ocurrían en lugares inhabitados y actualmente la componente social ha hecho que sus efectos sean más notorios.

Así como existen diferentes posturas para el análisis de los riesgos naturales, también existe una gran variedad de definiciones, incluso hay autores que restan importancia al calificativo de naturales, como Blaikie (1994) argumentando que los peligros no son naturales, sino que tienen una influencia directa de la población. Para efectos de la presente investigación se utilizará la definición de Smith (1996), en la cual el peligro es visto como un fenómeno de origen natural o inducido por el hombre, o como un acontecimiento que potencialmente puede ocasionar daños y que generalmente es tomado como causa de otros peligros, ya que es la amenaza potencial de la condición de la población y su bienestar.

Actualmente la inestabilidad de laderas es uno de los fenómenos naturales, considerado desastre cuando llega a afectar las actividades humanas. La importancia del estudio de este tipo de proceso está en función del conocimiento que se genere y de la finalidad de reducir el impacto que pueda tener en la población (Hansen, 1984). En las últimas décadas este fenómeno, al igual que otros como las inundaciones, ha afectado sustancialmente asentamientos humanos distribuidos en todo el planeta, considerándosele como uno de los desastres naturales poco predecibles.

En el estudio de los procesos de remoción en masa, la definición de peligro está en relación directa con la frecuencia y la velocidad del movimiento, o sea en sus variaciones espacio-temporales, ya que no se puede englobar a todos los procesos dentro de una categoría de peligro debido a sus diferentes variaciones morfológicas, de materiales y formas resultantes.

1.2.2 Concepto la vulnerabilidad

Como se mencionó en el apartado anterior, por mucho tiempo la población ha estado relacionada directamente con diversos fenómenos naturales que actualmente son considerados como peligros naturales, estos pueden ser terremotos, huracanes o inundaciones, entre otros. Así mismo es importante señalar que la percepción del grado de afectación que pueden causar estos fenómenos, la mayoría de las veces es limitada, y se refiere a explicaciones que tienen una mínima relación con estos fenómenos. Esto es debido a que la forma de percibir el grado de la afectación es variada y puede existir una conceptualización errónea de lo que representa la vulnerabilidad entre un sector social y otro. Para calcular la vulnerabilidad se requiere estudiar factores como los económicos, políticos, culturales y sociales, además de que el conocimiento de estos permite la determinación de políticas para la mitigación de los efectos que pueda tener un peligro natural en la población y su infraestructura.

Para Smith (1996) la vulnerabilidad implica la medición de una combinación de un riesgo con el nivel social y la capacidad económica para solucionar los problemas resultantes de la presencia de cierto fenómeno. También lo define como el grado en que el sistema o parte del sistema social, puede reaccionar a una adversidad durante la ocurrencia de un fenómeno natural.

Cannon (1994) define a la vulnerabilidad como un status de la población o de los individuos, según las condiciones en las que se desarrollan económica y socialmente, además de su localización geográfica en la superficie terrestre y en el sistema económico, lo cual los puede hacer más o menos vulnerables a ser afectados por un peligro natural. Según el autor se deben estudiar tres aspectos de la población: la asimilación o percepción que existe del fenómeno, el nivel de organización social en caso de emergencia, y la capacidad de respuesta social de atención en un desastre. Estos aspectos tienen una relación directa con el nivel de desarrollo del sitio afectado en el

ámbito nacional y regional, además de tener una segunda relación con la importancia que tenga el estado dentro del sistema económico; en estos casos se relaciona a las zonas con mayor densidad de población como las más afectadas y más vulnerables. La vulnerabilidad está también en función de la cantidad y tipos de peligros naturales existentes en el sitio.

Cabe mencionar que la vulnerabilidad a los desastres es diferencial en el mundo, de acuerdo con la condición de la estructura económica de cada región, aunque sean los mismos peligros naturales. Esto en función de que pueden existir sitios donde la ocurrencia de un peligro natural sea constante, pero que exista la capacidad económica de recuperar las pérdidas que se generaron, dándole un grado bajo de vulnerabilidad. Sin embargo, también puede darse el caso de que no exista una alta recurrencia del peligro natural, pero que la capacidad económica sea baja, lo cual le dará un grado alto de vulnerabilidad. Se debe estudiar a la variable económica en combinación con otras variables para poder valorar la vulnerabilidad de un sitio y no entenderse como la única variable que la determina.

Dentro de la elaboración de esta investigación se tomo como referencia a la definición de Smith (1996) ya que debido a que el objetivo de analizar a la vulnerabilidad de la población del municipio de Tlatlaquitepec, es mostrar a aquellas poblaciones que presenten las condiciones más adversas en cuanto a infraestructura en la mitigación de los efectos dañinos de un fenómeno natural, en este caso de especial interés los procesos de remoción en masa. Para lo cual se han de considerar las condiciones socio-económicas de la población en su capacidad de minimizar los efectos de este tipo de fenómeno.

1.2.3 Concepto de riesgo

Así como en el caso de peligro natural y vulnerabilidad existe una gran diversidad de conceptos, para entender a los riesgos también hay posturas variadas. Esta investigación se apoyó en el concepto desarrollado por Smith (1996), en el cual el riesgo representa la exposición de la población a un peligro ya sea natural o humano, éste a menudo considerado en combinación con otras causas o fenómenos puede generar la probabilidad de pérdidas tanto físicas como humanas. El riesgo se entiende algunas veces como una consecuencia de la interacción de la sociedad con los peligros, también es definido como la probabilidad de que ocurra algún peligro específico que pueda llegar

a dañar a la población. La estructura de la población, su condición y organización son puntos de referencia esenciales para valorar el riesgo y los desastres. Los riesgos se encuentran intrínsecos a las formas de producción y junto con el grado de seguridad de acuerdo con la ubicación de los asentamientos humanos, y que permiten la posibilidad de valorar la cantidad de pérdidas materiales y humanas en caso de un desastre. Este último se entiende como la exposición de la población a un peligro que ha producido pérdidas, heridos y daños en mayor grado; sólo con la presencia e interacción de la población con un peligro se puede considerar la ocurrencia de un desastre.

Crozier (1989) define al riesgo en los procesos de remoción en masa, como la probabilidad de la ocurrencia de un fenómeno de gran magnitud en combinación con la posibilidad de generar daños en la población. Para su análisis es necesario identificar el peligro, los elementos en riesgo (población, propiedades, calidad de vida, etc.) y la vulnerabilidad; la conjunción de los resultados de estos elementos constituye el riesgo total. Este autor hace además la aclaración de que los elementos deben de ser expresados en las mismas unidades para poder ejecutar su valoración.

1.2.4 Metodología para la evaluación del riesgo

Al realizar un estudio y análisis de riesgos es necesaria la utilización o el desarrollo de una metodología. Actualmente existen diversos enfoques para abordar el estudio de riesgos, estos pueden variar de acuerdo con la escuela, postura teórica o elemento principal de investigación, para los cual es necesario indicar cuales son algunas de las mas importantes que se ha utilizado, con la finalidad de esbozar y ubicar cual fue utilizada como base o referencia para el presente trabajo.

Entre las primeras metodologías que se desarrollaron está la de White (1974), aunque cabe mencionar que ésta fue desarrollada para peligros naturales, pero resulta de utilidad en el estudio de riesgos ya que incluye a la componente humana en la estimación de la vulnerabilidad y se enfoca en la predicción de la probabilidad de ocurrencia de cierto fenómeno. Esta metodología se resume en los siguientes pasos:

- 1) Estimación de la extensión ocupada por la población en las áreas que han sido afectadas por el peligro natural.

- 2) Determinar los ajustes posibles a una estrategia enfocada a estos grupos sociales durante eventos extraordinarios.
- 3) Examinar la forma en que la población percibe estos eventos extraordinarios y sus efectos.
- 4) Examinar los alcances que puede tener el fenómeno para estimar sus daños y reducir su impacto.
- 5) Determinar las estrategias y políticas para prevención de estos daños a futuro.

Mitchell (1989) realiza una valoración de carácter teórico en la cual los componentes de análisis son más concretos y engloban grandes aspectos de estudio. Advierte además una relación directamente proporcional de causa-efecto entre las componentes y el peligro que se está estudiando, por ejemplo: un proceso físico por su naturaleza que le da origen afecta a la población, pero la población también afecta a ciertos procesos físicos mediante las modificaciones que este realiza sobre la superficie de la Tierra. Su valoración se compone de cuatro puntos:

- 1) Estudio de procesos físicos.
- 2) Estudio de la población.
- 3) Creación de estrategias.
- 4) Estimación de pérdidas.

El mismo autor advierte que este modelo puede ser modificado según la componente humana (social, económica, política, espacial y desarrollo) a la que se pretenda dar importancia, y a la existencia de ciertas variaciones físicas que pueden servir como detonadores para que el grado de afectación sea mayor.

Posteriormente a esta metodología, Palm (1990) incorpora la componente sociopolítica desde un enfoque de tipo marxista, además de que reconoce el estudio de los peligros por niveles (micronivel y macronivel), y la importancia de la identificación de las características históricas del lugar, que muchas veces condicionan el grado de afectación del fenómeno.

Actualmente, para el estudio de análisis derivados de diversos fenómenos naturales se toma como base cualquiera de estas metodologías expuestas, incorporando a estas algunas técnicas de estudio, como el utilización de sistemas de información geográfica

(SIG) para la realización de mapeos y modelados en estudios a grandes y mediana escala; sistemas de posicionamiento global (GPS); e imágenes de satélite (Percepción remota) para estudios que requieren escalas pequeñas.

En el análisis del riesgo por procesos de remoción en masa se tienen diferentes metodologías que implican la zonificación de áreas que históricamente han sido afectadas por el proceso, la identificación de las características geomorfológicas de las laderas y de su geología. También se requiere realizar de mapeos de los tipos y variaciones espaciales de los distintos procesos, ya sea por estimaciones, observaciones o trabajo de campo.

Entre las metodologías para el análisis de riesgos de estos procesos se encuentran las de diferentes autores, como la expuesta por Crozier (1989), esta se divide según la escala del área de estudio:

- a) Valoración del sitio: El cual está enfocado a áreas de escala grande, es decir que requiere un grado de detalle alto; en este caso es posible la estimación de la estabilidad de las laderas mediante análisis cuantitativos por medio del factor de seguridad. Este factor permite determinar si una ladera es estable o no, mediante la obtención de un valor que oscila de 0 a 1 (de estable a inestable) mediante el análisis de diferentes aspectos cuantificables. Se puede complementar mediante una estimación de la probabilidad de recurrencia de este fenómeno si se tiene una asociación con cambios de tipo climático o meteorológico.
- b) Valoración regional: En este es posible excluir el estudio de estabilidad según la conveniencia del estudio, ya que en este caso la escala del estudio es más chica. Los estudios a esta escala se han enfocado más a la realización de mapeos geomorfológicos, el uso de sistemas de información geográfica, valoraciones del terreno y la realización de regionalizaciones.

Crozier (1995) y Varnes (1984) han propuesto varios métodos para la valoración del riesgo, los cuales se dividen en tres grupos: método paramétrico, método histórico estocástico y método de umbrales de liberación.

- 1) **Método paramétrico.** Implica el reconocimiento de los diferentes tipos de procesos, distribución y las diferentes componentes de tipo causal que dieron origen a la inestabilidad. Se realiza durante el estudio un mapeo de ciertos componentes como la geología, el ángulo de ladera u otro. Posteriormente ayudarán a determinar la estabilidad o inestabilidad de la ladera y valorar el grado de riesgo que existe en el área de estudio. Este tipo de metodología es una de las más usadas en los estudios de tipo regional, además de que es complementada con la utilización de sistemas de información geográfica para una manipulación rápida y precisa de la información.

- 2) **Método histórico estocástico.** Este es utilizado como complemento del anterior ya que los cálculos realizados son estáticos y presentan variaciones de tipo espacio-temporal, por ello se recurre al método histórico, el cual nos permite llevar un registro de los fenómenos y procesos que llegaron a tener ocurrencia en el sitio de estudio que nos sirvan para estimar un período de recurrencia de los procesos.

- 3) **Método de umbrales de liberación.** Se considera uno de los más complejos, ya que involucra a los dos métodos anteriores, además de que tiene como objetivo determinar el potencial daño y actividad del fenómeno para su prevención, esto en el caso de los procesos que tienen una relación directa con los cambios de tipo climático como variaciones extremas de precipitación. La aplicación principal del método es la determinación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, tomando en cuenta las variables frecuencia, magnitud y distribución.

Para la realización de la presente investigación se tomó como base la metodología del modelo expuesto por Cannon (1994), por lo que para llegar a la comprensión del nivel de riesgos y la prevención de desastres, fue necesaria la identificación de ciertas características que interactúan en el lugar de estudio:

- a) **Factores naturales.** En este caso se utilizó el método paramétrico, con la finalidad de analizar la distribución espacio-temporal de los procesos de remoción en masa.
- b) **Factores socio-económicos.** Se identifican las características de la población que puedan determinar su vulnerabilidad a estos procesos.

- c) **Valoración de la vulnerabilidad.** Se realizó a partir de aquellas características identificadas en los factores socioeconómicos.

- d) **Determinación de los grados de riesgo.** Esto fue realizado a partir de los factores naturales y la valoración de la vulnerabilidad.

Referencias:

- Alcántara Ayala, I. (2000) **Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología.** Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. N° 41 UNAM México, pp.9-25.
- Alcántara Ayala, I. Zamorano, J. Lugo, J. Franco, O. (2002) **Estudio morfométrico y geomorfológico aplicado a procesos de ladera en la Sierra Norte de Puebla.** GEOS Unión Geofísica Mexicana. México.
- Blaikie P. (1994) **At. Risk: Natural hazards, people's vulnerability, and disasters.** Routledge, London. Great Britain. 284 pp.
- Borja, R. (2003) **Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla.** Tesis-UNAM, México 145pp
- Brunsdon, D. (1979) **Mass movements.** In Embleton, C. y J. B. Thornes (eds), Progress in Geomorphology, Arnold, pp.130-186.
- Burton, I., Kates, R. W., y White, G. F., (1993) **The environment as hazard.** 1st ed. The Guilford Press, New York, 209 pp.
- Cannon T. (1994) **Vulnerability Analysis and the Explanation of "Natural" Disasters.** In Valey (1994). Disasters, Development and Environment. John Wiley and Sons. pp.13-30.
- Crozier, M. J. (1989) **Landslides: Causes, consequences, and Environment.** Routledge Press, London, 252 pp.
- Crozier, M. J. (1995) **Landslide hazard assessment: theme report.** In D. H. Bell (ed) Landslide: proceedings of the sixth international Symposium, Christchurch, February 1992, 3: 1843-8.
- EPOCH (European Community Programme; 1993) **Temporal occurrence and forecasting of landslide in the European Community.** Flageollet, J.C. (ed), 3 volumes, Contract no. 90 0025.
- Flores, P. (2002) **Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla.** Tesis-UNAM México. 119pp.
- Frausto, O (2002) **Análisis geomorfológico enfocado a los procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, México.** Tesis-UNAM México
- Hansen, M. (1984) **Strategies for classification of landslides.** In Brunsdon, D. Slope Instability. John Wiley and Sons, pp.1-25
- Hewitt, K. (1983) **The idea of calamity in a technocratic age.** In Hewitt, K. (ed), Interpretation of calamity: From the view-point of ecology. Allen and Unwin, London, pp.3-32.
- Mitchell, J. K. y Devine, N. (1989) **A contextual model of natural hazard.** Geogr. Rev., No 79, pp.391-409.
- Palm, R. I. (1990) **Natural hazards: An integrative framework for research and planning.** John Hopkins Press, Baltimore, 184 pp.
- Sharpe C., F. (1938) **Landslides and related phenomena.** Columbia University Press, New York.

- Smith, K. (1996) **Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster**. Ed. Routledge. London, Great Britain. 389 pp.
- Toscana, A. (2003) **Paulina, la configuración de un desastre**. Tesis UNAM. México.
- Varnes, D. (1958) **Landslides types and processes**. In Eckel, E. Landslides and Engineering Practice, Highway Res. Board Special Report 29, pp.20-47.
- Varnes, D. (1978) **Slope Movement. Types and Processes**. In Schuster, R (1978) Landslides, Analysis and Control. Special Report 176. National Academy of Sciences. Washington. D.C.
- Varnes, D. (1984) **Landslides hazard zonation: a review of principles and practice, Natural Hazards**. 3, UNESCO (Int. Assoc. Eng. Geol.) Comm. On Landslides and the other mass movement on slopes, pp.63.
- Ward, W. H. (1945) **The stability of natural slopes**. Geographical Journal, 105, pp.170-197.
- WP/WLI (1990) **A suggested method for reporting a landslide**. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No 41, pp.5-12.
- White, G. F. (1974) **Natural hazards research: concepts, methods and policy implications**. In White, G. (ed) Natural Hazards: Local, National, Global. Oxford University Press, New York, pp.3-16.
- Zaruba, Q y Mencl, V. (1969) **Landslides and their control**. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Capítulo 2. Geología y Geomorfología del Municipio de Tlatlauquitepec

2.1 Geología

El análisis de la geología superficial dentro del área de estudio permite la comprensión del proceso evolutivo y génesis de la estructura del relieve, a su vez nos permite entender el relieve y su dinámica, por medio de la cual se dio la conformación actual. Este tipo de información ayuda a identificar los contrastes u homogeneidad existentes dentro de los diferentes grupos de rocas que están presentes en la zona, los cuales pueden presentar una relación directa con los procesos y fenómenos exógeno modeladores de la corteza terrestre, que definen su expresión actual, de manera más puntual a los procesos de remoción en masa.

La geología del municipio de Tlatlauquitepec comprende las cartas editadas por el INEGI (1975) a escala 1 : 50 000 con clave F14D85 Cuetzalán, E14B15 Teziutlán y E14B25 Xonacatlán; El área que abarca el polígono dentro del cual se ubica está delimitado por las coordenadas 19°36'24'' y 20°03'18'' de latitud norte, y los meridianos 97°14'42'' y 97°28'06'' de longitud oeste.

En el municipio existe una marcada diversidad en cuanto a la distribución de los materiales en lo que respecta a su edad y composición (Figura 2.1). En la parte norte se encuentran materiales correspondientes a la Sierra Madre Oriental de rocas de origen sedimentario en su mayoría plegadas, con una edad del Mesozoico, mientras que en la parte centro y sur pertenecen al Cinturón Volcánico Transversal, representados por los productos generados por el Centro Volcánico Los Humeros de edad del Plioceno-Cuaternario. En la parte central destaca la distribución de materiales de caída libre del Plio-Pleistoceno (Ferriz, 1982), y en menor proporción productos de mayor consolidación y volumen que se hallan sobreyacentes a materiales de tipo sedimentarios de misma composición que los ubicados en la parte norte; por el contrario la parte sur del municipio corresponde principalmente a productos volcánicos relacionados de manera directa con la formación de la Caldera de Los Humeros.

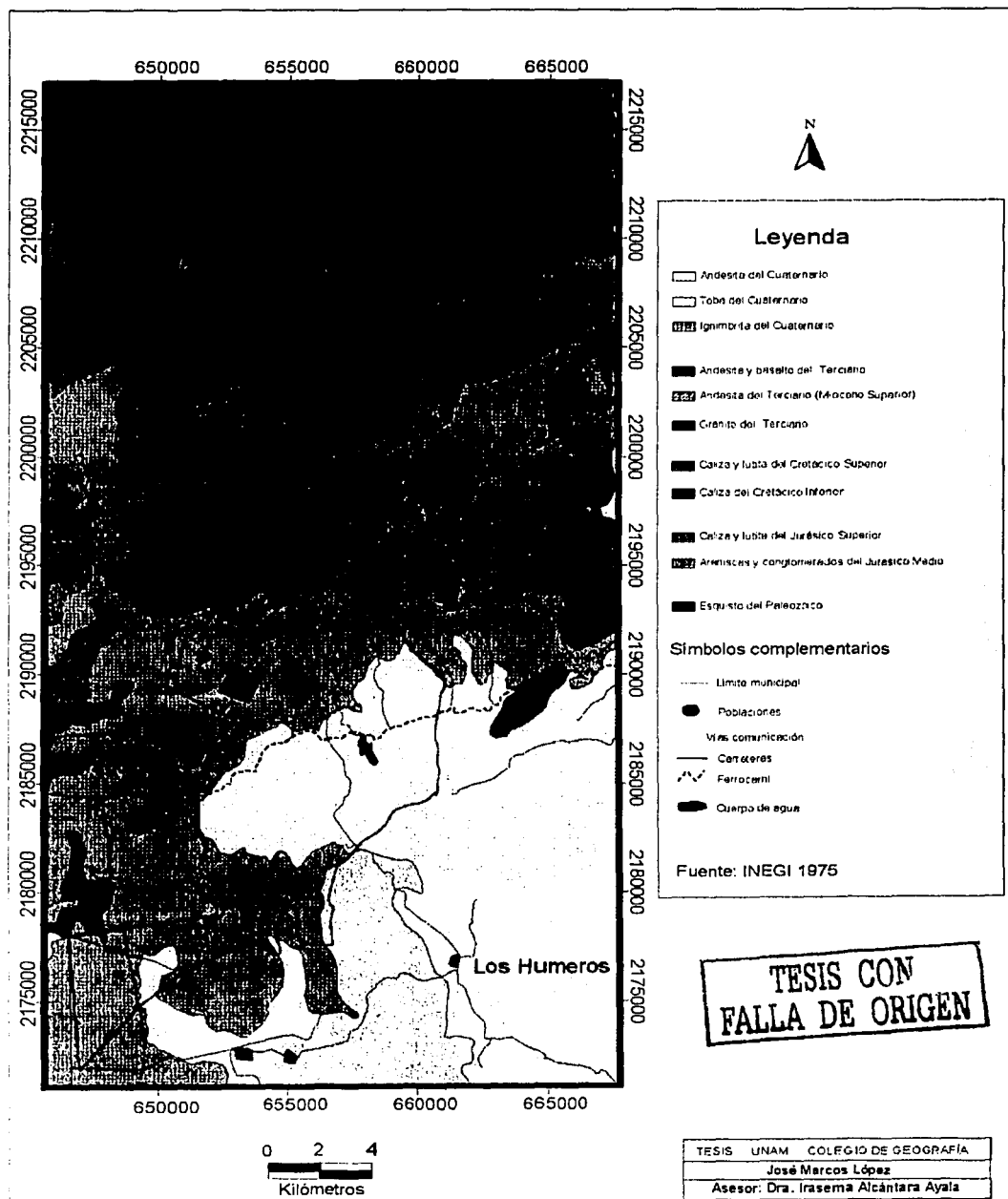


Figura 2.1 Mapa geológico del municipio de Tlatlauquitepec.

Los materiales más antiguos que se localizan en el municipio corresponden a un complejo metamórfico de esquistos de clorita-moscovita, intrusiónados en algunos casos por rocas graníticas del Paleozoico (Yáñez-García, 1980). Este tipo de roca posiblemente se halla distribuido en todo el subsuelo del municipio y tiene su origen en depósitos sedimentarios de tipo clástico, los cuales sufrieron metamorfismo, resultando en la zona rocas del tipo de los esquistos; estas se ligan a pequeñas intrusiones graníticas de edad del Paleozoico que se hallan en el complejo metamórfico (Viniestra-Osorio, 1965) y están distribuidas principalmente de manera superficial en la parte norte-centro del municipio.

Posteriormente en el Mesozoico durante el periodo Triásico se dio la formación de una serie de materiales de tipo continental representados por rocas como lutitas, areniscas y conglomerados, los cuales corresponden a las Formación denominada como Huizachal, predominando los conglomerados con tonalidades rojizas (Olivas, 1953).

Durante el periodo Jurásico Inferior se dio la formación de rocas areniscas, lutitas y esquistos en menor proporción, los cuales corresponden a la Formación Huayacocotla. El origen de estos materiales se dio en un ambiente subacuático de mares someros (López-Ramos, 1982). Los tipos de roca característicos del Jurásico Medio corresponden a areniscas y conglomerados, los cuales pertenecen a la Formación denominada como Cahuascal (López-Ramos, 1982)

Durante el periodo del Jurásico Superior hubo un ambiente de transgresiones y regresiones del mar, además de tener una condición subacuática lo que originó productos como rocas de tipo calcáreo (calizas) y arcilloso (lutitas) representadas en la formación denominada como Tamán (Heim, 1940).

A finales del periodo Jurásico Superior las condiciones de sedimentación de los materiales de tipo continental variaron de tipo calcáreo a arcilloso-arenoso. Posteriormente las condiciones volvieron a cambiar a calcáreas y calcáreo-arcillosas, estas correspondientes a la formación conocida como Pimienta (Heim, 1940).

En el periodo del Cretácico Inferior se desarrollaron depósitos de calizas y lutitas, dichos materiales se originaron por un ambiente de transgresiones que había perdurado durante

el periodo Jurásico Superior, dentro de la columna estratigráfica para la zona, estos materiales corresponden a la formación Tamaulipas Inferior (Belt, 1925).

La Formación Tamaulipas Superior se originó en un ambiente de transgresiones marinas semejantes a las de la Tamaulipas inferior, en este caso la potencia de los materiales suelen ser menor dentro de la región y está representado por calizas de color gris a calizas de color negro, y en menor proporción de color blanco (López-Ramos, 1982).

Durante fines del periodo Cretácico Inferior y comienzos del Cretácico Superior, la depositación de los materiales continuó, originándose rocas calizas de estatificación media a delgada y, lutitas de color pardo y negro. Conforme continuó la depositación de materiales, la composición se hizo más arcillosa y compacta, como es el caso de las calizas con tonos azulados y verdes que se hallan en la formación San Felipe, aunque a veces presenta tonalidades anaranjadas por el intemperismo. Otros materiales que se originaron en este periodo son margas de tonos grises a azules con intercalaciones de areniscas, lutitas, calizas y conglomerados, estos productos son pertenecientes a la formación Méndez (Dumble, 1918).

A fines del periodo Cretácico y principios del Terciario se produjeron movimientos en el fondo oceánico, resultando el levantamiento conocido como la orogenia Laramide. Durante este ascenso tuvo lugar la formación de la Sierra Madre Oriental, que continuo hasta fines del Eoceno.

Según Yáñez-García (1979) durante el levantamiento que se produjo desde finales del Cretácico hasta el Mioceno medio, representado por un plegamiento de los materiales, una serie de rocas intrusivas se localizaron cerca de la superficie en forma de sienitas, además de granitos y granodioritas.

Durante el periodo de calma del movimiento tectónico se formaron conglomerados, como consecuencia de los procesos erosivos que afectaron a las capas de roca que fueron plegadas. Estos tipos de roca se encuentran interdigitadas con arenas volcánicas, pómez y ceniza, correspondientes a la actividad efusiva que caracterizó al Mioceno Superior correspondiente a la Formación Cruz Blanca. También durante el Mioceno Superior después de la actividad efusiva se desarrollaron una serie de derrames lavicos de

composición andesítica (Yáñez-García, 1982) con variaciones de tipo basáltico a dacítico; estos derrames se desarrollaron sobre la fractura conocida como Alseseca y que se distribuyen en centro de la zona de estudio.

Posteriormente se formó la caldera de Los Humeros, proceso que modificó marcadamente la parte sur y centro del área de estudio. La primera actividad dentro del área de Los Humeros estuvo representada por erupciones de lavas de tipo andesítico y fenobásáltico que constituyen a la formación Teziutlán de 3.6 a 1.6 Ma (millones de años). Aunque los productos de la Formación Teziutlán representan los primeros eventos volcánicos de la zona, la mayor parte de los materiales del centro volcánico fueron emitidos hace no más de 500 000 años, asociados a la formación de estructuras como calderas (Martínez-Serrano, 1994).

Las primeras manifestaciones volcánicas iniciaron con el emplazamiento de lavas riolíticas en la periferia del centro volcánico hace aproximadamente 0.47 Ma; estos materiales se conocen como Riolita Oyameles, con distribución escasa en la zona de estudio.

Una erupción pliniana hace 0.46 Ma dio origen a la Ignimbrita Xáltipan, junto con materiales de tobas de caída libre y el posterior colapso de la Caldera de Los Humeros (Ferríz, 1985). Seguido del colapsamiento del edificio volcánico y la formación de la caldera se dio la formación de unos domos de composición riolítica, los cuales posteriormente fueron cubiertos por la Toba Faby, compuesta de materiales de caída libre de composición riodacítica.

Una tercera etapa de actividad volcánica originada hace 0.1 Ma expulsó magmas de composición riodacítica y andesítica, formando a la Ignimbrita Zaragoza. Durante esta actividad se dio la formación de la caldera de Los Potreros dentro de la misma de los Humeros, y su origen es posterior al emplazamiento de la Ignimbrita Zaragoza.

Precedente al colapso de la caldera de Los Potreros, se produjo la expulsión de lavas andesíticas y riodacíticas, las cuales después fueron cubiertas por tobas ácidas de caída libre; estas son las denominadas Tobas Xoxoctic. Posteriormente se originaron derrames lavicos que cubrieron a las tobas, conocidos como derrame El Limón.

La emisión de lavas andesíticas continuó a través de una fractura al sur de la caldera de Los Humeros originando los derrames Tepeyahualco y Sarabia.

Una última erupción dio origen a la Toba Cuicuiltic, constituida por depósitos de caída libre pómez, mezcladas con escoria andesítica. Al final de la actividad se dio el colapso de la Caldera Xalapasco, que se asocia a la formación geológica del mismo nombre, representada por lavas riodacíticas y andesitas en menor proporción (Ferríz, 1985).

La última etapa de actividad del centro volcánico Los Humeros está representada por una erupción cuyos basaltos, estuvieron asociados a nueva emisión de materiales a la cámara magmática; esta actividad tuvo lugar hace 0.02 Ma.

Yáñez-García (1982) desarrolló una columna estratigráfica para la zona de Teziutlán, a su vez Martínez-Serrano (1994) también desarrolló una para la zona del centro volcánico Los Humeros, de las cuales se puede obtener la columna (Figura 2.2) que teóricamente se adopte al municipio de Tlatlauquitepec, la cual se describe en el apartado siguiente.

2.2 Estratigrafía del área de estudio

Era Paleozoica

Complejo basal

Se reconoce en el área de estudio un complejo basal de rocas paleozoicas, entendiendo por este a una unidad de cualquier edad y naturaleza, debajo de la cual no aparece una secuencia sedimentaria o quiebre estructural (López-Ramos, 1982). Para la República Mexicana se constituye por rocas de tipo intrusivo como granitos en menor grado y de tipo metamórfico en algunos casos como esquistos, además de granodioritas, dioritas, gneis y conglomerados (López-Ramos, 1982). A este complejo no le subyace ningún tipo de roca, sino que las formaciones posteriores a este se caracterizan por una edad del Mesozoico principalmente del Triásico, representado por rocas de tipo sedimentario.

El único tipo de roca de esta etapa aflora en la zona de estudio son los esquistos, estos se localizan en la parte sur de la presa La Soledad, al norte de Calacatepec, Chicualco y al este de Yoloctzín. Cabe destacar que esta unidad no está definida con exactitud, su existencia y localización ha sido objeto de distintos debates ya que no existen investigaciones recientes que argumenten el origen que tuvieron.

Era Mesozoica

Dentro de la secuencia estratigráfica según Yáñez-García (1982), en la columna elaborada para la zona de Teziutlán, se identifican después del complejo basal otras formaciones; en este caso no afloran en esta región estudiada.

Formación Huizachal

Esta formación presenta una edad del Triásico; consiste en unidades de roca como lutitas, areniscas y conglomerados de color rojo, verde y gris, siendo los más predominantes los de color rojo. Esta formación sobreyace al complejo basal localizado en la zona, aunque no aflora en el área de estudio, en algunos lugares próximos alcanza espesores de 370m (Olivas, 1953).

Formación Huayacocotla

De edad del Jurásico Inferior, ésta formación sobreyace a la formación Huizachal, en algunas ocasiones se halla en discordancia junto con la formación que le antecede y sus precedentes (Cahuasas y Tamán), consiste en rocas como areniscas, lutitas y capas delgadas de esquistos. El origen de esta formación tuvo lugar bajo condiciones subacuáticas de mares someros (López-Ramos 1982). Esta formación tampoco aflora en el área de estudio.

Formación Cahuasas

Posterior a la formación Huayacocotla, se identifica a la Formación Cahuasas, de edad del Jurásico Medio, constituida por rocas areniscas, conglomerados y algunos materiales

de depositación continental (Formación Huizachal). En algunos lugares su base se encuentra en discordancia angular con la formación antecedente (López-Ramos, 1982). Sus afloramientos se localizan al sur de Calacatepec, este, noroeste y suroeste de Zacapoaxtla, en la población de El Progreso, al sur de Ahuatamimilol y el este del área de estudio.

Formación Tamán

Del Jurásico Superior, esta formación presenta dos facies, una de tipo calcáreo y otra arcillosa (Heim, 1940). La de tipo calcáreo (superior) aflora en Tlatlauquitepec y Zacapoaxtla, se halla en discordancia con los granitos que constituye a la Sierra de Chignautla (López-Ramos, 1982). La facie inferior esta constituida por capas de lutitas negras y carbonosas. También se localizan en esta formación una serie de calizas negras de estratificación definida, las cuales corresponden con la facie superior. Afloramientos de esta formación se localizan en zonas próximas a Chignautla, en Zacapoaxtla, Ahuacatlan, al oeste de Tlatlauquitepec, Tatauzoquico, Nauzontla, al oeste de Zoquiapan y en la población de Mazatepec, en esta última alcanza espesores de menos de 50 metros.

Formación Pimienta

Originada en el Jurásico Superior, esta constituida por calizas de color negro o gris oscuro (Heim, 1940); se presenta en bancos de estratificación definida, los cuales contienen abundante sílice de color negro que en algunos casos adquiere una coloración verdosa (Desjardins, 1965) y presenta una base concordante con la formación Tamán. Las rocas que la constituyen son de poca resistencia, por ello algunas veces se confunde con la Formación Tamán, debido a su grado de erosión e intemperismo. Sus afloramientos se hallan en Teziutlán y en zonas cercanas a Zacapoaxtla.

Formación Tamaulipas inferior

Sobreyace a la formación Pimienta, consiste en rocas calizas de grano fino y lutitas. Según Belt (1925), se divide en 3 miembros de calizas (Miembro Superior, Anticlinorio Huizachal y Horizonte Otates). Los tipos de roca representados en esta formación se originaron en un ambiente de transgresiones marinas durante los inicios del Cretácico

Temprano. Los afloramientos se encuentran en algunas porciones del río Apulco, al norte de Tlatlauquitepec, al oeste de Ahuacatlan y Zacapoaxtla.

Formación Tamaulipas Superior

Según López-Ramos (1982) se divide en dos miembros (superior e inferior), los cuales están representados por calizas de color gris claro a oscuro en el caso del último miembro, y en el primero por calizas de color negro y blanco. Su estratificación suele ser variable y principalmente se halla sobre los afloramientos de la Formación Tamaulipas Inferior. Aunque algunas veces es poco identificable por ser de espesores de menos de un metro.

Formación Agua Nueva

Del Cretácico Inferior y Superior, está representada por lutitas negras y pardas, además de calizas de estratificación media (Muir, 1936). En este último caso las tonalidades varían de pardo a gris oscuro. Su distribución no es identificable dentro del área de estudio.

Formación San Felipe

Constituida por calizas compactas y arcillosas con estratificación definida, presenta variaciones de tono de azulado a café y verde (Dumble, 1918), en algunos casos tonos anaranjados producto de la intemperización. Subyace a la Formación Méndez, de tipo de roca semejante y en algunos casos presenta discordancias entre las dos formaciones. En algunos afloramientos muestra manchas de color oscuro debidas a la presencia de algas del ambiente acuático que le dio origen. Los afloramientos de esta formación se localizan al sur de Ahuacatlan y al norte de Tatazoquico.

Formación Méndez

Originada en el Cretácico Superior, sobreyace a la San Felipe, consiste en margas de tonos grises y azules, de espesores de más de un metro. En ocasiones puede hallarse con capas de areniscas, lutitas y calizas de poco espesor, además de algunos

conglomerados (Dumble, 1918). Los afloramientos de esta formación se localizan al norte de la población de Mazatepec.

Era Cenozoica

Durante el Eoceno se identifica la formación de intrusiones de rocas ígneas en el área de estudio, donde los granitos son los más representativos; estos se encuentran de manera aislada en la zona de Chignautla y Ahuacatlán.

Formación Cruz Blanca

De edad del Terciario, se encuentra representada por conglomerados, originados por la erosión de los materiales formados en la era Mesozoica. (Yáñez-García, 1982). Esta formación sobreyace a las Formaciones Méndez y San Felipe. Dentro del área de estudio no aflora esta formación. Los materiales ya mencionados corresponden al Mioceno Medio, materiales de arena volcánica y arcilla en interdigitación con sedimentos de tipo lacustre, además de pómez y cenizas se hallan junto con los conglomerados de esta Formación, estos últimos corresponden al Mioceno Superior.

Andesita Alseseca

Esta formación se originó debido a la actividad volcánica al inicio del Mioceno Tardío, la cual se caracterizó por estar constituida por lavas andesíticas (Yáñez-García, 1982) y tobas ácidas en menor grado; las tonalidades de las rocas varían de gris a gris oscuro. Sobreyace a la Formación Cruz Blanca y Méndez representados por materiales producto de la erosión e intemperismo de rocas de edad mesozoica. Los afloramientos más importantes de esta andesita se localizan al noreste de Ahuacatlán, al oeste de Chicualco y norte de Yaonahuac.

Formación Teziutlán

Esta Formación está asociada a la actividad del centro volcánico Los Humeros, se caracteriza por lavas de tipo andesítico, fenobasalto y basaltos. Su edad es de aproximadamente es de 3.6 a 1.6 millones de años (Ma) y es considerada como la

actividad inicial de la formación del centro volcánico, además de precursor de la actividad de tipo riolítico característico de la zona (Ferriz, 1985). Los afloramientos se localizan al norte de la población de Zaragoza, Ocotlán, Plan de Guadalupe y sur de San Miguel Tenextatloyan.

Riolita Oyameles

Se presenta como una serie de domos originados por erupciones de composición silícica, que formaron capas de lava riolítica; esta actividad se desarrolló en la periferia del centro volcánico, aproximadamente hace 0.47 Ma (Ferriz, 1985). Los afloramientos de esta formación son escasos y se encuentran distribuidos principalmente al sur del centro volcánico, aunque dentro del área de estudio sólo aflora al sureste de la Geotérmica Los Humeros.

Ignimbrita Xáltipan

Según Ferriz (1985) fue originada por una erupción de tipo pliniano, de la cual los depósitos característicos son tobas de caída libre e ignimbritas, con una edad aproximada de 0.46 Ma. La formación de estos materiales también se relaciona con la formación de la caldera de Los Humeros. Las dimensiones de los materiales originados se estimada que cubren un área de 315 Km².

En la Ignimbrita Xáltipan se halla una pómez de composición riolítica a riodacítica y escasa escoria andesítica. Esta formación además muestra tres estados de consolidación: denso, medio y sin consolidación. Dentro del área de estudio afloran los de tipo denso cerca de Zaragoza y Zacapoaxtla. La pómez sin consolidación se distribuye alrededor de la caldera de Los Humeros, además presentan fuertes espesores en Zaragoza, Zacapoaxtla y el suroeste de Oyameles (Yáñez-García, 1982).

Toba Faby

Posterior a la formación de la caldera de Los Humeros, surgieron una serie de domos de composición riolítica, los cuales presentaron una alineación de manera anular siguiendo

una fractura que se originó en el centro volcánico. Posteriormente fueron cubiertos por la Toba Faby, de composición riodacítica principalmente de caída libre, de aproximadamente 0.24 Ma de edad. No se ha reconocido ninguna estructura de colapso que se relacione con la formación de la toba, y se supone que tiene su origen en nueve erupciones discretas, separadas por etapas de una duración suficiente para que el volumen expulsado fuera compensado por nuevas inyecciones de magma a la cámara (Ferriz y Mahood, 1984).

Ignimbrita Zaragoza

Según Ferriz (1985), una tercera etapa de actividad pliniana se dio hace aproximadamente 0.1 Ma, durante la cual fueron expulsados 12 Km³ de magma de composición riodacítica a andesítica, que dieron origen a la Ignimbrita Zaragoza. Durante esta erupción se produjo un colapso que formó a la caldera de Los Potreros, localizada al oriente de la población de Buena Vista; dentro de la misma caldera de Los Humeros. Existen fallas que cortan a la Ignimbrita Zaragoza, lo cual indica que el fenómeno tuvo lugar tiempo después de que la ignimbrita fue expulsada (Ferriz y Mahood, 1984). Hay evidencias de que la velocidad de la actividad disminuyó conforme progresaba la erupción, así que el mecanismo del movimiento de materiales varió de caída libre a flujo piroclástico (Ferriz y Mahood, 1984).

La ignimbrita se distribuye en forma de franjas paralelas de norte a sur en las poblaciones de Zaragoza, Ocotlán, al oeste de Gómez Poniente y Xonocuatla.

Tobas Xoxoctic y Derrame El Limón

Después del colapso que formó a la caldera de Los Potreros, fueron expulsadas una serie de lavas andesíticas y riodacíticas, provenientes de la parte central del centro volcánico y su edad se ha estimado en 0.06 Ma. las lavas y los escarpes de la caldera están cubiertos por una toba dacítica de caída libre y de escaso volumen, a esta Formación se le ha denominado Xoxoctic de edad de 0.04 Ma (Ferriz, 1985).

Seguido del emplazamiento de la Toba Xoxoctic, se originaron los derrames de composición andesítica que cubrieron a las tobas ya emplazadas, este derrame es denominado como derrame El Limón (Ferriz, 1985).

Los materiales de la formación se distribuyen al sur de la Geotérmica de Los Humeros y, hasta el este de la población de Buena Vista y Guadalupe Victoria.

Derrames Andesíticos Tepeyahualco y Sarabia

Según Ferriz (1985), hace aproximadamente 0.05 y 0.03 Ma se formó un arco de conos de escoria a lo largo de la porción sur de la fractura anular de la caldera de Los Humeros; esta actividad dio origen a los derrames andesíticos denominados Tepeyahualco y Sarabia; estos se extienden hacia el sur del centro volcánico. Dentro del área de estudio estos derrames se localizan en la parte sureste y sólo abarca una porción pequeña. Posteriormente surgieron los pequeños volcanes escudos Chiapa y Orilla del Monte, localizados en los bordes del centro volcánico, pero no afloran en el área de estudio.

Toba Cuicuiltic

Posterior a la formación de los derrames Tepeyahualco y Sarabia, una pequeña erupción subpliniana dio origen a la Toba Cuicuiltic, caracterizada por depósitos de caída libre, en el cual se encuentra una pómez riodacítica con mezcla de escoria andesítica (Ferriz, 1985). Al final de esta actividad se produjo el colapso de la caldera El Xalapasco, asociada a la formación del mismo nombre. La toba se distribuye al sur de la Geotérmica de Los Humeros, con poca extensión en el área de estudio.

Andesitas Xalapasco

Con la formación de la caldera Xalapasco, de 1.7 km de diámetro, al sur de la caldera de Los Potreros, se originó una erupción de 10 Km³ de lavas riodacíticas y en menor volumen andesitas. Su foco de emisión se encuentra cerca de la margen norte de la caldera de Los Potreros, en el área entre los bordes de las dos calderas principales, y en una amplia extensión de la porción sur de las zonas de fractura anular de las dos

calderas, donde casi coinciden (Ferriz, 1985). Dentro del área de estudio estos materiales se localizan en el extremo sureste, al sur de la Geotérmica Los Humeros.

Basaltos recientes

La última etapa de la actividad volcánica de Los Humeros está representada por una erupción que se originó hace 0.02 Ma, en el piso de las calderas de Los Potreros y El Xalapasco, y a lo largo de la porción sur de fractura anular. Dichos basaltos han sido relacionados con una nueva inyección de magmas proveniente de la cámara que dio origen al centro volcánico (Ferriz y Mahood, 1984). Los materiales de esta última etapa de actividad se localizan en la porción noroeste de la Geotérmica Los Humeros.

2.3 Geomorfología (Análisis Morfométrico)

En la Geomorfología, la morfometría es la cuantificación de algunos de los elementos del relieve; los valores que se expresan no sólo son útiles para el estudio de la superficie, sino que también para analizar los procesos actuales que modifican al relieve, ya sean endógenos o exógenos (Lugo, 1991).

Mediante la identificación de los elementos y su cuantificación, el análisis morfométrico se ha considerado conveniente en el estudio del relieve, y de manera indirecta en la consideración de la génesis, estructura y dinámica.

El estudio de las formas del relieve inicia con su clasificación geométrica en puntos, líneas, superficie y volúmenes de acuerdo con su representación en un mapa y se pueden cuantificar por longitud, superficie, volumen, altura absoluta y relativa, pendiente, orientación, densidad, frecuencia, entre otros elementos (Lugo, 1991).

Mediante la elaboración de mapas, por medio de los métodos morfométricos, se permite la identificación y análisis de temas específicos, y estos estarán en función del objetivo y de la información que se requiera obtener. Con base en la metodología propuesta por (Simonov en Zamorano, 1990), para la elaboración de mapas morfométricos, se utilizaron

los mapas de densidad de disección del relieve, profundidad de erosión o de la disección y energía o amplitud del relieve, realizados en Alcántara-Ayala, I. et al (2002). Para lo cual fue extraída y complementada el área que abarca al municipio de Tlatlauquitepec.

La finalidad de la obtención de estos mapas se ubica en la realización de un análisis que muestre los sitios donde se halla un influencia de los procesos modeladores del relieve con la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, además de que estos mapas fueron utilizados como base para la obtención de uno específico denominado como Asociaciones Morfométricas, el cual se expone en el capítulo 4, por lo cual la información obtenida sirvió solo como preámbulo a otro análisis específico.

Mapa de densidad de disección

El objetivo principal de la elaboración de este mapa es la identificación cuantitativa del resultado de la acción de los ríos, tomando en cuenta a los talwegs como formas originadas por la erosión fluvial. Además de estar relacionada con los procesos erosivos modificadores de tipo fluvial dentro de una área específica (Lugo, 1991). La metodología utilizada para su elaboración es la propuesta Simonov en Zamorano (1990), misma que es explicada en los párrafos posteriores:

A partir de los mapas morfométricos elaborados en Alcántara-Ayala, I. et al (2002) se retomó la metodología para complementar la superficie que abarca el área de estudio. Se marcaron todos los talwegs, tanto los que aparecen como los que no, estos últimos inferidos a partir de su configuración en las curvas de nivel. Para definir las unidades de muestreo se utilizó los cuadrantes existentes en el mapa topográfico a escala 1:50 000 con dimensiones de 1 Km² correspondientes a las coordenadas UTM. A partir de esta unidad se realizó la medición de la longitud de los cauces contenidos en cada uno.

Para una mejor comprensión de los valores obtenidos estos fueron expresados en un mapa de isolíneas resultado del cálculo de los valores de posición inmediata y complementarios. Los rangos de valores que se muestran en este mapa fueron definidos a partir de los mapas publicados en Alcántara-Ayala, I. et al (2002) para un análisis morfométrico de la Sierra Norte de Puebla, además de los intervalos denominados como alto, medio y bajo.(Figura 2.3).

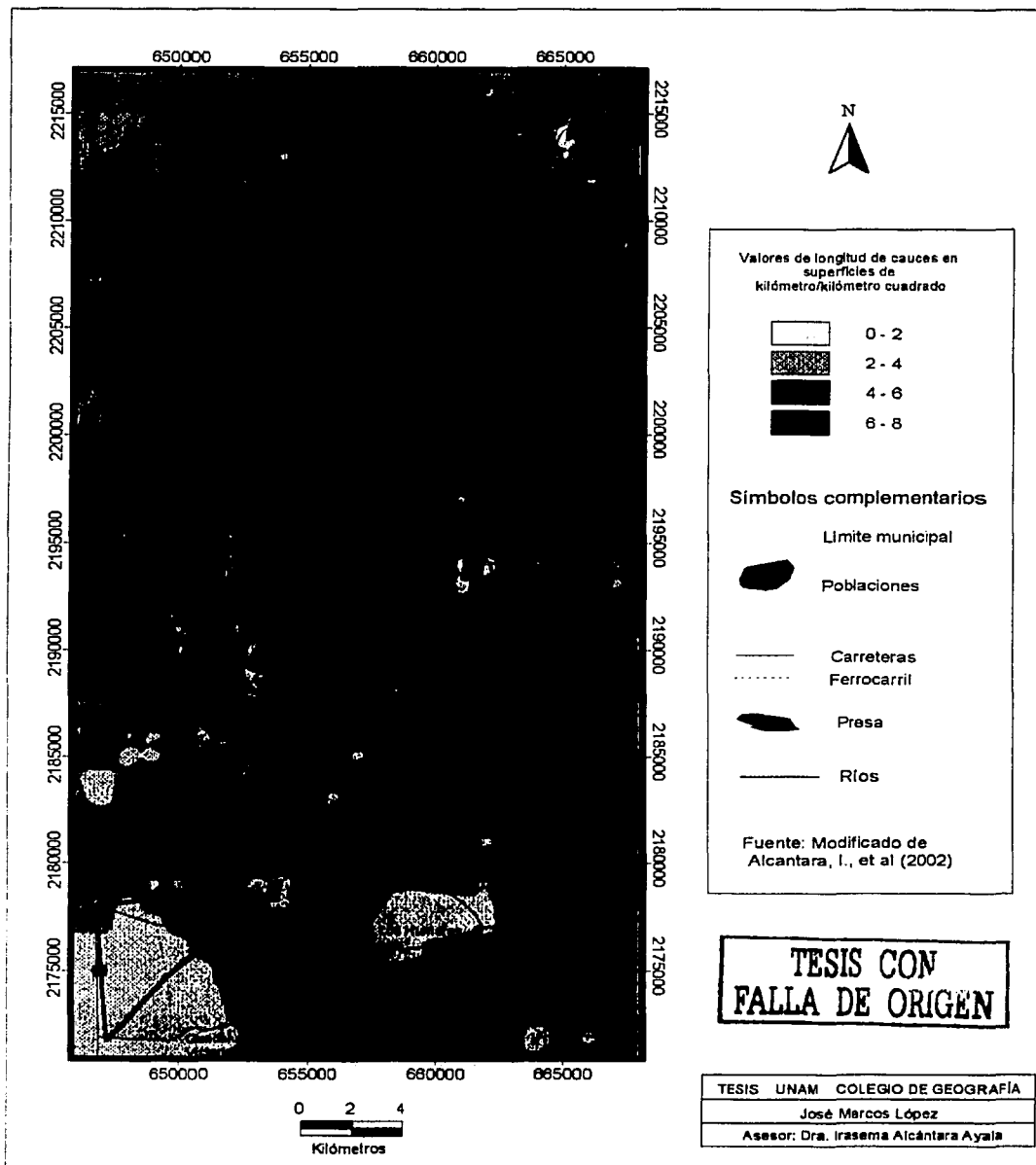


Figura 2.3 Mapa de densidad de la disección del municipio de Tlatlauquitepec

De los valores que se obtienen del mapa se puede deducir que aquellos que son de un valor bajo indican una escasa acción de la erosión, por el contrario los valores altos indican una influencia activa de la erosión en el relieve. Es conveniente que la información se interprete en función de otros parámetros que influyen en el relieve como: el régimen hidrológico, la precipitación, el tipo de roca, pendientes, el grado de fracturación de los materiales, la forma geométrica de las laderas, la cobertura vegetal, los tipos de suelos predominantes, entre otros.

Los valores más bajos de densidad de disección, comprendidos entre 0 a 4 kilómetros de longitud por kilómetro cuadrado, se distribuyen principalmente en la porción sur y norte del área de estudio. En la parte norte corresponden a algunas porciones del relieve de poca inclinación donde la erosión de los ríos es menos activa, en estos caso se trata de rocas calizas débilmente disectadas además de que forman laderas de ligera inclinación. En la porción centro se distribuye preferencialmente en el relieve de rampa que corresponde a depósitos de piroclastos donde la disección efectuada por los ríos es menos intensa, además de que el declive del relieve es bajo. En la porción sur se localiza una planicie que se encuentra al sur de San Miguel y cerca de Zaragoza, corresponde a depósitos de ignimbrita del cuaternario. También ocupa la porción correspondiente a los depósitos de tobas y derrames andesíticos que conforman a la estructura principal de la caldera de Los Humeros.

Los valores considerados como medios, comprenden valores de 4 a 6 kilómetros de longitud por kilómetro cuadrado, se distribuyen en la porción centro-norte y en forma escasa en la parte sur. En este caso se refiere a las zonas donde la erosión de los ríos es significativa, además de que se distribuye de manera preferencial donde las laderas presentan formas cóncavas y se relacionan a rocas de origen sedimentario, y en menor proporción a ignimbritas; este valor expresa que dichas áreas han estado expuestas mayor tiempo a la erosión. La porción sur denota áreas donde los materiales producto de la caldera muestran poca consolidación.

Los valores más altos corresponden a las zonas erosionadas dentro del área de estudio, estos se hallan entre el rango de más de 6 kilómetros de longitud por kilómetro cuadrado y se distribuye principalmente en las cercanías de poblaciones como Calacatepec,

Chicualco, así como al norte de Tlatlauquitepec, en las laderas por donde atraviesa el río Apulco y al oeste de la presa La Soledad.

Mapa de profundidad de la disección

En este mapa se considera al procesos erosivo en plano, también es llamado como disección del relieve, en el expresa el trabajo erosivo de los ríos en forma vertical, a partir de las medición del talweg a la ruptura de pendiente mas representativa y próxima a la ladera del valle (Simonov en Zamorano,1990).

Según García-Romero (1993), este mapa tiene como finalidad presentar el valor del corte vertical que realizan los ríos, además del grado de susceptibilidad a la erosión que tiene el relieve. La metodología utilizada es semejante a la que se utilizó en el mapa de densidad de la disección y se especifica a continuación:

A partir de los mapas elaborados en Alcántara-Ayala, I., et al (2002) se complemento el área que abarca el municipio; del trazo de los talweg en cuadrantes de 1 Km² se obtuvo el valor del corte vertical, mediante la medición de los intervalos de curvas de nivel de manera transversal del talweg a la ruptura de pendiente mas representativa próxima a la ladera inferior del valle. Una vez obtenidos los valores se expresaron en un mapa de isolineas en rangos a cada 20 metros de profundidad, interpretando éstos como el valor máximo de profundidad de barrancos y valles fluviales en metros en una superficie de un kilómetro cuadrado. La definición de los intervalos de valores en altos, medio y bajo fue a partir de los definidos en los mapas que fueron utilizados como base (Figura 2.4).

La profundidad de disección es el reflejo de un proceso en un tiempo determinado, en donde los valores varían en distintas zonas en función de las condiciones geológicas, estructurales, tectónicas y climáticas.

Los valores bajos de profundidad de disección del relieve equivalentes a los valores menores de 40 metros de profundidad, se distribuyen en la zona sur del área de estudio, debido a que en esta porción se localiza una planicie donde los procesos erosivos son menores y debido al declive existente en esta. Además en este rango se incluye una zona semiplana correspondiente al piso existente en la caldera de Los Humeros. También se

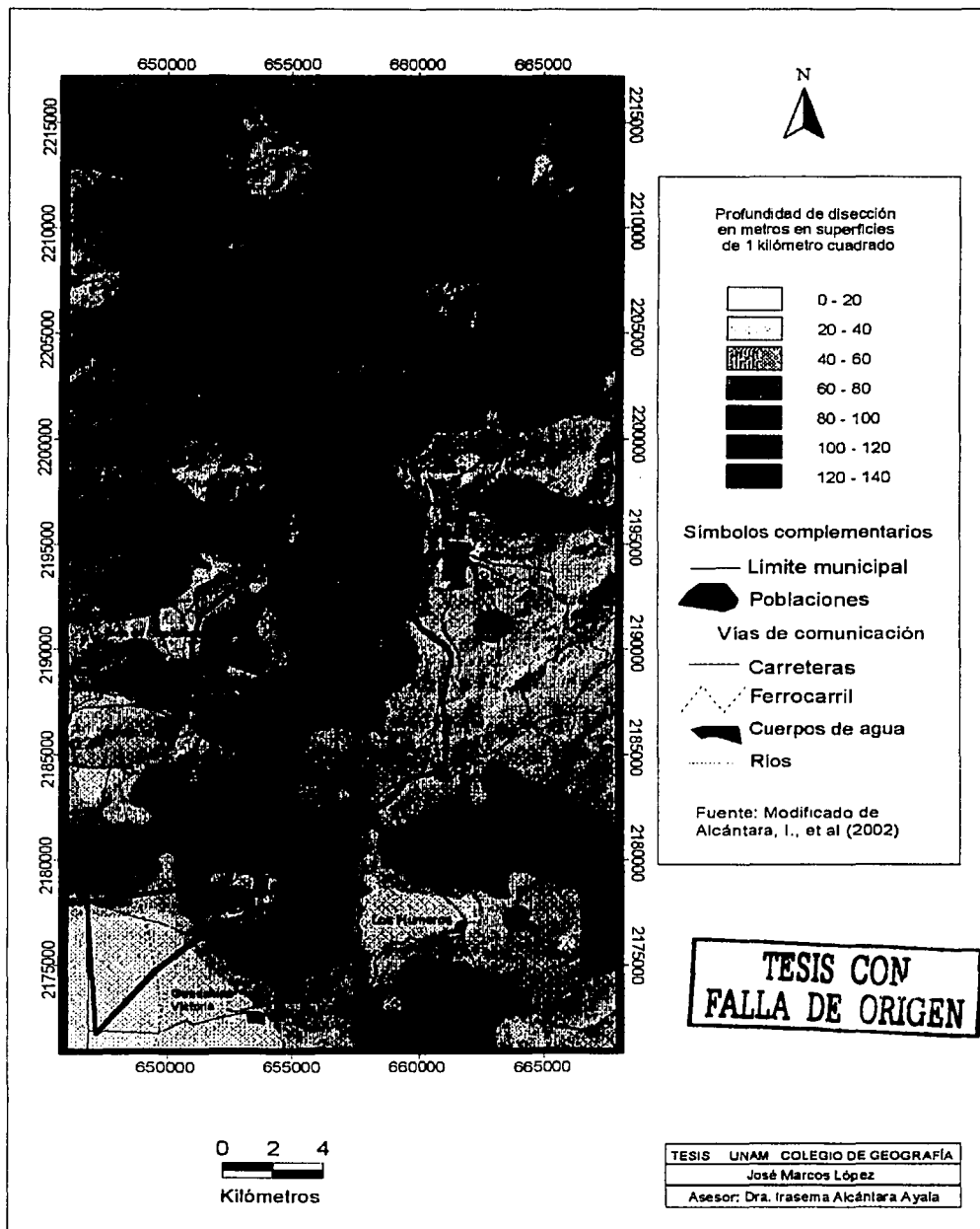


Figura 2.4 Mapa de la profundidad de la disociación del municipio de Tlatlauquitepec

distribuye en la zona próxima a la población de Zaragoza y en una gran superficie que abarca las poblaciones de Yaonahuac, Hueyapan, Teteles, Atempán y Gómez Poniente donde el relieve presenta una forma semejante a una rampa de poca inclinación.

Los valores comprendidos entre 40 a 80 metros de profundidad considerados como medios, tienen una amplia distribución dentro del área de estudio, es este caso su mayor extensión se localiza tanto al centro como al norte del municipio, y en una menor proporción en la zona sur, este último se refiere a la estructura principal de la caldera de Los Humeros que se encuentran en la porción sureste del área de estudio.

Los valores más altos, o sea los mayores a 80 metros de profundidad, se refieren principalmente a zonas donde la erosión fluvial es intensa, aunque su distribución es heterogénea dentro del área de estudio, estos se localizan en la cercanías de San Miguel, Oyameles, Zoquiopán, Hueyapan, Tepetzintla y al oeste de Mazatepec.

Mapa de energía del relieve

Este mapa expresa la relación que existe entre la intensidad de los procesos endógenos con los exógenos. También es llamado mapa de amplitud del relieve, presenta los desniveles máximos existentes dentro de una área específica, además de que permite conocer de manera indirecta la inclinación del terreno. Presenta además una relación directamente proporcional con el mapa de pendientes, ya que en las zonas donde se presentan los valores altos de energía del relieve, también se observan los de pendiente fuerte; mientras que las zonas de valores bajos de energía del relieve, corresponden a zonas casi planas en donde no se contraponen la actividad exógena sobre la endógena (Flores, 2002). La metodología utilizada para la elaboración del mapa se especifica en los párrafos posteriores:

A partir del mapa elaborado en Alcántara-Ayala, I., et al (2002) se complementó el área que abarca la zona de estudio; se obtuvo la diferencia máxima de alturas en metros comprendida en cada cuadrante existente de 1 Km², correspondiente a la cuadrícula de las coordenadas UTM. Este valor se consideró como el representativo de toda el área y del centro del cuadrante para su posterior interpolación.

Una vez obtenidos los valores se expresaron en un mapa de isolíneas en rangos a cada 100 metros de diferencia de altura existente en el área (Figura 2.5), además de agruparse los rangos en criterios de alto, medio y bajo, lo cuales han sido utilizados a partir de los mapas morfométricos elaborados en Alcántara-Ayala, I., et al (2002).

Los valores bajos comprendidos entre 0 a 200 metros se distribuyen principalmente en la parte centro y sur del área de estudio, en esta última debido a que en esta zona existe una planicie y un relieve en forma de rampa tanto en la parte central como en la sur-este. La primera corresponde a una amplia rampa de materiales ignimbriticos y la segunda a los depósitos más recientes originados por la caldera de Los Humeros, los cuales presentan formas onduladas y con pocas diferencias de altitud.

Los valores medios de 200 a 500 metros se distribuyen preferencialmente en la parte norte y norte-centro del área de estudio; en esta zona predomina la mayor cantidad de elevaciones de la región, además de que las formas más características del relieve consisten en laderas montañosas, elevaciones y valles producto de la erosión fluvial.

Los valores altos, o sea mayores de 500 metros, indican sitios donde la actividad de la erosión es mayor o que los declives son altos, además de corresponder a zonas montañosas mas altas cortas por valles profundos, estas se localizan en la porción centro-norte y en forma paralela al río Apulco y Atexcaco, principalmente cercas de la población de Calacatepec, Tepetzintla, Yoloctzin y en la porción norte de la presa La Soledad.

2.4 Regionalización Geomorfológica

El mapa geomorfológico muestra las formas del relieve un territorio clasificándolas de acuerdo a su génesis, ya sea de tipo endógeno y exógeno; y su configuración actual en la superficie del terrestre.

Para la elaboración del mapa de regionalización morfogenética, se utilizó como base el publicado en Alcántara-Ayala, I. et al (2002), a partir de este se definieron las regiones que no se hallaban expresadas y que abarcaban el área de estudio. Estas regiones fueron

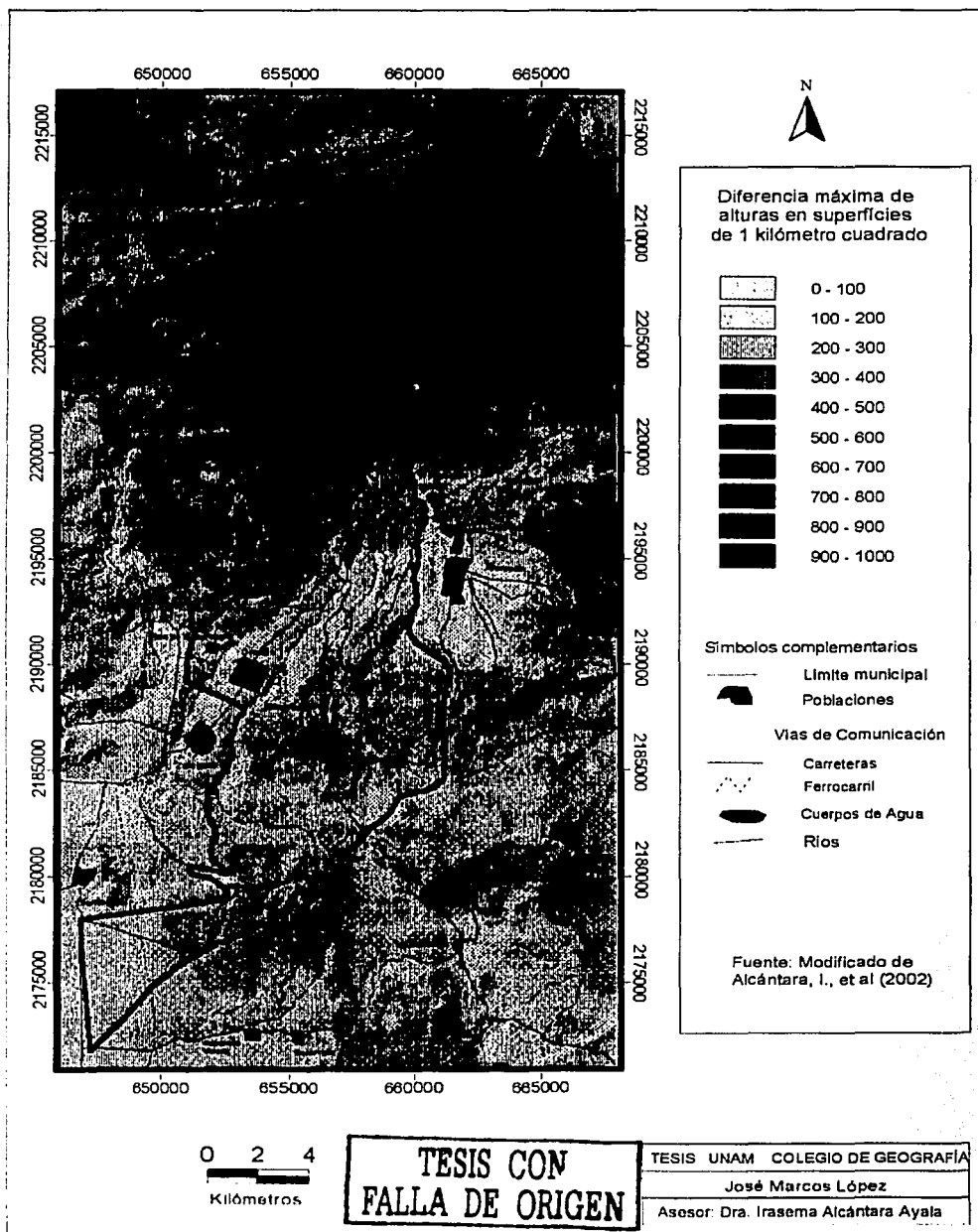


Figura 2.5 Mapa de energía del relieve del municipio de Tlatlaquitepec

definidas a partir de la interpretación de la configuración de las curvas de nivel y revisión preliminar de fotografías aéreas con un criterio morfológico.

El objetivo de la elaboración del mapa de regionalización geomorfológica se basó en mostrar grandes regiones de acuerdo a su génesis, tipo de material y estado indirecto de los mismo, dicho mapa obtenido sirvió como base para la obtención del un mapa de índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa que se explica en el capítulo 4, donde se debe de introducir información de acuerdo a los tipo de materiales existentes en la región.

Debido a que la información que se obtiene del mapa geológico presenta generalizaciones, se decidió utilizar el mapa de regionalización geomorfológica ya que en este se muestra a grandes regiones de acuerdo a su expresión en el relieve conforme a su litología, estado y origen, lo cual nos permite introducir parámetros específicos utilizados en el capítulo 4 para la obtención de un índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Del análisis de la información mencionada se reconocieron tres grupos genéticos: relieve endógeno (volcánico), estructural denudatorio (sedimentario, metamórfico e intrusivo) y exógeno erosivo (Figura 2.6). A continuación se describe cada uno de los tipos de morfología que se reconocieron para la zona del municipio de Tlatlauquitepec.

I.- Relieve Endogeno

A.- Volcánico acumulativo (Cuaternario)

Debe su origen a la acumulación de materiales originados de la actividad volcánica, éstos se pueden clasificar como efusivo, explosivo y extrusivo. El proceso de tipo efusivo se refiere a la emisión de lava en la superficie terrestre y su posterior enfriamiento. El de tipo explosivo se debe a la violenta emisión de material magmático hacia la atmósfera y su posterior depositación en la superficie .

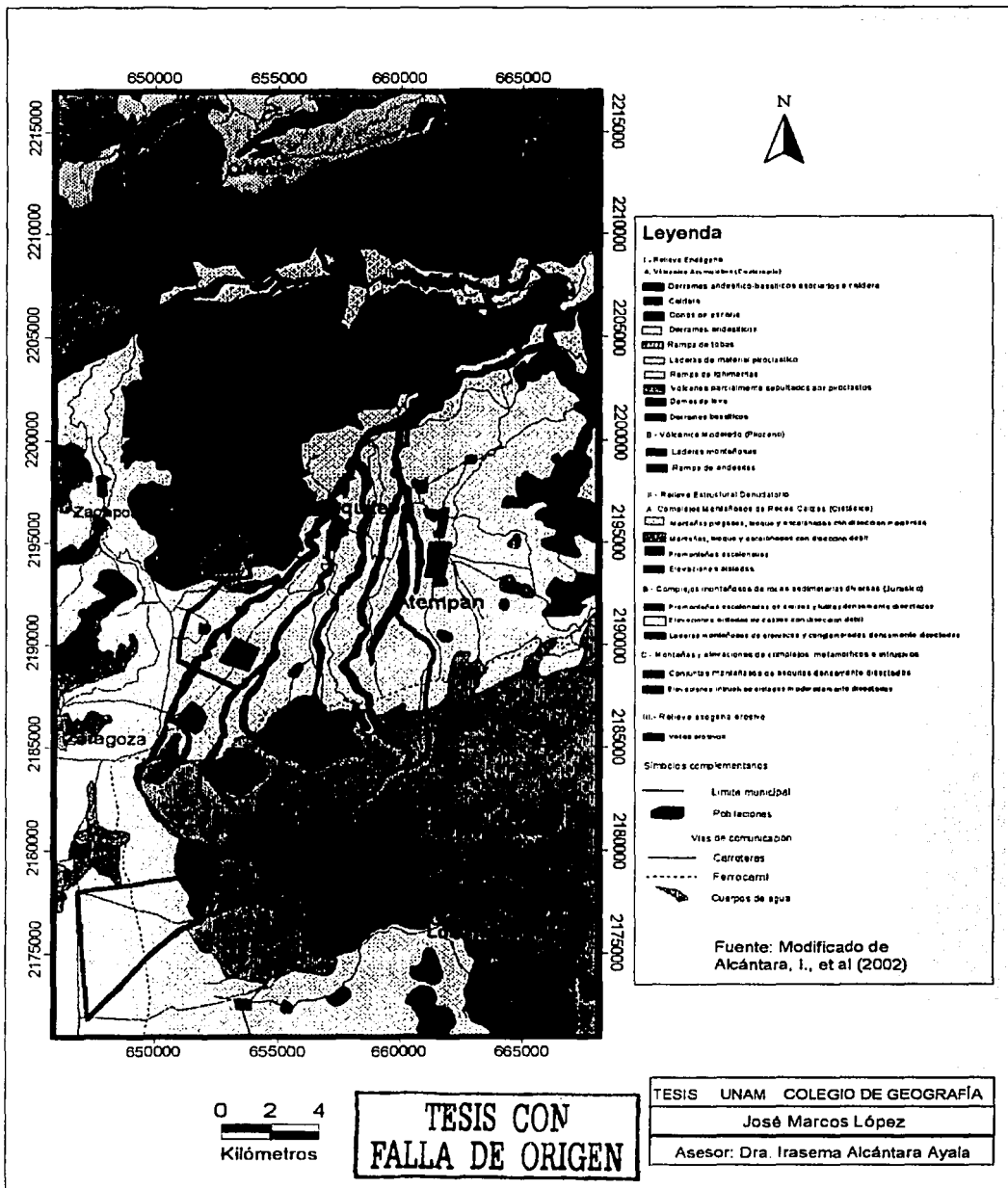


Figura 2.6 Mapa morfogenético del municipio de Tlatlauquitepec

La distribución de las formas originadas se encuentra en función del tipo de material emplazado, de sus características químicas, la topografía preexistente y de las fuentes que originaron a los materiales.

Derrames andesítico-basálticos asociados a caldera

Este tipo de depósitos se deben a la última actividad identificada del centro volcánico Los Humeros y anterior a la formación de la caldera de Los Potreros, además de la formación de la Caldera Xalapasco siendo esta última la de formación más reciente. Las rocas son de tipo andesítico en el caso del derrame que se localiza al sur de la caldera de Los Humeros ya que está relacionado con la formación de la misma.

Otro derrame se ubica en el piso de la Caldera de los Humeros, este derrame presenta una composición basáltica y andesítica en menor proporción. En el caso del asociado a la caldera reciente, muestra una morfología de lenguas y rampa que se encuentra orientada al NE de la caldera Xalapasco, la cual termina con un desnivel de 40 metros. En el segundo caso tiene forma de semiplano, con desniveles de menos de 20 metros, localizándose al oeste de la geotérmica Los Humeros (Figura 2.7).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.7 Derrame basáltico correspondiente a la piso de la caldera de los Humeros con inclinación débil y formación reciente, sobre la cual se ubica la geotérmica Los Humeros.

Caldera

Aunque toda la porción sur del área de estudio está influenciada por la actividad de la caldera de Los Humeros, sólo en un caso es observable una estructura de la misma con forma geométrica, ya que la mayor parte ha sido cubierta por materiales de formación

posterior, además de que no es observable debido a que abarca una gran extensión dentro del área de estudio.

La caldera llamada Xalapasco es una de las últimas formaciones del centro volcánico Los Humeros y que se localiza en la porción sureste del área de estudio. Los materiales que componen a la caldera son de tipo andesítico presentando una disección débil debido a que no se observa la formación de corrientes fluviales en el cuerpo principal, además de que los existentes suelen ser de tipo efímero y de poca profundidad influenciados por la pendiente que presentan sus laderas de más de 30° y del tipo de litología que la compone. Presenta una forma elipsoidal, con su eje mayor orientado de norte a sur, los desniveles que presenta son de 80 a 100 metros en su parte exterior y una ladera casi vertical de 100 metros de desnivel en su parte interior.

Conos de escoria

Al sur del área de estudio y al norte de la caldera Xalapasco se hallan siete conos de escoria distribuidos de forma radial en dicha estructura, están compuestos de materiales de composición dacítica, riódacítica y en menor proporción basáltica.

Estos conos se formaron en coincidencia a una fractura del interior de la caldera de Los Humeros. En unos casos se hallan próximos uno a otro habiendo una unión de sus laderas, las alturas de estos son de 80 a 160 metros sobre su base en la porción sur, y de 240 metros en la porción norte.

Derrames andesíticos

Están asociados a la formación de los conos de escoria, su origen tuvo lugar después del emplazamiento de los conos ubicados en la porción sur y se distribuyen en el interior y exterior de la caldera de Los Humeros. El derrame presenta una morfología que semejante a lenguas orientadas en dirección NE, SW y S en la porción sur del área de estudio, culmina con un desnivel de 120 metros formando el frente de derrame; en la porción SW y NE su parte más distal presenta un forma de rampa de suave inclinación.

Estos derrames son denominados como Tepeyahualco y Sarabia. Se extienden ms hacia el sur del centro volcánico Los Humeros, pero sólo una parte de ellos se localiza dentro del área de estudio. Las localidades de Buena Vista y Guadalupe Victoria se localizan sobre este tipo de rocas (Figura 2.8).



Figura 2.8 Derrame andesítico con forma de lengua al sur de la caldera de Los Humeros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Domos de lava

Un domo de lava es un cuerpo extrusivo con forma de cúpula, pendiente mayor de 35° en sus laderas (Lugo, 1989). Su formación en la mayoría de los casos se asocia a la compresión de magmas viscosos en un canal volcánico. Los domos de tipo extrusivo se pueden clasificar de acuerdo con la forma que presentan sus laderas, los más representativos en el área de estudio son los de forma de cúpula y con coladas de lava.

Los domos más recientes se localizan en la porción sur del área de estudio, en las cercanías de la población de Oyameles y dentro de la caldera de Los Humeros. Presentan laderas con desniveles de 80 a 160 metros, además de tener pequeñas dimensiones y forma representativa de cúpula (Figura 2.9). Se formaron antes del emplazamiento de la Toba Faby, son de composición riolítica y se disponene en forma radial siguiendo una fractura preexistente dentro de la estructura principal del centro volcánico Los Humeros (Ferri y Mahood, 1984).

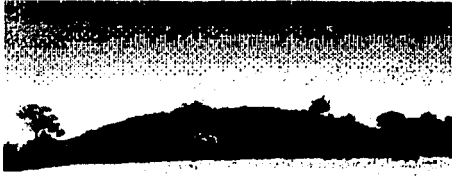


Figura 2.9 Domo con forma de cúpula de composición riolítica al norte de la población de Oyameles.

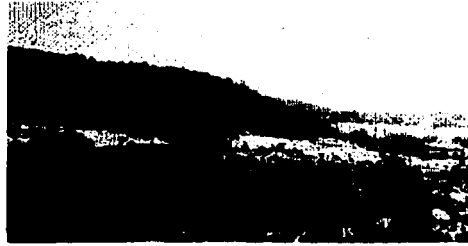


Figura 2.10 Domos con coladas de lava al sur de la población de Gómez Poniente.

Los domos de formación mas antigua según Ferriz (1985), se hallan al este de Zaragoza y al sur de Gómez Poniente. Presentan formas de cúpula con coladas cortas de lava a su alrededor. Son de dimensiones mayores a los localizados al sur, que son de formación reciente. Alcanzan alturas de 220 a 280 metros en el caso de los domos localizados al oeste de Zaragoza. Otro domo se encuentra al norte de Oyameles de una altura de 320 metros (Figura 2.10). Estos domos fueron emplazados anterior al colapso que formo a la caldera de Los Humeros ya que en algunos casos sus laderas están cubiertas por capas delgadas de material expulsado por la formación de la caldera (Ferriz, 1985).

Rampa de tobas

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Parte del relieve volcánico acumulativo de reciente formación esta representado por una rampa compuesta de tobas, estas fueron generadas por medio de nueve erupciones moderadas, entre cada una de estas existió tiempo suficiente para que el volumen expulsado fuera compensado por nuevas emisiones de material, la composición de esta rampa es de tipo riolítica (Figura 2.11). Dentro de la rampa se encuentran dos formaciones distintas de tobas; la más antigua es la ubicada al sur denominada Toba Xoxoctic, tienen corta extensión, composición dacítica, escaso volumen y solo se halla emplazada en una porción pequeña en la parte sur del municipio, la más antigua corresponde a la Toba Faby, esta tiene una amplia distribución dentro de la zona de estudio y abarca desde el sur de Teziutlán hasta la geotérmica de Los Humeros y la población de Oyameles (Martínez-Serrano, 1994).

La región de rampa de tobas abarca aproximadamente el 30% de la superficie del área de estudio, presenta un descenso comprendidos entre los 3 000 msnm en la porción sur a

2 200 msnm en la porción al norte, con un máximo de 800 m de diferencia altitudinal cerca de Teziutlán, los descensos altitudinales son poco abruptos y suelen ser de forma suave y constante.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.11 Materiales que componen a la rampa de tobas pertenecientes a la toba Faby, la pared presenta una altura de 2 metros en la construcción de la carretera ubicada sur de la población de Tepeteno de Iturbide.

La formación de estas tobas se dio por medio de la consolidación de materiales de erupción volcánica como cenizas y arenas, los cuales formaron a la roca. A la rampa el subyacen materiales de ignimbritas y de origen sedimentario, su declive es de 6° , además de hallarse afectada ligeramente por la acción de erosión vertical con valores de 40 metros de profundidad en los cortes verticales efectuados por los ríos, esto sólo distinguible en la porción norte de la misma, donde se localizan los contactos entre la rampa de tobas e ignimbritas.

Rampa de piroclastos

La rampa de piroclastos es otro de los elementos representativos del relieve de tipo explosivo-acumulativo. Se presenta distribuida en una dirección sur a norte, sus diferencias altitudinales van de 2,500 msnm en la parte sur, hasta 1,200 msnm en la porción norte, teniéndose un desnivel de hasta 1,300 metros, correspondiente a una morfología de rampa (Figura 2.12).

La rampa se presenta contrastes, ya que en algunas porciones como al sur y norte de San Miguel existen formas ligeramente onduladas que abarcan hasta la población de Ocotlán; desde esta población hasta las laderas que rodean al río Apulco presenta un descenso constante caracterizado por pendientes de 5°.



Figura 2.12 Rampa de piroclastos sobre la que se asienta la ciudad de Tlatlauquitepec (al centro).



Figura 2.13 Rampa piroclástica de poca consolidación disectada por un río al norte de la ciudad de Tlatlauquitepec.

La composición de esta rampa es resultado de la acumulación de materiales de caída libre correspondientes a las Formaciones Ignimbrita Xaltipan y Zaragoza, las cuales fueron formadas por medio de una serie de erupciones de tipo pliniano para el caso de la Ignimbrita Xaltipan (Ferriz, 1985), que presenta materiales como pómez de composición riolítica y variaciones de tipo riodacítico. Para el caso de la Ignimbrita Zaragoza los materiales corresponden a una erupción pliniana que arrojó materiales de composición riodacítico a andesítico. Para los dos tipos de Ignimbrita se observa según Ferriz y Mahood (1984) que la velocidad de la actividad que generó los materiales disminuyó de caída libre a flujo piroclástico según el mecanismo de movimiento.

Esta rampa de piroclastos presenta la característica de ser materiales de poca consolidación compuestos principalmente por ceniza y pómez, esta altamente disectada por una serie de valles erosivos que siguen una orientación SE-N-NE que corresponden a una serie de fracturaminetos que según Ferriz y Mahood (1984) se produjeron como parte del colapso de la caldera de Los Potreros (Figura 2.13). Estos valles presentan profundidades de hasta 160 metros, indicando una intensa acción erosiva, además de una poca consolidación de los materiales. Estos depósitos sobreyacen a materiales de tipo sedimentario y algunos de tipo volcánico previos a la formación de la caldera de Los Humeros.

Laderas de material piroclástico

Esta morfología corresponde a aquellas laderas en las cuales los productos piroclásticos de misma composición que la rampa se depositaron sin cubrir en su totalidad al relieve preexistentes principalmente de tipo sedimentario y metamórfico, se distribuye principalmente en elevaciones en alturas de 1 400 msnm que se hallan bordeando al río Apulco y Atexcaco. Este relieve corresponde a los productos originados por las Formaciones Ignimbrita Xaltipan y Zaragoza, caracterizados principalmente por pómez y cenizas en menor proporción. A diferencia de la rampa de piroclastos, esta región se caracteriza por ser materiales que se hallan sobre las elevaciones que presentan laderas abruptas, ocupando los piroclastos las partes bajas de estas, debido a que en las partes altas los materiales ya fueron erosionados o no fueron cubiertas por estos. Sus desniveles máximos son de 200 a 500 metros, en algunos casos son mayores por la erosión que presentan los materiales poco consolidados (Figura 2.14).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.14 Laderas de material piroclástico con fuerte disección sobreyacentes a laderas de material sedimentario, al sur de la población de Tepetzintla y al norte de la presa La Soledad.

Este relieve se halla distribuido en las laderas circundantes al río Apulco y Atexcaco, presentan formas alargadas y paralelas a los ríos abarcando desde el este de la presa La Soledad hasta el norte de Zacapoaxtla y Tlatlauquitepec, además de localizarse también en pequeñas porciones de laderas montañosas al sur de Zacapoaxtla; en esta morfología durante 1999 ocurrieron la mayor cantidad de procesos de remoción en masa en el municipio, debido a que en esta zona se presentaron los valores más altos de profundidad de disección alcanzándose valores mayores a 80 metros, en cuanto a la densidad de disección presenta valores de más de 6 kilómetros de longitud de cauces en

áreas de 1 Km², además de valores de energía del relieve de más de 500 de diferencia altitudinal en áreas de 1 Km² y pendientes de más de 24°.

Volcanes parcialmente sepultados por piroclastos

Corresponde a volcanes de basalto y brecha del Cuaternario distribuidos al NW de Teziutlán, son de pequeñas dimensiones con forma cónica y altura promedio de 80 a 100 metros sobre su base local, su composición es de basalto y origen de tipo monogenético ya que conservan formas originales y no existen indicios de actividad posterior a su formación.

Esta morfología se halla cubierta por la rampa de piroclastos originadas por la actividad de la formación de la caldera de Los Humeros. Su distribución no presenta algún arreglo aparente pero formaron un obstáculo en el emplazamiento de la rampa de piroclastos de ahí que la distribución de dicha rampa sea principalmente en la porción centro del área de estudio y al norte muestre un arreglo irregular debido a efecto que tuvo la presencia de esta barrera natural para la depositación del material. Estos piroclastos cubrieron el relieve preexistente con capas potentes de piroclastos que dando solo algunas formas originales expuestas como es el caso de los volcanes localizados al NW de Teziutlán.

Derrames basálticos

Previo a la emisión de la Ignimbrita Xáltipan se dio el emplazamiento de una serie de lavas de tipo basáltico y andesítico en menor proporción, correspondiendo a la Formación Teziutlán, la cual se caracteriza por ser la actividad precursora de la formación de la caldera de Los Humeros. Los tipos de roca característicos de esta región son escasos dentro del área de estudio, aunque en la porción sur se localizan dos que tienen forma alargada con orientación sur-norte y que forma parte del cuerpo principal de la caldera de Los Potreros, además de ser los únicos indicios de esta caldera, ya que los materiales que posteriormente fueron expulsados cubren a estos derrames.

Su morfología presenta descensos de 100 a 130 metros correspondientes diferentes emisiones de material y paredes abruptas en la parte perteneciente a las laderas

interiores que pertenecieron a la caldera de Los Potreros. Estos derrames se distribuyen al este y oeste de la caldera de Los Humeros y al oeste de la población de Oyameles.

B.- Volcánico Modelado (Plioceno)

Laderas montañosas

Esta morfología se localiza al norte de la rampa de ignimbritas, además de encontrarse próxima a la presa La Soledad; este relieve abarcan ambas laderas que pertenecen a la cuenca del río Apulco y se hallan localizadas en las zonas más altas. Su distribución es largada con orientación de oeste a este con alturas promedio de 1 300 msnm; abarca la parte centro de la zona de estudio, se constituye de productos lávicos de composición andesítico y tobaceo en menor grado con tonalidades de gris a gris oscuro (Yáñez-García, 1982).

Estas laderas han sido fuertemente disectadas por la erosión fluvial, sus cimas se caracterizan por ser agudas y las partes próximas al río Apulco son cóncavas. Este tipo de materiales sobreyace a materiales como esquistos y conglomerados (Figura 2.15).



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 2.15 Laderas montañosas que bordean a la presa La Soledad (A), en su parte superior presentan cimas abrupas de forma convexa (B) y en su parte inferior cóncavas (C), presentan composición andesítica, la parte inferior corresponde a laderas de material piroclástico (D).

Rampa de andesitas

La rampa de andesitas es una de las morfologías menos distribuidas dentro del área de estudio y se localiza al NE del municipio. Esta constituida de lavas pertenecientes a la Andesita Alseseca y muestran un escalonamiento de derrames que se orienta hacia el NE, presenta pocos desniveles altitudinales y sobreyace a depósitos de materiales sedimentarios como calizas. Sus afloramientos se encuentran al norte de la población de Mazatepec.

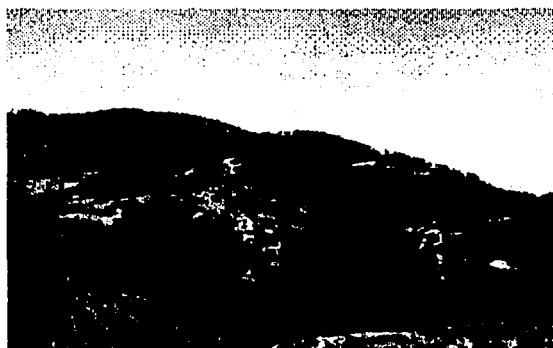
La composición de la roca es de tipo andesítico y basáltica en menor proporción, con edades del Mioceno, la disección en estos depósitos es débil.

II.- Relieve estructural-denudatorio

A.- Complejos montañosos de rocas calizas

Montañas plegadas, bloque y escalonadas con disección moderada

Esta morfología es una de las más distribuidas dentro del área de estudio, ya que se encuentra en la porción norte, además de localizarse al este de San Miguel, sur y oeste de Zaragoza, norte y este de Zacapoaxtla, al este y oeste de Cuetzalan, y en la población de Mazatepec (Figura 2.16).



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 2.16 Montañas plegadas correspondientes a la Formación San Felipe, principalmente de rocas calizas arcillosas con disección moderada al sur de la ciudad de Tlaltlauquitepec.

Presenta orientaciones en un sentido NW-SE; en la porción centro y sur del área de estudio se caracterizan por ser calizas del Cretácico Superior de tipo arcilloso y compacto.

Otro grupo de montañas que se localiza en la parte norte del área de estudio, estas tienen la característica de estar orientadas en una dirección sur-norte presentando una serie de descensos altitudinales de 1 300 a 400 msnm con laderas con formas escalonadas correspondientes a fallas existentes en este tipo de materiales.

Montañas bloque y escalonadas con disección débil

Este grupo de montañas presenta la misma litología que el grupo anterior; se distribuyen de manera preferencial en la porción norte del área de estudio, las poblaciones que se ubican en estas son Jonota, Zoquipan y Cuetzalan.

Este grupo consiste en rocas calizas plegadas del Cretácico Superior, que presentan un descenso orientado al NE, además de mostrar una disección débil en sus laderas, muestran escalonamientos que se expresan en valores de 60 a 80 metros, seguido de laderas inclinadas que se orientan hacia el NE y N.

La diferencia que presenta este grupo con relación al anterior, se debe a que las últimas se ubican dentro de las laderas que rodean a los ríos, mientras que las primeras se encuentran en las partes más altas y han sido poco afectadas por la erosión (Figura 2.17).



Figura 2.17 Montañas de calizas en bloques al sur de Mazatepec.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Premontañas escalonadas

Se encuentra representado por calizas del Cretácico Superior, se compone de calizas compactas y margas con tonalidades de colores azulados, café y verdes. Las formaciones correspondientes en este caso son San Felipe y Méndez, además de encontrarse en alternancia con areniscas, lutitas y conglomerados en menor proporción.

Se reconoce al NW y NE del área de estudio, en las poblaciones de Jonota y al norte de Mazatepec. Forman laderas con una disección moderada, pero para el grupo ubicado en la población de Jonota, comprende laderas interiores de la margen del río Zempoala. En el norte de Mazatepec, se caracteriza por presentar un descenso de altitud orientado hacia el norte.

Elevaciones aisladas

Este grupo esta representado por tres elevaciones aisladas que se localizan al SE de la población de Zacapoaxtla, presentan una orientación de NW-SE, con alturas relativas de 160 a 200 metros. El tipo de roca es calizo del Cretácico Superior, sus formas son alargadas y con un desarrollo débil de corrientes, flancos abruptos, además de ocupar las partes más altas dentro de la zona. En los valores obtenidos dentro de los mapas morfométricos esta regio presento los valores más bajos de densidad de disección y profundidad de disección

B.- Complejos montañosos de rocas sedimentarias de rocas diversas (Jurásico)

Premontañas escalonadas de calizas y lutitas altamente disectadas

Los tipos de rocas que se hallan representados son calizas de tipo calcáreo, que se encuentran en discordancia con rocas intrusivas ubicadas en la parte central del área de estudio, además de lutitas de color negro y carbonatadas. Este grupo sobreyace a depósitos de areniscas y conglomerados del Jurásico Medio, en algunos casos se encuentra también en discordancia con andesitas del Cuaternario y del Plioceno.

Esta morfología se asocia a la formación de la Sierra Madre Oriental, las laderas que lo componen están densamente disectadas, con formas asimétricas, además de ser abruptas en el caso de la porción SE de Zacapoaxtla. Este grupo se localiza en la zona de transición entre la rampa y las montañas, por lo cual se le denominó como premontaña, ya que corresponde a elevaciones intermedias que rodean a las grandes elevaciones (Flores, 2002).

Elevaciones aisladas de caliza con disección débil

Se trata de montañas aisladas distribuidas al centro y norte del área de estudio, una se localiza al NW de Zacapoaxtla, con alturas locales promedio de 200 metros, con disección débil. Al este de Teziutlán se localiza otro grupo de montañas las cuales presentan formas alargadas con orientaciones de SW-NE, con alturas locales de 300 a 400 metros, al igual que las anteriores presenta una disección débil.

El tipo de roca característico de este tipo de morfología es de calizas, y en menor proporción lutitas con edades del Jurásico Superior que corresponden a la formación Pimienta.

De manera general las laderas presentan formas cóncavas y cimas convexas, laderas asimétricas, y en el caso de la localizada al este de Teziutlán presenta formas alargadas y formas cóncavas.

Laderas montañosas de areniscas y conglomerados densamente disectados

Este tipo de morfología corresponde a rocas del Jurásico Medio, representado con tipos como areniscas, conglomerados y en menor proporción depósitos de tipo continental. Se halla en forma discordante con rocas de tipo andesítico del Plioceno, además de los depósitos de rampa de ignimbritas y esquistos del Paleozoico.

Consiste en laderas fuertemente disectadas de forma cóncava y cimas agudas, en la porción que forma el contacto con la rampa de ignimbritas culmina con laderas de pendiente fuerte y desniveles de hasta 100 metros de diferencia.

C.- Montañas y elevaciones de complejos metamórficos e intrusivos

Conjuntos montañosos de esquistos densamente disectados

Este tipo de morfología corresponde al basamento de rocas paleozoicas de esquistos que se distribuye en toda la área de estudio, pero que solo aflora en porciones ubicadas al este de Hueyapan, al oeste de Tepetzintla y en mayor proporción al sur de la presa La Soledad (Figura 2.18).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.18 Conjunto de esquistos paleozoicos densamente disectados (Chillistipan), corresponden a la zona mas abrupta del municipio ubicada a en la porción centro-norte del área de estudio.

Este tipo de material debe su origen a un proceso de metamorfismo de rocas de tipo sedimentario clástico, por medio de un movimiento local que originó un metamorfismo de bajo grado, esto se debió a intrusiones de tipo granítico que afectaron a depósitos de tipo sedimentario, la composición es principalmente de clorita-moscovita (Yáñez-García, 1980).

La forma que presenta este tipo de morfología es de laderas densamente disectadas de forma cóncava de forma alargadas y cimas agudas, distribuida principalmente en las laderas que circundan a la presa La Soledad.

Elevaciones intrusivas aisladas moderadamente disectadas

El origen de este tipo de morfología se debió a materiales intrusivos que se formaron en la corteza terrestre y debido a la erosión han quedado expuestas en la superficie. Son intrusiones del Eoceno de rocas ígneas, siendo los más representativos los granitos.

Una elevación de este tipo de rocas se localiza al oeste de Teziutlán constituyendo una parte de la Sierra de Chignautla y otra al SE de Ahuacatlán.

Los afloramientos de este tipo de morfología se presentan discordantes a los depósitos y tipo de rocas adyacentes, además de tener laderas casi verticales, de forma irregular y con una pendiente alta, debido al grado de erosión que presentan las rocas circundantes.

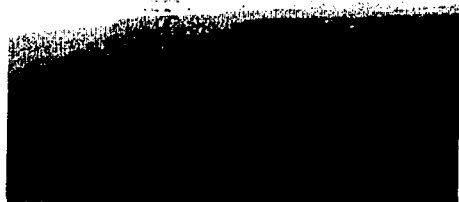
III.- Relieve exógeno erosivo

Valles erosivos

La formación de este tipo de región es debida a la acción erosiva fluvial, la cual afecta principalmente a materiales de poca consolidación que han sido afectados por algún tipo de fracturamiento local. En este caso se encuentran distribuidos de manera preferencial en la rampa de piroclastos debido a la susceptibilidad de los materiales que la componen a ser removidos por la acción fluvial expresada por medio de una intensa erosión vertical que se ha desarrollado sobre fracturamientos que se han sufrido los materiales. También se encuentra en los depósitos de material sedimentario, los cuales están afectados por fracturas locales donde se dio el desarrollo de corrientes fluviales como el río Apulco y Xucayucan.

Se caracterizan por presentar laderas abruptas, estrechas y fondos profundos, indicativo de la intensidad de la actividad erosiva, teniendo profundidades de 120 metros en Tlatlauquitepec hasta 150 metros en el río Apulco. En este tipo de morfología (así como en la rampa de piroclastos) se presentaron la mayoría de los procesos ocurridos en Octubre de 1999, debido a que la acción erosiva de los ríos ha producido un estado de inestabilidad en los materiales en conjunto con el grado de intemperismo, las formas de

las laderas y la existencia de estructuras disyuntivas que han afectado a los materiales originando un estado de inestabilidad (Figura 2.19 y 2.20).



Figuras 2.19 y 2.20 Valles erosivos. El primero al norte de la ciudad de Tlatlaquilepec, perteneciente al río Xucaycan desarrollado en materiales de calizas a partir de una fracturamiento en los materiales; el segundo al oeste de la presa La Soledad desarrollado en laderas de material piroclástico que sobreyacen a rocas sedimentarias, en donde la erosión vertical es intensa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Referencias.

- Alcántara Ayala, I. Zamorano, J. Lugo, J. Franco, O. (2002) **Estudio morfométrico y geomorfológico aplicado a procesos de ladera en la Sierra Norte de Puebla**. GEOS Unión Geofísica Mexicana, México.
- Belt, Ben (1925) **Stratigraphy of the Tampico District of Mexico**. Bull American Assoc. Petrol. Geol. Vol. 9 N° 1, pp. 136-144
- Desjardins, B (1965) **Geología de la Sierra Madre Oriental entre Pachuca y Cd. Victoria**. Informe Inédito (PEMEX)
- Dumble, E.T. (1918) **Geology of the Northern end of the Tampico Embayment Area**. Proc. Calif. Acad. Sci. Ser. 4 Vol. 8, p 113-156
- Ferriz, H (1982) **Geological and preliminary reservoir data on the Los Humeros geothermal system, Puebla, Mexico**. Proceedings Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University CA. pp 19-24
- Ferriz, H and Mahhod, G.A. (1984) **Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico**. Journal Geophysical Research 89, p 8511-8524
- Ferriz, H (1985) **Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Humeros, Puebla, México**. En: Verma, S.P. (ed) Special Volume on México Volcanic Belt, Part 1, Vol. 24, Geofísica Internacional. Pp 97-157
- Flores, P. (2002) **Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla**. Tesis-UNAM México. 119pp.
- García Romero, Arturo (1993) **Análisis geomorfológico de la distribución de los riesgos naturales en la delegación Cuajimalpa de Morelos, D.F.** Tesis-UNAM México.
- Heim, A. (1940) **The front ranges of the Sierra Madre Oriental, Mexico from C. Victoria to Tamazunchale**, Ecol. Geol. Helvetiae V. 33, p 313-362
- INEGI (1975) **Cartas geológicas F14 D85 Cuetzalán, E14 B15 Teziutlán y E14 B25 Xonacatlán**. México.
- López Ramos, E (1982) **Geología de México**. Tomo II. 3ª Edición. Instituto de Geología.
- Lugo H.,J (1989) **Diccionario Geomorfológico**. Instituto de Geografía. UNAM México
- Lugo H.,J (1991) **Elementos de Geomorfología Aplicada**. Instituto de Geografía UNAM México

Martínez-Serrano, R. (1994) **Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración.** Geofísica Internacional, Vol. 33, N° 4, p 585-605

Muir, J. M. (1936) **Geology of the Tampico Region, México.** Amer. Assoc. Petrol Geol. Tulsa, 280 p

Olivas, R. (1953) **Informe Geológico de la provincia del Macizo de Teziutlán, Puebla.** Asoc. Méx. Geólogos. Vol. 5

Viniegra-Osorio, F. (1965) **Geología del Macizo de Teziutlán y la Cuenca Cenozoica de Veracruz.** Bol. Asoc.Mex. Geólogos Petroleros, 17, N° 7-12, p 100-135

Yáñez García, C. (1979) **Geothermics explotation in the Los Humeros-Derrumbadas Area.** Geothermal Resources Council Transaction, 3, p 801-803

Yáñez G, C. (1980) **Informe geológico del proyecto geológico Los Humeros-Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz.** Informe Interno C.F.E., 59 pp.

Yáñez-García, C (1982) **Exploración de la región geotérmica de Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz.** C.F.E 98 p

Zamorano, J. (1990). **Análisis ingeniero-geomorfológico de la cuenca de México.** Tesis de doctorado. Universidad Estatal de Moscú, Lomonsov, Moscú, URSS (en ruso)

Capítulo 3. Los procesos de remoción en masa en México, Puebla y Tlatlauquitepec

3.1 Estudios realizados en México

En México, la inestabilidad de laderas es un fenómeno que se ha incrementado en la última década afectando a la población, pero también es uno de los fenómenos que poco se ha estudiado por considerarse de poca relevancia en comparación con otros procesos como las inundaciones, los sismos o erupciones volcánicas. Los procesos de remoción en masa solían presentarse principalmente en lugares inhabitados, pero el crecimiento de las poblaciones ha originado que estos fenómenos sean más notorios y que su afectación sea mayor. Entre las causas que pueden dar origen a este fenómeno se encuentran las características naturales de las laderas, pero también la actividad humana, como la agricultura o la ubicación de asentamientos humanos.

Entre los primeros estudios de procesos de remoción en masa en México, están los realizados por Ezequiel Ordóñez quien en su *Expedición científica al Popocatepetl* de 1885, realiza observaciones de tipo geomorfológico en escarpes formados y desarrollados por procesos gravitacionales en capas de acumulación volcánica, influenciadas por la acción de nieve y aguas de fusión. Posteriormente en otro estudio en 1892, realiza una serie de observaciones sobre un deslizamiento en las montañas cercanas a Huajuapán, Oaxaca. Donde se estudia el relieve, su relación con la litología y la estructura geológica, con los procesos de intemperización, escurrimientos superficial, subterráneo y la erosión vertical que pudieron dar origen al movimiento. Este trabajo es considerado como pionero en México sobre el estudio de los procesos gravitacionales ocurridos en esta zona y para el país (Lugo, 2001).

No es sino hasta los años noventa cuando se realizan estudios detallados sobre los procesos de remoción en masa, uno de los que destaca es el desarrollado por Lugo, et al (1995) realizado en el poblado de Meztitlán, Hidalgo; en el cual durante el año de 1992 ocurrió un proceso gravitacional que se desarrolló en un ladera que puso en riesgo a un ex monasterio del siglo XVI, además de casas ubicadas en el cuerpo del movimiento. Otros estudios son los de Cruz y Delgado (2000); estos se enfocan a procesos de ladera originados por sismos en la ciudad de Tijuana durante diferentes años (1967, 1976, 1995

y 1999); dichos fenómenos se presentaron de manera preferencial en carreteras construidas sobre rocas sedimentarias de baja resistencia a sismos.

La ocurrencia de los procesos de remoción en masa en el país es frecuente aunque comúnmente se había dado en lugares deshabitados. En el país los procesos de remoción en masa son generalmente desencadenados por factores como la sismicidad y la precipitación, sin embargo este último es el que ha causado los eventos con consecuencias mas notorias.

En México, el mayor desastre debido a la inestabilidad de laderas se originó en el mes de octubre de 1999, cuando varios municipios de los estados de Puebla y Veracruz se vieron afectados por cientos de procesos de remoción en masa, causando más de 250 pérdidas humanas y daños en infraestructura por varios millones de pesos. Este desastre fue originado por un aumento en la cantidad de precipitación recibida en la zona, debido a la presencia de la depresión tropical número 11 del Golfo de México que se localizó en las costas de Veracruz. Además, fue considerado como uno de los mayores desastres de los años noventa en México (Bitrán, 2000).

Entre los municipios afectados en Puebla se encuentran los localizados en la denominada Sierra Norte; la mayoría de estos municipios se localizan en laderas que ya habían sido afectadas anteriormente por este fenómeno, aunque no en una magnitud como los generados en 1999.

3.2 Influencia de la precipitación en el desarrollo de los procesos de remoción en masa

Como se había mencionado con anterioridad, los procesos de remoción en masa pueden ocurrir por dos tipos de causas: las de carácter externo, cuando se produce un incremento en las tensiones de la ladera, pero sin afectar a la resistencia de sus materiales formadores. Y las de carácter interno; que actúan de manera inversa a la de carácter externo, ya que origina una disminución en la resistencia de los materiales formadores, pero no afecta a las tensiones o esfuerzos de la ladera (Terzaghi ,1950 en Alcántara-Ayala (2000)).

Uno de los factores externos que puede ser considerado como un desencadenante es el cambio en el régimen hidrológico ocasionado por la presencia de eventos extraordinarios. Estos pueden ser periodos de lluvias intensas de corta duración, o bien precipitación durante un periodo prolongado de tiempo, pero de baja intensidad.

Diversos autores han analizado la existencia de una relación directa entre el aumento de la precipitación y los procesos de remoción en masa (Dai, 2001; Keefer, 1987; Caine, 1980; Lumb, 1975). En sus trabajos han definido que la ocurrencia de estos procesos se distribuyen principalmente en zonas cálidas y templadas, donde la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos como los ciclones, depresiones tropicales y tormentas extraordinarias son frecuentes, y en consecuencia, los cambios como el aumento en la cantidad de precipitación tienen una recurrencia de carácter anual o en distintos periodos de años (Dai, 2001; Brand, 1995).

La relación de incremento de *precipitación-procesos de remoción en masa* (Keefer, 1987) sólo es válida si se lleva un registro de la ocurrencia de estos procesos y de las normales climáticas del área en estudio. Este tipo de fenómenos y en consecuencia de los procesos de remoción en masa asociados, se presentan en lapsos que varían de horas a días (Lumb, 1975).

Según Dai (2001) la presencia de una lluvia extraordinaria no es un factor determinante en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, sólo en los casos que tienen pequeña extensión y ocurren en materiales muy susceptibles a ser removidos por el agua de precipitación. Es importante considerar que la recurrencia de los procesos debe de tener una relación directa de frecuencia-volumen para que puedan ser atribuidos a un aumento en la precipitación. Dai (2001) indica que los procesos con volumen menor a $4m^3$ son los más frecuentes y pueden ser considerados como normales en las zonas donde su ocurrencia es constante, en tanto que los de volumen mayor de $500m^3$, son poco frecuentes y suelen estar asociados además de la precipitación, a factores de tipo geológico y tectónico.

En general, la importancia de la influencia de la precipitación en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, se establece de modo que el aumento de la precipitación genera un incremento en el contenido de agua en los poros, hasta que llega a un estado

en el que la infiltración llega a ser nula, dando una condición de saturación que provoca que el peso de la ladera exceda al que le es posible mantener y se traduce en un movimiento. En diversas investigaciones (Costa, 1984; Campbell, 1975; Wilson y Wieczorek, 1995; Crozier, 1986) se han incorporado a la relación de aumento de lluvia y procesos de remoción en masa, otros factores detonantes de tipo geológico, tectónico o antropico.

El análisis de estos procesos incluye a la historia hidrometeorológica del lugar, y sus distintas estaciones climáticas, ya que la distribución de los procesos puede variar espacialmente según precipitación y las condiciones geológicas locales donde se desarrollen, además de las características de permeabilidad y grosor del suelo (Wieczorek, 1987). El aumento de la precipitación no es un factor aislado que genera procesos de remoción en masa, sino que puede funcionar como un detonante, en combinación con otros factores, como la geomorfología, el espesor del suelo, la pendiente de la ladera o la cobertura vegetal (Brand, 1995).

3.3 Procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec

En México, la denominada Sierra Norte de Puebla se caracteriza por ser una de las zonas más lluviosas del país, donde la ocurrencia de los procesos de remoción en masa es frecuente. Históricamente la región ha sido afectada por precipitaciones extraordinarias similares a las que ocurrieron en Octubre de 1999; tal es el caso de las lluvias de Septiembre de 1954 que se presentaron como consecuencia de una depresión tropical; en 1955 por el ciclón Hilda; en 1967 por el huracán Beulah; en 1974 el huracán Fifi; en 1990 las causadas por el huracán Diana; el huracán Gert en 1993 y la depresión tropical numero 11 en 1999 (Bitrán, 2000).

En Octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla ocurrieron cientos de procesos de remoción en masa en lugares que en muchos de los casos con anterioridad ya se había presentado este fenómeno. La precipitación recibida en la zona superó a las máximas históricas registradas y funcionó como un detonante para la generación de estos procesos que en conjunción con las condiciones de geológicas y la influencia del hombre, propiciaron la ocurrencia de estos fenómenos.

Debido a que en la Sierra Norte de Puebla, la precipitación funcionó como detonante para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, resultó de gran importancia el analizar que influencia tuvo este factor dentro del área de estudio con la finalidad de comprender la relación existente entre un aumento de la precipitación captada con la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec.

En el municipio de Tlatlauquitepec existen 5 estaciones meteorológicas (Cuadro 3.1), de las cuales, sólo en 4 existe una cantidad de datos suficiente, para analizar periodos de incremento en la precipitación media anual que pueden ser asociados con la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

La distribución de la precipitación en estas estaciones corresponde directamente con las diferencias altitudinales y variaciones climáticas existentes dentro del municipio, ya que en la zona centro y norte del municipio se localiza la porción donde se concentra la mayor cantidad de precipitación y que corresponde a la región donde se presentan altitudes de menos de 2000 hasta 200 msnm con climas de tipo templado húmedo con lluvias todo el año y semicálido húmedo con lluvias todo el año (INEGI, 1999). En dicha zona encuentran las estaciones meteorológicas denominadas *Presa La Soledad*, *La Pagoda* y *Tlatlauquitepec*. Por otro lado, las estaciones *Oyameles* y *Gómez Poniente* se localizan en la parte más templada, al sur del municipio donde existen altitudes superiores a los 2300 msnm, además de presentar un clima principalmente de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y humedad media (INEGI, 1999).

Cuadro 3.1. Estaciones meteorológicas del municipio de Tlatlauquitepec. Datos hasta 1990

Clave	Estación	Numero de años	Estado
21055	La Pagoda	30	Desconocido
21059	Oyameles	28	Activa
21064	Presa La Soledad	28	Activa
21098	Tlatlauquitepec	38	Desconocido
21208	Gómez Poniente	10	Activa

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En el comportamiento de las normales climáticas como la precipitación (Figura 3.1), se observa en las estaciones que los meses en que aumenta la cantidad de precipitación es de Junio a Septiembre y que a partir del mes de Octubre empieza a decrecer la cantidad

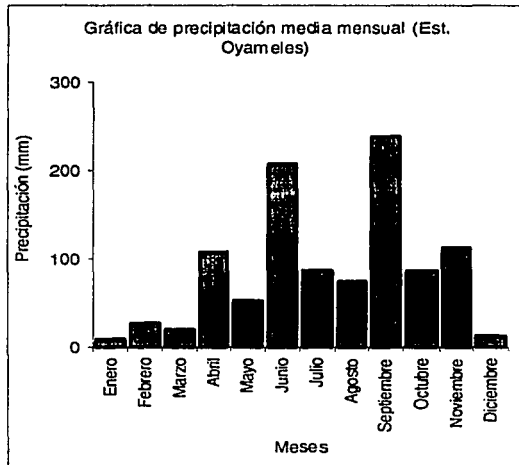
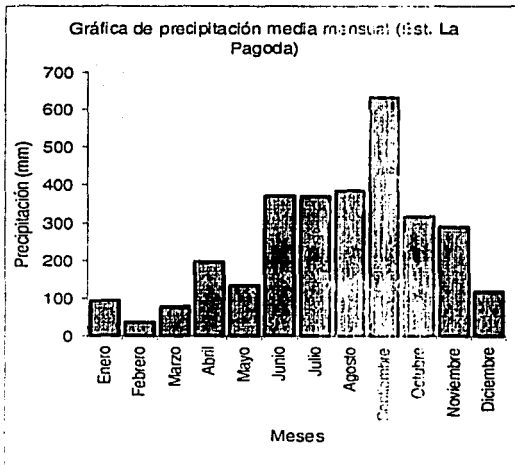
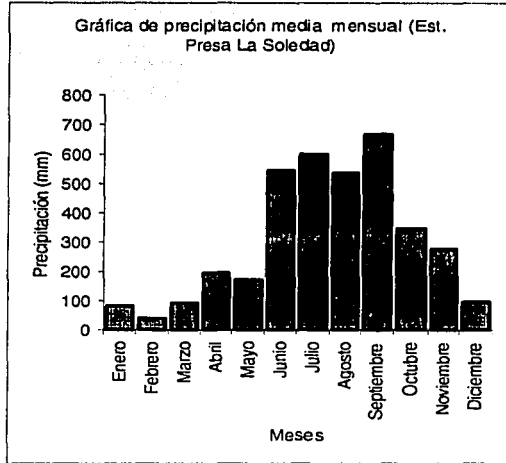
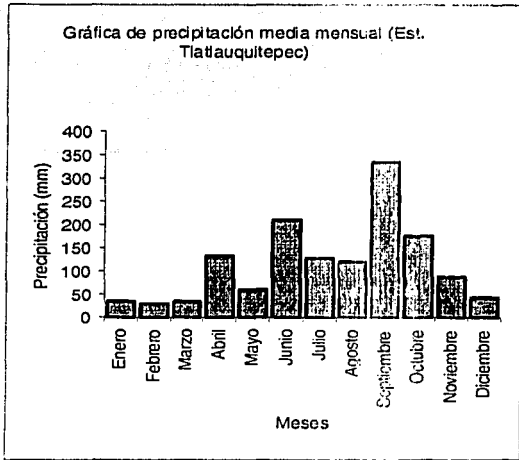


Figura 3.1. Precipitación media mensual por estación de lluvia del Municipio de Tlatlauquitepec.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

de precipitación. Las lluvias que se generaron en Octubre fueron resultado de una situación de precipitación extraordinaria que en algunos casos superó a las lluvias máximas históricas que se habían presentado en la zona.

Para entender la magnitud de la influencia que tuvo la precipitación en el municipio es necesario analizar los valores de precipitación que se presentaron durante los días del desastre; por lo cual se eligió un periodo de días que abarca del 30 de Septiembre al 13 de octubre.

Debido a que la información de las estaciones La Pagoda y Tlatlauquitepec no se encuentra disponible se recurrió a la utilización de la estación La Soledad, ubicada en la presa del mismo nombre. De esta estación se cuentan con datos de precipitación diaria para los días 30 de septiembre al 3 de octubre, los datos de los días posteriores no fueron registrados debido a que durante la noche del día 3 de Octubre ocurrieron dos deslizamientos que originaron daños en la cortina de la presa, dañándose a la estación hidrometeorológica administrada por la Comisión Federal de Electricidad. Esta estación restableció su servicio en el mes de Noviembre, existiendo un vacío de datos en los días que se generó el desastre.

Por la falta de los valores máximos de precipitación para el municipio, se recurrió a los valores de las estaciones de las localidades más cercanas y de la zona afectada. Se utilizaron los de las estaciones Zacapoaxtla, ubicada a 8.5 kilómetros al oeste y la estación Teziutlán ubicada a 10.5 kilómetros al este del municipio, de las cuales existen datos de precipitación diaria durante el periodo elegido.

En el municipio de Tlatlauquitepec, así como dentro de la Sierra Norte, durante Octubre de 1999 las máximas históricas de precipitación acumulada en 24 horas fueron superadas (Cuadro 3.2), entre los valores máximos de precipitación se encuentran Teziutlán con 335.0 mm, Zacapoaxtla con 200.0 mm, La Soledad con 311.5 mm y Tlatlauquitepec con 255.4 mm (CNA,1986). De acuerdo con los valores registrados, en Zacapoaxtla se acumuló un máximo en 24 horas de 343.0 mm y en Teziutlán un total de 360.0 mm, estos dos valores alcanzados el 5 de Octubre. Cabe señalar que en los casos de las estaciones Teziutlán, Zacapoaxtla y Tlatlauquitepec, los valores máximos anteriores se habían registrado en los años de 1954 y 1974. En este sentido Bitrán (2000)

hace referencia a que durante esos años la región fue afectada por procesos de remoción en masa debido a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos.

Cuadro 3.2 Máximas históricas en 24 horas registradas en la región y datos obtenidos en Octubre de 1999, se observa que los valores registrados entre los días 4 y 5 de Octubre superaron a las máximas alcanzadas en la región.

Máximas históricas en 24 hrs			
Estación	Precipitación (mm)	Fecha	Octubre de 1999 (mm)
Teziutlán	335.00	07/10/54	360.00
Zacapoaxtla	220.00	08/10/54	343.00
La Soledad	311.50	20/06/73	
Tlatlaquitepec	225.43	20/09/74	

En las gráficas obtenidas para los días del desastre se observa que la precipitación aumentó de manera sustancial a partir del día 3 de Octubre y la máxima se alcanzó los días 4 y 5 (Figura 3.2), fechas que coinciden con los daños originados en el municipio por procesos de remoción en masa. A partir del 6 de octubre inició un decremento de la precipitación. Además se observa que durante los días 4 y 5, la precipitación captada superó a la precipitación media del mes. En el caso de Teziutlán se alcanzó un valor de 360.0 mm, siendo se valor medio mensual de 240.0 mm; del mismo modo en Zacapoaxtla se registro un valor de 343.0 mm, en tanto que su valor medio mensual corresponde a 225.0 mm. En la grafica de precipitación acumulada se observa una inflexión sustancial y un aumento drástico de precipitación a partir del día 5, llegándose incluso a triplicar el valor de la precipitación media, además de que en esta fecha es cuando se llegó al punto máximo del desastre. A partir de la información expresada por las gráficas se muestra la alta influencia que tuvo la precipitación como factor detonante de los procesos de remoción en masa en el municipio, además de otros factores como la geología y características de los materiales.

De acuerdo con Vázquez, et al (2001), las lluvias que se presentaron en la Sierra Norte de Puebla tuvieron un periodo de retorno de 30 años, lo cual indica que en la región la ocurrencia de procesos de remoción en masa es constante y se asocia a periodos de incremento de precipitación.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

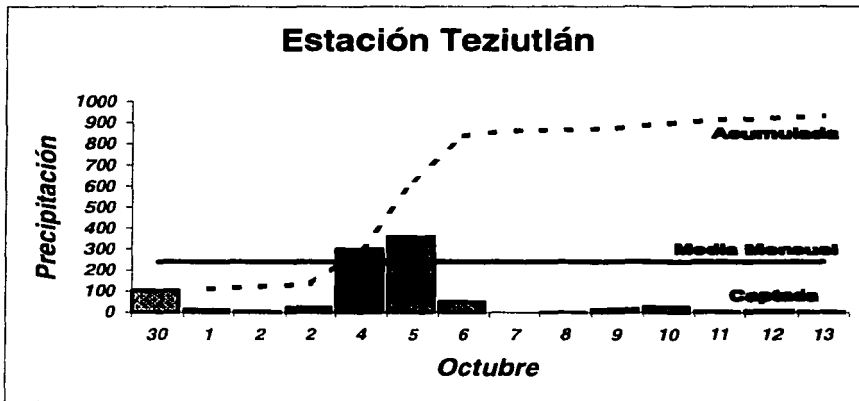
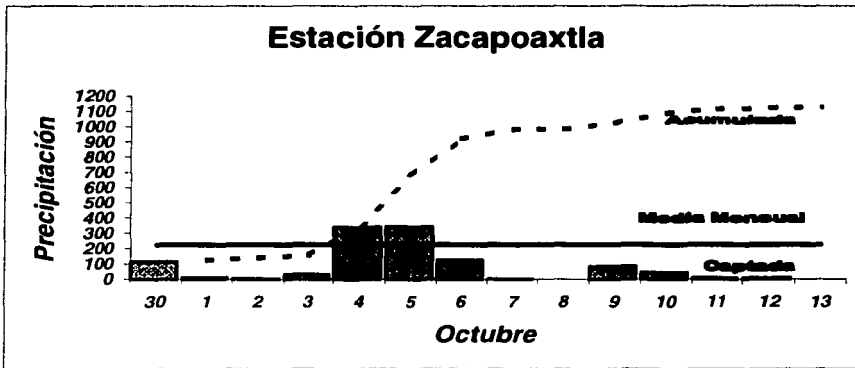


Figura 3.2 Gráficas de precipitación diaria, media mensual y acumulada diaria para las estaciones Zacapoaxtla y Teziutlán en donde se observa que la precipitación captada en los días 4 y 5 de octubre supero a la media mensual, además de que la acumulada durante esta período triplico al valor medio.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.5 Factores internos y externos que controlaron a los procesos de remoción en masa

Entre los factores internos que favorecieron la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec, esta la geología y la gran distribución de suelos de tipo arcilloso que cubren aproximadamente en el 75% del municipio. De igual manera influyó el contraste de unidades geológicas entre la porción norte y la sur, ya que este municipio se localiza en la transición de dos provincias fisiográficas diferentes en cuanto a génesis y composición litológica. Por un lado se tiene la provincia del Sistema Volcánico Transversal, y por otro la Sierra Madre Oriental.

En la región sur y centro del municipio los procesos de remoción en masa están asociados a la existencia de materiales de tipo piroclástico asociados a la actividad de la caldera de Los Húmeros, los cuales se hallan con grado alto de intemperismo, principalmente en la porción centro y norte del municipio. Por otro lado en esta porción del municipio también influyó la inclinación del terreno en donde se ubicaron los procesos, ya que la mayoría de estos se localizaron en laderas de pendiente mayor a 15 grados.

En la parte norte del municipio los procesos fueron controlados por la geología; en este caso se originaron en esquistos con un alto grado de intemperismo, los cuales al tener una saturación de los poros debida a las intensas precipitaciones ocasionaron los movimientos. También se ocurrieron algunos procesos de remoción en masa en rocas calizas que al igual que los esquistos presentaban un alto grado de intemperismo; en este caso un factor detonante fue el incremento de la precipitación y pendiente de las laderas, ya que en algunas zonas del municipio (principalmente en la carretera que va de la cabecera municipal a Mazatepec) las laderas presentan una pendiente muy próxima a los 90 grados (Figura 3.3).



Figura 3.3 Deslizamientos originados por cortes para la construcción de caminos en laderas muy inclinadas de rocas calizas, en las que los estratos se hallan orientados a favor de la pendiente e inclinaciones de más de 45°.

En cuanto a los factores externos de tipo natural que originaron a los procesos de remoción en masa se puede destacar a las lluvias extraordinarias que se generaron a partir de finales del mes de Septiembre hasta mediados de Octubre de 1999, las cuales funcionaron como un factor desencadenante.

Otro de los factores externos es el papel modificador del hombre en la superficie terrestre, en el caso del municipio de Tlatlauquitepec se ha expresado en la deforestación de las laderas de pendiente fuerte con fines agrícolas o de explotación forestal, además de la construcción de casas principalmente en la cabecera municipal. Finalmente están las obras de infraestructura como las carreteras, ya que en el se han hecho cortes para la construcción de caminos y carreteras, que en gran medida han afectado la estabilidad de las laderas.

3.6 Distribución de daños por los procesos de remoción en masa en el Municipio de Tlatlauquitepec

En Puebla la región más afectada durante Octubre de 1999 fue la Sierra Norte, en la cual 81 municipios fueron dañados. Entre los municipios que sufrieron lo mayores daños están Teziutlán, Zacapoaxtla, Totomoxtla, Tlatlauquitepec, Patla y Zapotitlán de Méndez. Durante este fenómeno se generaron cientos de procesos de remoción en masa afectando principalmente a carreteras, viviendas e infraestructura de comunicaciones en la región (Bitrán, 2000).

En el Municipio de Tlatlauquitepec los daños se distribuyeron en la parte centro y norte. Varias porciones de la carretera que va de Tlatlauquitepec a Mazatepec y de Tlatlauquitepec a Teziutlán, fueron afectadas por deslizamientos y caída de rocas aislando a varias poblaciones. Dentro de municipio las localidades más dañadas fueron la Ciudad de Tlatlauquitepec, Ahuatamimilol, Mazatepec, Yoloctzin, El Canal, Chililistipan, San José Chagchaltzin, San Agustín Chagchaltzin, La Unión, Eloxochitan, Chicuaco, Tamalayo y El Progreso (Figura 3.4).

Entre las localidades que fueron afectadas en mayor magnitud cabe destacar:

- El Canal, donde cual hubo procesos de remoción en masa que sepultaron varias casas, además de daños en la escuela de la localidad (Figura 3.5), también hubo daños en la casa de salud de la localidad.
- Calatepec, con daños en casas por agrietamientos y algunas destruidas por procesos de remoción en masa ocurridos el carretera de la localidad y destrucción de una escuela (Figura 3.6).
- Chililistipan, donde se generaron varios procesos de laderas algunos destruyendo casas y en otros casos sólo hubo fisuramientos y agriteaminetos en casas y escuelas (Figura 3.7).
- San José Chagchatzin en donde se generó un proceso de remoción en masa de grandes dimensiones que sepulto a dos casas y daños varios locales de servicios públicos, además de la destrucción de la carretera que comunica a la población de El Canal con Tlatlauquitepec (Figura 3.8 y 3.9).
- San Agustín Chagchatzin, donde hubo agrietamientos en el terreno debido a la formación de escarpes como indicadores iniciales de procesos de remoción en masa, pero que no tienen una expresión definida en el terreno, además de daños a casas y zonas de cultivos (Figura 3.10).

- En La Unión, Ahuatamimilol, Mazatepec, Tamalayo, Chicuaco Tepetzintla, El Dos y La Primavera hubo procesos de remoción en masa pero los daños fueron menores en viviendas e infraestructura y principalmente se concentraron en zonas de cultivos, caminos y espacios públicos (Figura 3.11).
- Otra zona afectada es la porción norte de la cabecera municipal donde existen casas asentadas en la márgenes del río y algunas fueron dañadas en su estructura (Figura 3.12).

La cantidad de procesos de remoción en masa ocurridos en el municipio es de varias decenas, pero algunos se concentraron en zonas donde la densidad de la población es baja o en zonas de cultivos, por lo que sólo se indican a aquellas localidades donde los daños fueron de mayor magnitud.



Figura 3.5 Casa sepultada por un proceso de ladera en la población de El Canal.



Figura 3.6 Deslizamiento que destruyó la escuela en Calatepec sobre los mismos materiales se halla construida una nueva escuela.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

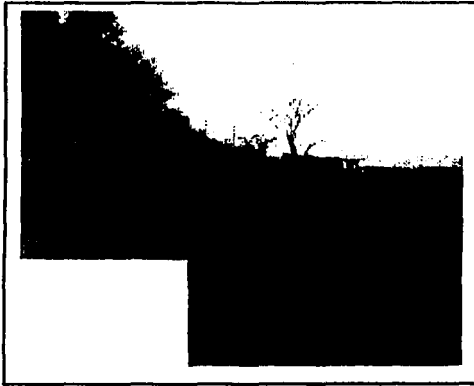


Figura 3.7 Proceso generado en Chililistipan que afecto a una escuela y casas ubicadas en el escarpe.



Figura 3.8 Proceso que destruyo dos casas, la flecha indica su ubicación que tenían, localidad de San José Chagchaltzin.



Figura 3.9 Casa sepultada por deslizamiento la persona indica el nivel que el deposito alcanzo.



Figura 3.10 Daños en casas por agrietamientos, San Agustín Chagchaltzin.



Figura 3.11 Deslizamiento generado en zona de cultivos en el poblado de La Unión, en el cual se ha dado un cambio de usos de suelo de forestal a agrícola, induciendo inestabilidad a las laderas.



Figura 3.12 Casas ubicadas al norte de la cabecera municipal estas se asientan en la margen de un río en materiales de poca consolidación.

De acuerdo con Bitrán (2000), en la Sierra Norte de Puebla los principales daños se concentraron en infraestructura de carreteras, transporte, vivienda, salud, educación y agricultura (Cuadro 3.3), los principales sectores afectados fueron los de transporte y comunicaciones, vivienda y energía.

Cuadro 3.3. Daños totales en la Sierra Norte de Puebla, cifras referidas a millones de pesos. Fuente: Bitrán (2000).

Sector	Daños Directos	Daños Indirectos	Total	Porcentaje total
Sectores sociales	505.0	15.0	520.0	22.4
Vivienda	486.1		486.1	20.9
Educación	16.4	15.0	31.4	1.3
Salud	2.5		2.5	0.1
Infraestructura y Servicios	1,540.0	1.0	1,541.0	66.3
Agua y saneamiento	84.6	1.8	86.4	3.7
Energía (CFE)	481.1		481.1	20.7
Transporte y comunicaciones	974.3		974.3	41.9
Sectores productivos	190.7	35.0	225.7	9.7
Agropecuaria, pesca y forestal	190.7	35.0	225.7	9.7
Agricultura	132.5	35.0	167.0	7.2
Ganadería	15.4		15.4	0.7
Forestal	35.0		35.0	1.5
Pesca (acuícola)	7.8		7.8	0.3
Atención a la emergencia		38.6	38.6	1.6
Total de efectos	2,235.7	89.6	2,325.3	100.0

En Tlallauquitepec uno de los sectores más dañados y de importancia tanto municipal como regional fue el sector de energía, ya que en este se localiza la presa La Soledad y la Central hidroeléctrica de Mazatepec. La primera distribuye agua la región para consumo humano y para las actividades agrícolas, en tanto que la segunda es una de las plantas generadoras de electricidad más importantes de la zona ya que ésta es distribuida a las poblaciones de Teziutlán, Zacapoaxtla, Tlallauquitepec, Mazatepec, Xocotepec de Juárez, Huauchinango, Tlacuilotepec, Pahuatlan, Zacatlan y Tétela de Ocampo.

En cuanto a los daños ocasionados en la presa (Figura 3.13 y 3.14), se tiene que el acceso a esta tanto en la porción sur como norte fue destruido por procesos de remoción en masa, durante el mes de Octubre el nivel del agua superó al indicado llegando al límite superior de la cortina, además de que algunas de las compuertas fueron bloqueadas por fragmentos de rocas, casas, árboles e desechos de construcciones que fueron arrastrados por la corriente del río Apulco. Los daños de mayor magnitud se concentraron en la Central Hidroeléctrica de Mazatepec, a tal grado que el camino que la comunica fue afectado por varios deslizamientos y el acceso se restableció después del día 15 de Octubre. De la misma forma hubo un azolve en la presa La Soledad, que se prolongó a través de los túneles que comunican y distribuyen el agua hacia la Hidroeléctrica (Figura 3.15), dañada por lodo con fragmentos de rocas que obstruyeron la salida del agua. También hubo daños en los generadores de electricidad, algunos afectados por los escombros principalmente árboles que se hallaban en la corriente que pasa por las turbinas de generación. Otros daños se concentraron en el proceso de distribución, como las líneas de conducción que fueron rotas, transformadores, postes y medidores (Bitrán, 2000).



Figura 3.13 Niveles del agua alcanzados en Octubre de 1999 en la presa La Soledad.



Figura 3.14 Deslizamiento que daño el acceso sur a la presa La Soledad.



Figura 3.15 Sitios afectados en la hidroeléctrica de Mazatepec durante Octubre de 1999.

El valor de los daños y de las obras de reconstrucción se estimó en 481.1 millones de pesos (Cuadro 3.4). La inversión principal se dirigió a la reconstrucción del camino de acceso a la presa y la hidroeléctrica, este proviene de la cabecera municipal, actualmente es de tipo de terracería y es afectado constantemente por procesos de remoción en masa, lo cual ha dificultado su reconstrucción (Figura 3.16).

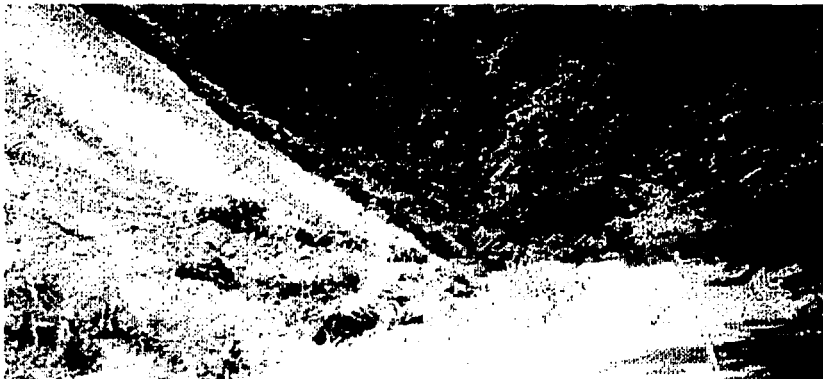


Figura 3.16 Tramo de la carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec, continuamente afectada por procesos de remoción en masa, actualmente en reparación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 3.4. Costo de los daños en el sector eléctrico en el municipio de Tlaltlauquitepec. Fuente: Bltrán (2000).

Concepto	Costo (millones de pesos)
Central de Generación Mazatepec	447.9
Equipo de la propia planta	68.7
Desazolve presa La Soledad	87.4
Restablecimiento del camino de acceso	291.8
Sistema de distribución	33.2
Total	481.1

En los sistemas de distribución, la reconstrucción de los daños fue en líneas de conducción (42 Km), 79 transformadores, 408 postes, 12,114 medidores y 1,205 acometidas. Desde la ocurrencia de los primeros fenómenos hasta la reconstrucción de los daños y reestablecimiento de los servicios en el municipio transcurrieron más de 20 días, es decir hasta finales del mes de Octubre se restablecieron todos los servicios.

Otro de los sectores afectados en el municipio fue el forestal, ya que durante el fenómeno hidrometeorológico una gran cantidad de árboles fueron derribados, despuntados, deshojados y arrancados de sus lugares de crecimiento y arrastrados por las corrientes de agua que se generaron y por los procesos de remoción en masa que ocurrieron en la región. Los daños en este sector se valoraron en 35 millones de pesos de los cuales 28 se destinaron a la recuperación de la cubierta forestal explotable. Entre las localidades mas dañadas se hallan Mazatepec, Tenango, Nexapa y Necaxa.

La información expresada en este apartado cumple la finalidad de mostrar las condiciones que presentaba el municipio durante Octubre de 1999, además de conocer cuales son los factores desencadenantes que influyeron en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, también se esbozo cual fue la distribución de los daños dentro del municipio y cuales fueron los sectores mas dañados. Los resultados obtenidos fueron utilizados como preámbulo para el análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa del municipio de Tlaltlauquitepec, para posteriormente cotejar la información obtenida de la manipulación del modelo con la recopilada en campo.

Referencias:

- Alcántara Ayala, I. (2000) **Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología**. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. N° 41. UNAM México, pp.9-25.
- Brand, E.W., (1995) **Keynote paper: slope instability in tropical areas**. In: Bell, D.H. (Ed). Landslides, Balkema, Rotterdam. (pp 2031-2051)
- Bitrán, D. (2000). **Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana, durante 1999**. Cuadernos de investigación, No 50. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 194 p.
- Caine, N., (1980) **The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows**. Geografiska Annaler 62A, p 23-27
- Campbell, R.H. (1975) **Soil Slips, Debris flows and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, southern California.**, US Geological Survey Professional Paper 851. US Geological Survey, Washington DC. 51 p
- Comisión Nacional de Aguas CNA (1986) Valores medios hidrometeorológicos (SuperCalc4). Disco Compacto
- Costa, J.E. (1984) **Physical geomorphology of debris flow** In: Costa, J.E., Fleisher, P.J. (eds). Developments and applications of Geomorphology. Springer, Berlin, pp. 268-317
- Crozier, M.J., (1986) **Landslides: Causes, Conséquences and Enviroment**. Croom Helm, London 252 p
- Cruz, M. y Delgado, L. (2000) **Los deslizamientos de la carretera Tijuana-Ensenada, Baja California**. GEOS, Unión Geofísica Mexicana.
- Dai, F.C. (2001) **Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides**. Engineering Geology (59). P 253-266
- INEGI (1999) **Cuadernillo Estadístico Municipal. Tlatlaquitepec, Estado de Puebla, México**
- Keefer, D.K. , Wilson (1987) **Real-time landslide warning during heavy rainfall**. Science 238, p 921-925
- Lugo H., J. et al (1995) **Deslizamiento de tierras en Meztlán, Hidalgo. Ciencia y desarrollo**. Marzo-Abril 1995. CONACYT, Vol. XXI, N°121, pp.53-60.
- Lugo H., J. (2001) **Los conceptos geomorfológicos en la obra de Ezequiel Ordóñez (1867-1950)**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 18 N° 1, 2001, pp.89-102
- Lumb, P., (1975) **Slope failures in Hong Kong**. Quarterly Journal of Engineering Geology 8, p 31-65
- Vazquez, M., Lugo, J. and Matias, L. (2001). **Heavy rainfall effects in Mexico during early October 1999**. E. Grunfest and J. Handmer (eds). Coping with Flash Floods, p 189-299
- Wieczorek, G.F., (1987) **Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California**. In: Costa, J.E., Wieczorek, G.F. (eds). Debris

Flows/Avalanches : Process, Recognition and Mitigation. Reviews and Engineering Geology, vol. VII. Geological Society of America, Boulder, CO; pp 93-104

Wilson, R.C., Wieczorek, G.F., (1995) **Rainfall threshold for the initiation of debris flows at La Honda, California.** Environmental and Engineering Geoscience 1 (1), p 11-27

Capítulo 4. Índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en Tlatlauquitepec

4.1 Conceptualización del índice de susceptibilidad

Fenómenos como los procesos de remoción en masa han sido estudiados con diversas metodologías. Algunas se basan en el uso de modelos aplicados a determinar la susceptibilidad del terreno a estos procesos. Sin embargo, en las metodologías que utilizan modelos, se deben de considerar que existen factores que intervienen en la inestabilidad de laderas que no se pueden representar en un sistema digital.

Un modelo, según Harvey (1967), es una forma sintética, abstracta y temporal de representar una característica del terreno, con la finalidad de tener una aproximación a las formas reales del relieve. En el análisis de la inestabilidad de laderas, el uso de estos modelos nos permite entender la dinámica de la zona de estudio para realizar zonificaciones de las áreas susceptibles a estos tipos de fenómenos.

Entre las distintas formas de estudiar los procesos de remoción en masa se encuentra el desarrollo de postulados teóricos para la comprensión del fenómeno, la identificación y caracterización de sus partes, realización de inventarios, uso de modelos para calcular la susceptibilidad del terreno y análisis de riesgos. Actualmente se ha incorporado la utilización de Sistemas de Información Geográfica con la finalidad de realizar estudios de carácter más preciso e integrar elementos que antes no habían sido utilizados.

Una de las finalidades de integrar el uso de Sistemas de Información Geográfica en los procedimientos del cálculo de mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa ha sido el modelado de escenarios temporales en los que la probabilidad de ocurrencia de procesos es alta (Brabb, 1984).

Una de las primeras metodologías expuestas para el cálculo de índices de susceptibilidad integrando sistemas de información geográfica fue desarrollada en 1970 (Clerici, 2002 y Carrarra, 1995) basada en un modelo conceptual consistente en:

- 1.- Mapeo de procesos de remoción en masa.
- 2.- Mapeo de factores naturales que tengan una relación directa o indirecta con la inestabilidad de laderas.
- 3.- Establecimiento de relaciones existentes entre los factores identificados y la inestabilidad de laderas.
- 4.- Clasificación de áreas del terreno en clases, según su diferente susceptibilidad a procesos de remoción en masa, con base en la relación establecida.

Este modelo metodológico se basa en el supuesto de que las condiciones que se presentarán en el futuro en la ladera pueden ser similares a las que se han presentado en el pasado (Carrara, 1995). En otros trabajos, la predicción de áreas de susceptibilidad ha tenido la finalidad de modelar condiciones pasadas en que hubo ocurrencia de procesos de remoción en masa para regionalizar áreas en la actualidad.

Entre los parámetros que han sido utilizados en la determinación de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa están:

- Identificación por medio de fotografías aéreas
- Registros de normales climáticas
- Identificación de formas originadas
- Geometría de las laderas
- Características topográficas
- Condiciones geológicas, edafológicas y geotécnicas

Los métodos utilizados comúnmente se dividen en dos tipos: heurístico (índices) y métodos estadísticos. El primero de ellos se basa en la jerarquización de factores de inestabilidad, de acuerdo con la importancia en las causas del movimiento y la asignación de un valor dentro del análisis total de los factores involucrados. En cambio, los métodos estadísticos asignan un valor individual a cada factor de acuerdo con la relación existente entre estos, y a su vez, con las condiciones de inestabilidad de la ladera por medio de un análisis de orden estadístico.

El método heurístico es poco utilizado ya que es de carácter subjetivo, además de que los valores son asignados *a priori* por el autor. En cambio, los métodos estadísticos se basan en técnicas, entre las cuales están los análisis multivariados, regresiones lineales y logísticas, además de análisis discriminatorios que asignan los valores de acuerdo con los resultados obtenidos según el método estadístico utilizado.

Entre los métodos más utilizados actualmente están los análisis multivariados y condicionales, en algunos casos combinado con resultados obtenidos u operados por medio de Sistemas de Información Geográfica (Clerici, 2002; Lee-Saro, 2002).

Existen también metodologías que se basan en la manipulación de los datos por medio de Sistemas de Información Geográfica por medio de Modelos Digitales de Elevación (Dai, 2002), para determinar la susceptibilidad del terreno a procesos de remoción en masa. En estos casos es necesario contar con uno o varios software especializados.

El uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) se ha enfocado al uso de modelos multivariados para calcular la susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Sidle, 1985; Dietrich, 1986; Carrara, 1991; Okimura, 1985; Montgomery and Dietrich, 1994; Miller, 1995; Gritzner, 2001), así como características topográficas del terreno, como la geometría, la pendiente, dirección de flujo, etc.

En los siguientes apartados se expone la metodología utilizada para el cálculo del índice de susceptibilidad a procesos de remoción en masa para la zona de Tlatlauquitepec.

4.2 Uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE)

4.2.1 Conceptualización de modelos

De acuerdo con Harvey (1967) la finalidad de un modelo es la representación temporal de algunas características del terreno, para ser estudiadas y poder obtener una aproximación de la realidad. En Geomorfología los primeros postulados del uso de modelos fueron expuestos por Chorley (1967), según este autor, los modelos pueden clasificarse de manera general como descriptivos y normativos.

Los modelos descriptivos son de carácter estático, se enfocan a un equilibrio estructural de formas o cambios dinámicos en los procesos. Estos modelos se basan en la ordenación empírica de información en función de datos, taxonomía o diseños experimentales. Por el contrario, los modelos normativos involucran el uso de situaciones similares a la estudiada para representar escenarios históricos en el mismo espacio, con la finalidad de tener una connotación de carácter predictivo.

También los modelos se pueden clasificar según su materia de estudio como físicos o experimentales, simbólicos, conceptuales o mentales.

Chorley (1967) realizó una clasificación de los modelos utilizados en Geomorfología en:

Analogías naturales, en las cuales para conocer las características que puede llegar a tener el terreno se recurre al análisis y modelado de las características históricas que se han presentado, así, por medio de este modelo se pueden inferir las condiciones futuras en este espacio.

Modelos físicos, los cuales a su vez se clasifican en:

- Modelos materiales. En estos se pretende representar a escala las condiciones de la realidad, con los mismos materiales y características, para conocer y determinar su dinámica.
- Modelos matemáticos. En los cuales se usan abstracciones del terreno donde los objetos son remplazados por expresiones matemáticas por medio de variables, parámetros y constantes, esto concentrado en un sistema idealizado, donde los valores presentan una relación para describir la dinámica del terreno.

Sistemas generales. Se basan en el estudio de las formas del terreno con base en la suposición de que más de un proceso erosivo ha afectado al relieve, esto deducido de la observación general de las condiciones del terreno o de la intuición que le da la experiencia del investigador. Dentro de este sistema existe una relación recíproca entre cada elemento que es posible de estudiar por separado (Von Bertalanffy, 1978).

Para el caso de este trabajo se utilizó un modelo matemático de tipo predictivo, con la finalidad de representar la dinámica actual o posible de existir en el relieve bajo ciertas condiciones imperantes, para lo cual fue necesario, primero la definición del modelo y los resultados a obtenerse, para posteriormente hacer las simulaciones de los posibles escenarios que resultan de la manipulación de los elementos del modelo.

4.2.2 Uso de MDE en el análisis de procesos de remoción en masa

En el estudio de los procesos de remoción en masa mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, los modelos digitales de elevación (MDE) son una herramienta básica para los análisis de susceptibilidad.

Los MDE son una representación digital de los atributos del terreno, su configuración y elevación en la superficie terrestre (Moore, 1993). Entre las utilidades que presenta un MDE en el análisis de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, está la obtención de mapas temáticos y análisis estadísticos que se obtienen a partir de la información contenida en éste, los más comunes son: mapas de pendientes, declive, modelos sombreados del terreno, convexidad del terreno, rugosidad del terreno, etc. (Iwahashi, 2001).

La información que se obtiene a partir del MDE está en función de las características y procesos de elaboración del mismo, la posibilidad de uso de estos modelos y su aplicación en un programa específico dependerá de su resolución, la cual se puede reducir o aumentar, dependiendo de la calidad de la información y detalle que se espere obtener (Bjorke, 2002).

La calidad del MDE esta en función de sus métodos de elaboración como es: La interpolación de curvas de nivel o puntos del terreno con coordenadas Z, tratamiento de imágenes de radar, etc. (Bjorke, 2002).

Del cálculo que se obtenga del MDE se puede proceder a la obtención de índices de susceptibilidad, pero estos resultados pueden ser subjetivos, por lo que es necesario

incorporar características físicas del terreno para completar el análisis; estas consisten, según el objetivo de estudio, en características de geología, geomorfología, suelos (Iwahashi, 2001), geotecnia (Dai, 2002), vegetación y precipitación. Además de inventarios o registros continuos sobre los tipos de procesos y la dinámica que presenta la zona de estudio.

4.3 Información digital utilizada

Para el análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, es necesaria la utilización de un programa especializado en este tipo de cálculos. Para el caso de este trabajo se requirió la utilización de un software que se adecuara a la escala del municipio y en el que se pudieran introducir datos de tipo geográfico. A partir de estos requisitos se procedió a la realización pruebas con dos softwares específicos para el análisis de la susceptibilidad del terreno a procesos de ladera, se trabajo primero en el software SINMAP (Stability Index Mapping), diseñado por la Universidad Estatal de Utah y desarrollado como una extensión de la plataforma del Sistema de Información Geográfica Arc View, desarrollado por el Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI) y como segunda alternativa se tuvo al denominado SHALSTAB desarrollado por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de California, también desarrollado como una extensión de Arc View.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas se observo que el SHALSTAB muestra resultados posibles de analizar para regiones que requieren un alto grado de detalle, además de que el MDE requerido debe de ser a una resolución menor de 20 metros, lo cual es poco posible de obtener debido a la escala del municipio, por otro lado se requiere introducir información de proceso de ladera de tipo areal, la cual no es posible de introducir debido a que la existente es de tipo puntual. Por el contrario el SINMAP presento la ventaja de mostrar datos a una escala adecuada para el municipio y la posibilidad de introducir información de procesos de ladera de tipo puntual. La resolución de MDE requerido en el SINMAP puede variar de 20 a 100 metros de resolución.

De los resultados que se obtuvieron de los dos softwares se optó por la utilización del SINMAP, debido a su aplicabilidad en la zona de estudio y facilidad de interpretación de la información resultante. Cabe destacar este software ya ha sido utilizado en estudios

realizados en la Sierra Norte de Puebla para determinar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, entre los que destacan están: Flores (2002) quien realizó un estudio de riesgos a procesos de ladera en el municipio de Teziutlán y Borja (2003) quien elaboró un análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en el municipio de Zacapoaxtla. A partir de la información obtenida de los estudios existentes se derivó la necesidad y la confiabilidad de la utilización del programa elegido, para el caso del municipio de Tlaltlauquitepec fue SINMAP.

El SINMAP es una herramienta utilizada para el proceso de información digital del terreno y la obtención de mapas de índices de estabilidad, basados en información de tipo geográfico obtenidos del MDE. La base teórica para el cálculo de estos índices es el modelo infinito de estabilidad de laderas, obtenido a partir de las características topográficas del terreno y la información obtenida del uso de modelos hidrológicos. Además de información de tipo geográfico (suelos, vegetación o geología) con la finalidad de que los parámetros usados se ajusten lo más próximo a la realidad (Pack, 2001).

Este programa permite la zonificación de las áreas potenciales a procesos de remoción en masa que presentan un alto control de detonantes como son suelos saturados y de poca profundidad (< 4m), los resultados que se obtengan estarán en función de la resolución del MDE, además de la escala utilizada la cual de preferencia debe de ser de 1: 20 000 a 1:15 000 (Pack, 2001).

Para la obtención del MDE se siguió la siguiente metodología:

- Digitalización de curvas de nivel a partir de mapas topográficos 1:50 000
- Definición del tamaño de píxel a 50 x 50 metros de manera previa a la interpolación de las curvas de nivel
- Interpolación de curvas de nivel por medio del Sistema de Información Geográfica ILWIS
- Obtención del MDE compuesto de 440 columnas por 920 filas

A partir del MDE se obtuvo un modelo sombreado del terreno, el cual presenta una perspectiva de la distribución y configuración del terreno (Figura 4.1).

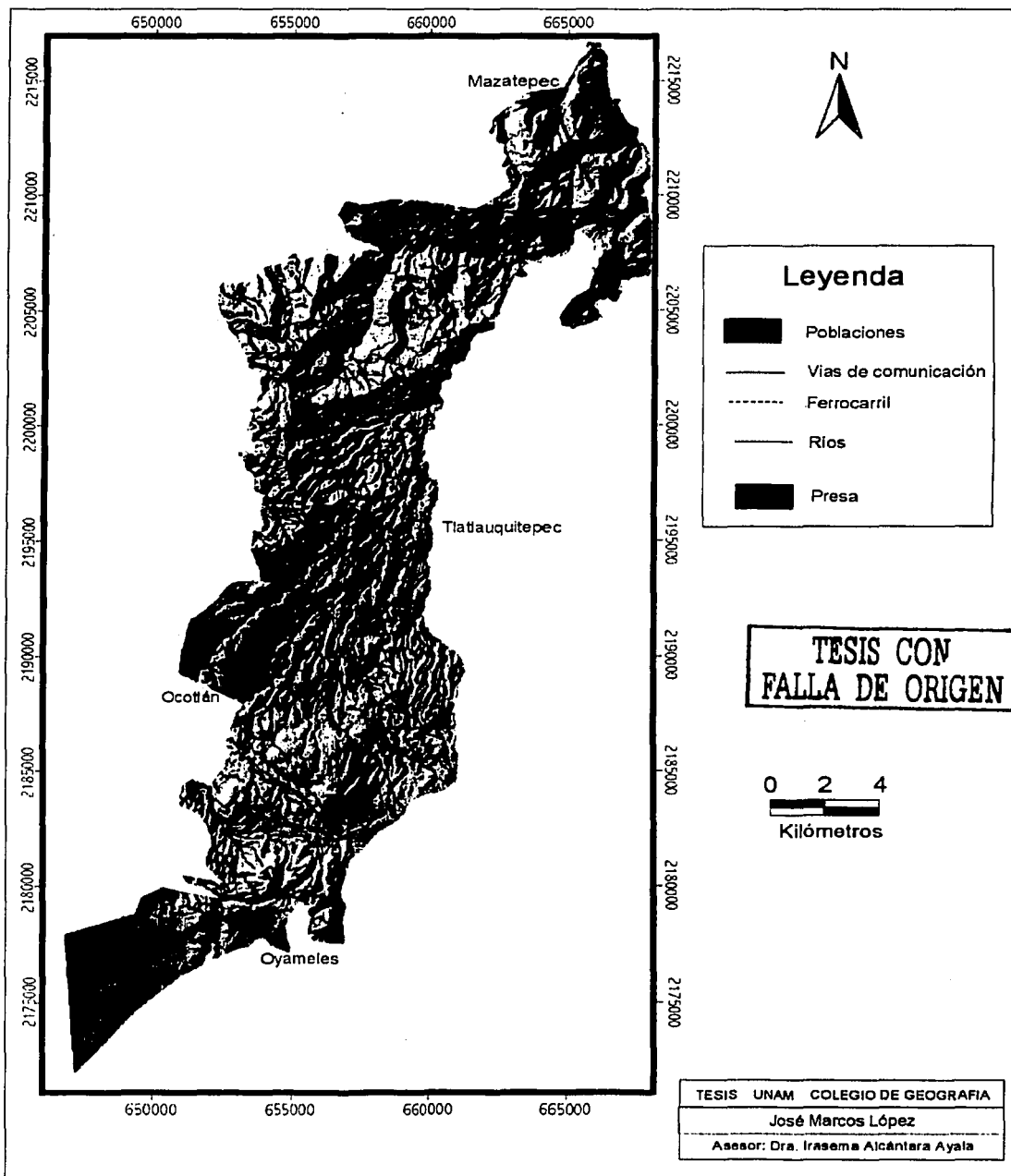


Figura 4.1 Modelo sombreado del terreno del municipio de Tlatlauquitepec

El MDE es uno de los elementos principales que se manipula en el SINMAP, ya que a partir de este se obtienen mapas temáticos, como son los de pendientes, dirección de flujo y área específica de la cuenca.

4.4 Fundamentos teóricos del SINMAP.

El fundamento base con el cual el SINMAP calcula el índice de estabilidad es el modelo infinito de estabilidad de laderas (Skempton, 1957; Hammond, 1992; Montgomery and Dietrich, 1994). El modelo infinito de estabilidad de laderas fue desarrollado por Skempton (1957) con la finalidad de analizar la estabilidad de laderas en arcillas en la ciudad de Londres. Debido a la simplicidad de su estructura ha sido ocupado en diversas investigaciones (Carson, 1971; Chandler, 1982; Bromhead, 1986). Este modelo se basa en una ecuación de tipo lineal considerando un movimiento paralelo a una superficie y una ladera que se extiende infinitamente (Figura 4.2).

En la utilización de este modelo se asumen las características de la ladera en dos dimensiones, entendiéndose que las condiciones de la ladera son homogéneas. Los movimientos que se analizan en el modelo infinito de estabilidad de laderas, involucran masas que en longitud son mayores que la profundidad del mismo, por lo que el movimiento es planar y longitud infinita (Alcántara-Ayala, 1999).

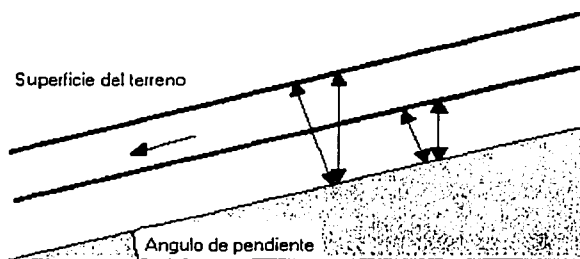


Figura 4.2 Esquema de Modelo Infinito de Laderas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La aplicación de este modelo desde la perspectiva hidrológica asume que el peso que presenta el suelo es perpendicular a la ladera y no vertical, este último es medido en valores de metros.

El modelo infinito de estabilidad de laderas se expresa por medio de la ecuación siguiente:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_s g (D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_s g \sin \theta \cos \theta}$$

Dónde:

FS es el valor de estabilidad de la ladera; C_r es la cohesión de original del material; C_s es la cohesión del suelo; θ es el valor de la pendiente; ρ_s es la densidad del suelo en estado húmedo; ρ_w es la densidad del agua; g es la constante de gravedad; D es la profundidad del suelo; D_w es la profundidad del manto freático en la capa de suelo y ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

La ecuación sin embargo puede ser simplificada de modo que:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (A)$$

Donde la humedad relativa es

$$w = D_w / D = h_w / h$$

La cohesión según las dimensiones relativas perpendiculares del espesor del suelo es:

$$C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g)$$

Y la relación de densidad entre el agua y el suelo es

$$r = \rho_w / \rho_s$$

El parámetro definido como humedad relativa resulta de la relación:

$$w = \text{Min} \left(\frac{R}{T \sin \theta}, 1 \right) \quad (B)$$

Donde R/T es la capacidad de recarga de agua en el suelo con relación al movimiento lateral de agua sobre el mismo.

a = es el área específica de la cuenca (sitios donde se capta la mayor cantidad de agua de lluvia), medida en m²/m.

Para determinar los índices de estabilidad (IE) en el SINMAP se basa en el cálculo del Factor de Seguridad (FS), cuya fórmula se puede simplificar en la siguiente expresión, esta resulta de la combinación de las expresiones denominadas como (A) y (B), de donde

$$FS = \frac{C + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) \right] r \tan \phi}{\sin \theta}$$

a = área específica de la cuenca

φ = ángulo de la pendiente

C = cohesión del suelo

Tan φ = ángulo de fricción interna del suelo

r = densidad del radio del agua en el suelo

R/T = es la capacidad de recarga de agua en el suelo con relación al movimiento lateral del agua en el mismo

En este caso, el valor de r se maneja como una constante de 0.5, R/T=x y tanφ=t, ya que su distribución es uniforme dentro de la ladera.

Cuando los valores C y T son bajos y contrariamente X es mayor, se asume que en este posible escenario el Factor de Seguridad es 1 o sea es cercano a la estabilidad, lo cual se expresa por medio de la ecuación:

$$IE = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[1 - \min \left(x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1 \right) \right] r t_1}{\sin \theta}$$

En áreas donde el valor del Factor de Seguridad es menor de 1, la probabilidad de ocurrencia de un proceso de remoción en masa es cercana. Esta probabilidad se da según la variación en el incremento de la variable C, tan φ y T. Este valor tiende a ser un elemento temporal ya que el valor de R es tomado según el valor de la humedad en una variación de su distribución espacio-temporal.

Para estas regiones donde el Factor de Seguridad es $FS_{\min} < 1$, el cálculo de FS es definido como IE = Probabilidad ($FS > 1$).

En cuanto a la distribución de las variables C, X y t, el escenario óptimo se tiene cuando las variables presentan el valor: $C = C_2$, $X = X_1$ y $t = t_2$, resultando la ecuación de FS de modo que:

$$FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \theta [1 - \min \left(x_1 \frac{n}{\sin \theta}, 1 \right)] t_2}{\sin \theta}$$

Para el caso en que el valor del Factor de Seguridad es $FS_{\max} < 1$, el cálculo es definido como IE = Probabilidad ($FS > 1$) = 0.

Las clases se basan en el valor de IE cuando, $IE > 1$ ($FS_{\min} > 1$), $0 < IE < 1$ y $IE = 0$ ($FS_{\max} < 1$).

De los valores que se obtienen del cálculo del Factor de Seguridad se asignan los valores del índice de estabilidad (IE).

El índice de estabilidad es definido como la probabilidad de localizar una zona estable o inestable, asumiendo que los parámetros analizados se distribuyen uniformemente en el área de estudio (Pack, 2001).

Los valores del IE obtenidos se hallan en función de los valores 0 (muy inestable) y 1 (poco inestable). Estos valores son interpretables a partir del supuesto de que cuando una ladera presenta un valor cercano a 0 tiene una condición de inestabilidad en la que están interactuando elementos como la inclinación de la ladera, la litología, el estado de los materiales y la capacidad de la ladera a soportar su propio peso en un estado de saturación. Por el contrario cuando se expresan valores de 1 a mayores, la ladera presenta una condición de estabilidad aparente donde los elementos mencionados encuentran un estado hipotético de equilibrio entre las tensiones externas a la superficie de la ladera con la que presenta esta misma de manera natural.

En el SINMAP se realiza un ordenamiento de clases en función del índice de estabilidad, tomando como referencia los valores 1.5, 1.25, 1.0, 0.5 y 0.0. Debido a que la

interpretación de dichos valores es subjetiva, se requiere hacer una definición de clases para que los valores expresados en función de la estabilidad sean interpretables.

En el caso de este trabajo las clases definidas por SINMAP fueron ajustadas a 3 categorías según su condición de estabilidad y que dan una idea clara de la dinámica que presenta el espacio analizado esto en función de las condiciones que presenta la ladera según los parámetros de tipo geográfico que han sido introducidos (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1 Clases definidas a partir de la información expresada en el SINMAP.

<i>Condición en SINMAP</i>	<i>N° de Clase</i>	<i>Estado de predicción</i>	<i>Rango del parámetro</i>	<i>Condición de estabilidad</i>	<i>Categoría asignada</i>
IE > 1.5	1	Zona estable	Rango donde no hay inestabilidad	Estable	Estable
1.5 > IE > 1.25	2	Zona moderadamente estable	Rango donde no hay inestabilidad		Casi-estable
1.25 > IE > 1.0	3	Zona casi-estable	Rango donde no hay inestabilidad	Inestable	Inestable
1.0 > IE > 0.5	4	Limite inferior de inestabilidad	Punto critico medio de inestabilidad		
0.5 > IE > 0.0	5	Limite superior de inestabilidad	Punto medio donde falta estabilidad		
0.0 > IE	6	Zona de mayor inestabilidad	Rango donde no hay estabilidad		

4.5 Cálculo del índice de susceptibilidad para el municipio de Tlatlauquitepec

Para el cálculo de los índices de susceptibilidad por procesos de remoción en masa por medio del SINMAP, es necesario seguir una serie de pasos para el procesamiento de la información requerida para los índices. Dicha secuencia se expone a continuación:

4.5.1 Correcciones al MDE por relleno de espacios

Este proceso se realiza posteriormente a la elaboración del MDE, es conocido como *pit filling correction*, y se refiere a las correcciones necesarias por errores que presenta el MDE durante su elaboración (Figura 4.3). En este pueden haber espacios definidos como valores reales, de tipo subjetivo ya que no existen en el terreno y se derivan a irregularidades en la elaboración del MDE. El procedimiento consiste en rellenar estos

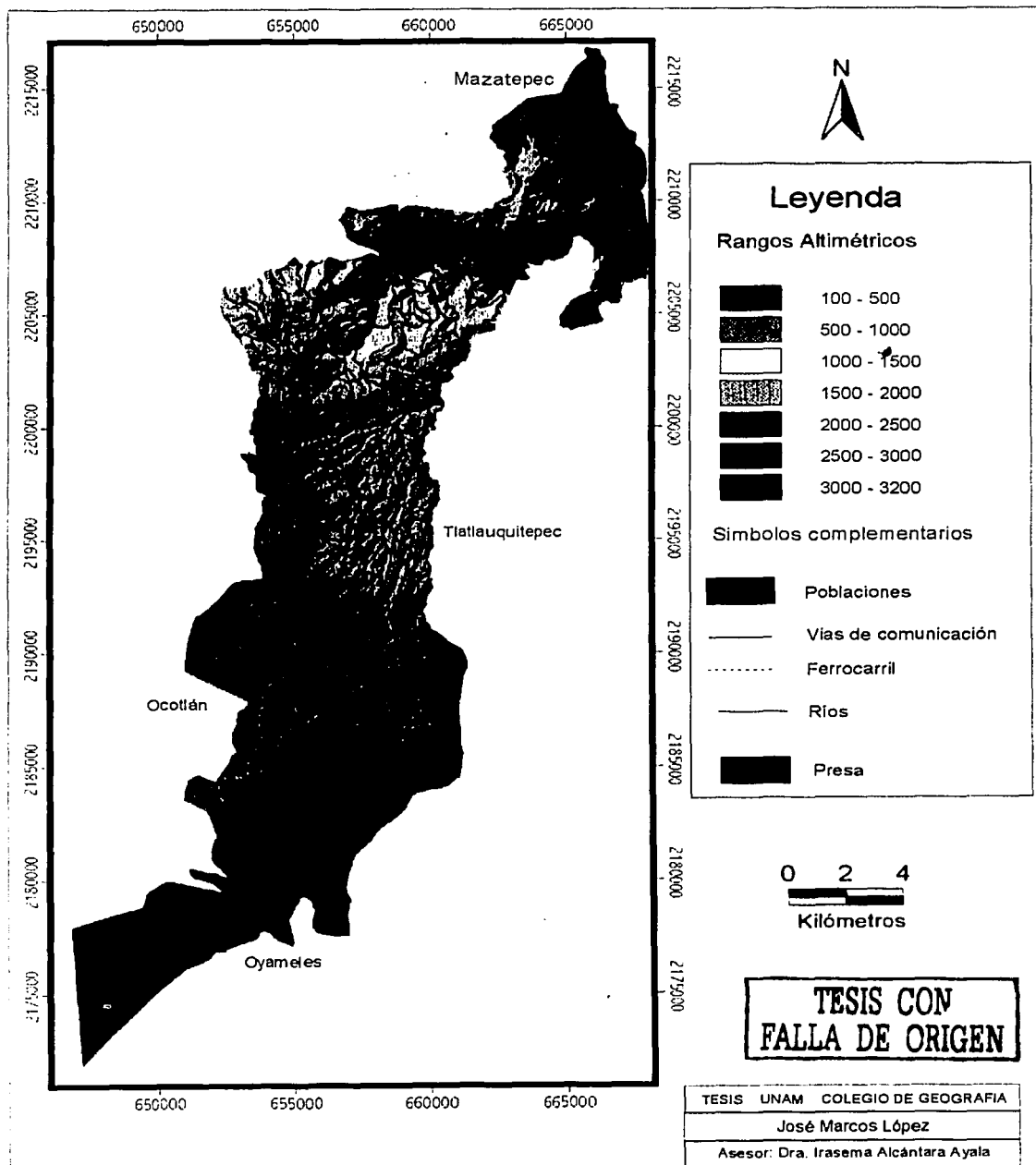


Figura 4.3 Modelo Digital de Elevación del municipio de Tlatlauquitepec

espacios con los valores cercanos o próximos, además de que se toma el valor según las celdas mas próximas en el perímetro del valor erróneo, y se le asigna un valor de elevación de tipo real (Jenson, 1988).

A partir de las correcciones al MDE se procedió la elaboración del mapa de pendientes, que es uno de los mapas morfométricos más utilizados; para el caso de este trabajo se decidió insertar el análisis de este mapa en este apartado ya que es de gran utilidad para la comprensión de la dinámica del relieve.

El mapa resulta de la transformación de las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente, sin embargo, hay que tener en cuenta que los valores representados son un promedio de una superficie inclinada proyectada en plano, de determinada anchura o longitud. El establecimiento de los rangos a utilizar está en función de la escala utilizada, la equidistancia existente entre curvas, las condiciones fisiográficas de la región y el propósito del trabajo. Los rangos se pueden establecer por medio de un cálculo a través de fórmulas aritméticas elementales que se expresan en valores de m/km, por ciento o en grados, este último es uno de los mas utilizados por su simplicidad de comprensión (Lugo, 1991).

El cálculo de la pendiente se elabora por medio de la siguiente formula:

Pendiente en grados: $\text{tang}^{-1} (DV / DH)$

Donde:

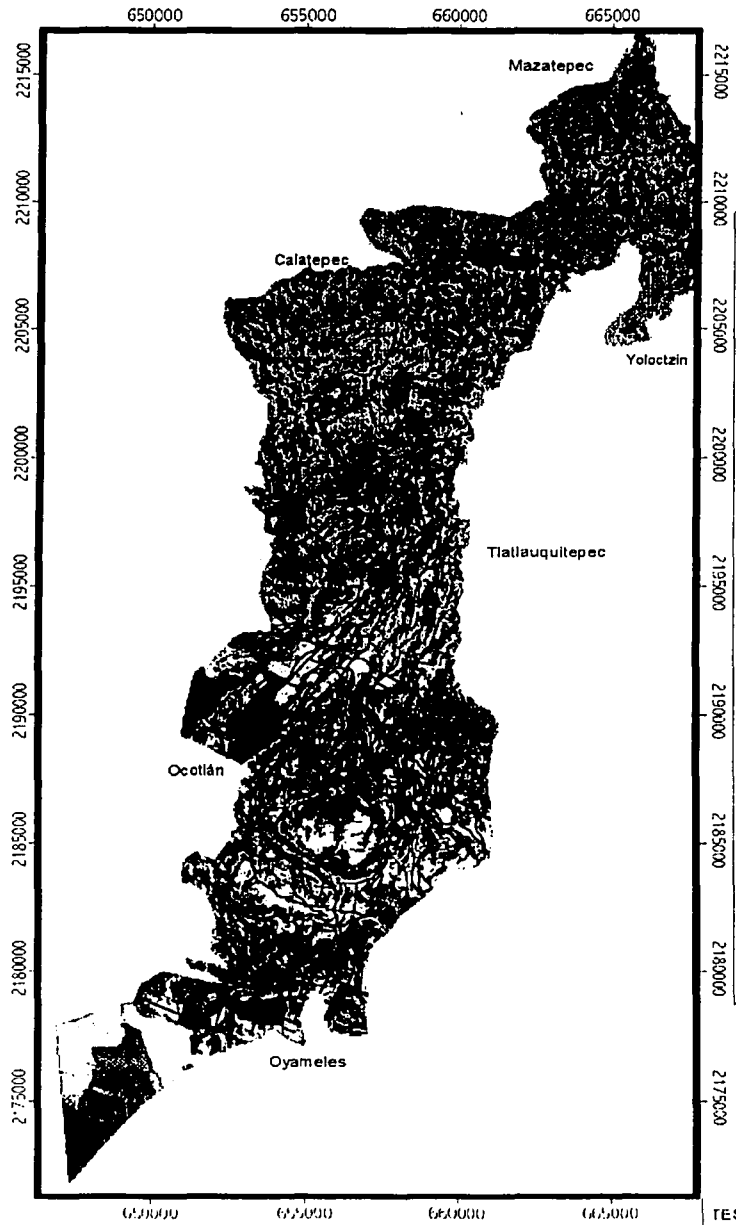
DV es la distancia vertical de equidistancia entre curvas de nivel

DH es la distancia horizontal existente entre curvas de nivel

Para el caso del municipio la obtención de los valores de pendientes se hizo de manera automática en el software, pero el principio de la elaboración es el mismo que el expuesto en párrafos anteriores, en este caso los valores se expresan de manera más puntual y ajustándose a la configuración más posible del terreno real.

El mapa de pendientes del municipio de Tlatlauquitepec (Figura 4.4), expresa los valores en 8 rangos en grados, estos fueron determinados en función de las características

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Leyenda

Rangos de pendiente

Planicie	
	0° a 0°30'
Rampa	
	0°30' a 1°30'
	1°30' - 3°
	3° a 6°
Premontañas	
	6° a 12°
Montañas	
	12° a 24°
	< 24°

Simbolos Complementarios

	Vías de Comunicación
	Ríos
	Poblaciones
*	Procesos registrados SEPROCI, CNA y autor



TESIS UNAM COLEGIO DE GEOGRAFIA
 José Marcos López
 Asesor: Dra. Irasema Alcántara Ayala

Figura 4.4 Mapa de pendientes del municipio de Tlailaquitepec

topográficas de la zona de estudio ya que se encuentra dentro de una zona heterogénea y considerando la existencia de zonas de planicie, rampa y montañas de disección moderada y alta.

Los valores comprendidos entre los valores de 0° a $0^{\circ}30'$ corresponden a zonas de planicie ubicadas al sur del municipio y pequeñas porciones ubicadas al sur de la ciudad de Tlatlauquitepec, son áreas donde ha dado procesos de tipo fluvial-acumulativo y que se expresan por medio de zonas de baja inclinación donde los procesos erosivos son muy bajos predominando los de acumulación.

Aproximadamente la mitad del territorio del municipio de Tlatlauquitepec tiene un valor de pendientes comprendido entre 0° a 12° . Los valores que van de $0^{\circ}30'$ a 6° ocupan la porción sur y centro-sur dentro del municipio y corresponden a las regiones morfogénicas de la rampa de ignimbritas y tobas, principalmente en las zonas donde la topografía presenta una forma de rampa de suave descenso en una orientación sur a norte. También dentro de estos rangos se ubican algunos derrames andesíticos y basálticos que componen a la caldera de Los Humeros, específicamente los derrames circundantes a las calderas y de reciente formación.

Los rangos que comprenden entre 6 a 12° corresponden a zonas de premontañas, estas se ubican circundando a las partes más elevadas dentro del municipio, son zonas de transición entre la zona de rampa y la de montañas. Dentro de este rango se ubica la pequeña mesa sobre la que se asienta la población de Mazatepec y los valles erosivos que disectan a la zona de rampa, en el caso de estos se trata de aquellos que son de poca profundidad y la acción de la erosión vertical no es muy pronunciada.

Los valores del rango de 6° a 12° se encuentran principalmente en las regiones de laderas montañosas, derrames andesíticos, los cuerpos de domos, bordes de la caldera y en mayor proporción los valles erosivos localizados dentro de la rampa de piroclastos; estas regiones son las que tienen una mayor distribución dentro del municipio, además de que demuestra que en el municipio que las zonas montañosas son predominantes y la magnitud que presentan los valles erosivos en cuanto a su pendiente dentro de la región.

Valores comprendidos entre 12° a más de 45° se localizan de manera preferencial en la porción norte y centro-norte del área de estudio y corresponden a la zona de montañas, en esta zona se presentan los descensos altitudinales más abruptos de relieve, además de ser zonas donde los cambios entre regiones morfogénicas es muy notorio, dentro de este rango de distribuyen regiones como laderas montañosas, las partes más altas de las montañas plegadas, bloques y conjuntos montañosos de esquistos, además de los valles erosivos que se encuentran dentro de las zonas montañosas. Los valores de pendiente que son próximos a 45° están distribuidos de manera preferencial en forma paralela a los valles erosivos, partes altas y montañosas de la porción norte, y dentro los valles principales de los ríos Apulco y Xucayucan.

Los valores de pendiente que son mayores a 45° se hallan menos distribuidos dentro del municipio y corresponden a áreas pequeñas de forma abruptas de las partes más altas de las zonas montañosas, predominantemente en las laderas montañosas, las montañas plegadas, en bloques y en menor grado de laderas de conjuntos montañosos de esquistos densamente disectados.

Dentro del municipio de Tlatlauquitepec la mayor cantidad de procesos de remoción en masa observados en campo se generaron dentro de los rangos de 6° a 45°, y se refieren a las zonas elevadas dentro de la zona (Figura 4.5), dentro de estos rangos se ubican las regiones de montañas plegadas de caliza y bloques, laderas montañosas, conjuntos montañosos de esquistos densamente disectados, premontañas escalonadas de calizas, laderas de material piroclástico, entre otros, además de que corresponde con las regiones donde la afectación por procesos fue mayor en Octubre de 1999, por el estado que guarda la litología. Los procesos ubicados dentro de los valores de rampa (0°30' a 6°) y planicie (0° a 0°30') se refieren a sitios donde el papel modificador del hombre es notorio y ha alterado la forma natural de las laderas proporcionándoles un estado de inestabilidad que se expreso por medio de procesos de remoción en masa.

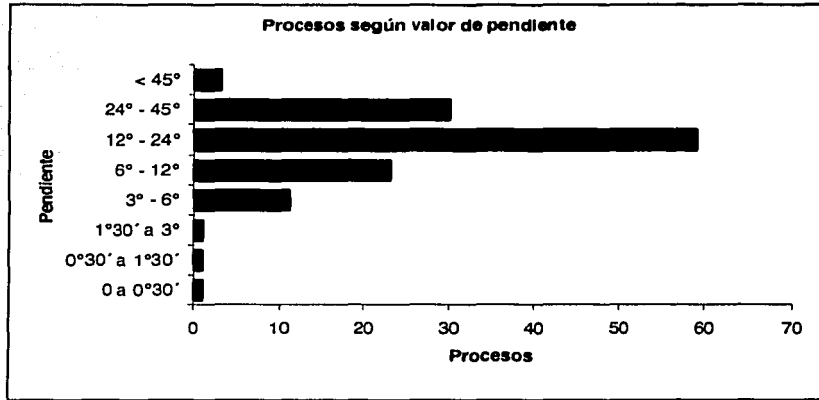


Figura 4.5 Número de procesos observados según valor de pendiente.

4.5.2 Calibración de parámetros por regiones

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Valores constantes de inicio

Para el cálculo de los índices de estabilidad por medio de SINMAP se requiere definir previamente una serie de parámetros utilizados como constantes durante todo el cálculo.

Los valores que se toman son los siguientes (Pack, 2001):

- Constante de gravedad con valor de 9.81 m/s^2
- Densidad del suelo expresada en 2000 kg/m^3
- Densidad del agua con valor de 1000 kg/m^3
- Numero de puntos utilizados en el grafico de relación deslizamientos por áreas con valores de 2000 como mínimo y 250 000 como máximo.

Calibración de regiones

En SINMAP se utilizan parámetros de calibración para el cálculo de los índices de susceptibilidad, mismos que se establecen por medio del proceso de calibración de parámetros constantes. Este es utilizado cuando las características de los materiales

dentro del área de estudio son iguales o los materiales son homogéneos. Para el caso del municipio de Tlatlauquitepec se requirió realizar una calibración de regiones, donde los valores de las propiedades de los materiales se ajustan según los tipos de litología a la que pertenecen.

Para este proceso de calibración de regiones se utilizó el mapa de regionalización morfogénica elaborado en el capítulo 2. Para la calibración se deben de incorporar los valores mínimos y máximos de los parámetros definidos como transmitividad, cohesión de materiales y el ángulo de fricción interna. Estas regiones comúnmente se definen con base en características de suelos, geología, vegetación o usos del suelo.

La transmitividad se refiere a la capacidad del suelo para que ocurra una transferencia de agua bajo un gradiente hidráulico, esto se expresa como un producto de la conductividad hidráulica por medio del espesor del suelo en un estado saturado. El parámetro utilizado es el radio o la relación transmitividad con recarga efectiva, que determina la saturación del suelo (Pack, 2001).

La cohesión de los materiales se refiere a la propiedad de los materiales de mantenerse unidos de manera intergranular, esta propiedad existe tanto en rocas como en suelo, debido a una relación molecular entre iones y cristales de minerales en las rocas que permite que las rocas continúen unidas en mayor o menor grado de modo intergranular (Selby, 1982).

El ángulo de fricción interna se refiere a la capacidad de un tipo de roca o suelo a resistir una tensión determinada. El valor que expresa el ángulo de fricción, está en función de una serie de fuerzas que se distribuyen según la resistencia entre partículas a la probabilidad de romperse. Este valor está en función del origen y composición de los materiales. El valor del ángulo de fricción interna aumenta o disminuye según la plasticidad y el contenido de agua de los materiales (Selby, 1982).

Los valores de cohesión (C), ángulo de fricción interna (Φ) y transmitividad (T/R), son elementos importantes que se utilizan en el cálculo de los índices de susceptibilidad, además de que permiten conocer los valores de resistencia de materiales existentes en la zona.

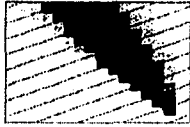
Para el municipio de Tlaltlauquitepec se calibraron un total de 23 regiones que se ajustaron según sus valores de los parámetros requeridos.

4.5.3 Mapa de dirección de flujo

Este mapa expresa de manera sencilla la dirección de flujo de agua a partir de una celda a la cual se le asigna un valor con relación a otra, ya sea de forma diagonal o adyacente, en relación con el punto mas bajo de la ladera de las celdas circundantes. Este método de expresar la dirección de flujo se denomina como D8 (8 probables direcciones de flujo) el cual fue definido por O'Callaghan (1984). En la utilización del método de D8 se han identificado desventajas ya que se asigna la dirección del flujo solamente en 8 probables direcciones, con intervalos de 45° (Fairfield, 1991; Quinn, 1991; Costa-Cabral, 1994; Torboton, 1997). En consecuencia, se han desarrollado otros elementos designados como dirección múltiple de flujos (Quinn, 1991), método de dirección al azar (Fairfield, 1991) y método de flujo a modo de tubo (Costa-Cabral, 1994).

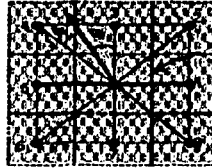
En SINMAP se utiliza el método de dirección múltiple de flujos desarrollado por Torboton (1997). En este, la dirección de flujo se asigna en sentido contrario a las manecillas del reloj, a partir del este en un valor continuo entre 0 y 2π . El ángulo está determinado en dirección hacia la parte más baja e inclinada, de ladera en algunas de las 8 facetas triangulares formadas en una malla de 3×3 celdas, donde en el centro se encuentra la celda examinada (Figura 4.6).

Dirección de escurrimiento medida en ángulo en sentido contrario a las manecillas del reloj desde el Este



Dirección de mayor inclinación ladera hacia abajo

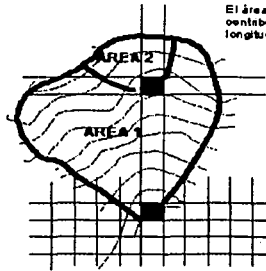
Proporción de áreas aldeñas que fluye a la celda número 3 es $\alpha 2 / (\alpha 1 + \alpha 2)$



Dirección de Flujo

Proporción de áreas aldeñas que fluye a la celda número 4 es $\alpha 1 / (\alpha 1 + \alpha 2)$

El área específica de la cuenca a es el área de contribución ladera arriba por unidad de longitud de la curva de nivel (m²m⁻¹)



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 4.6 Principio de las ocho probables direcciones de flujo. Fuente: Pack, 2001

El mapa de dirección de flujo expresa la dirección preferencial de los escurrimientos sobre las laderas, además los sitios donde se concentra una mayor proporción de precipitación (Figura 4.7). Los valores que se expresan tienen una relación directa con la forma y la orientación de las laderas, esto se expresa de modo que en el municipio la gran mayoría de las laderas se orienta en un sentido norte y noreste, expresado en el mapa en tonos de verde, otra orientación predominante de las laderas en el municipio es hacia el noroeste indicada con tonos de rojo. Los tonos de color verde y rojo predominantes en el área de estudio coinciden con la orientación de la gran mayoría de los escurrimientos existentes y la dirección en la que se presentan los descensos altitudinales. Los tonos de color rojo pálido y blanco denotan laderas orientadas hacia el sur y suroeste, en la porción norte son las laderas ubicadas al norte de la presa La Soledad y al sur del municipio a laderas que drenan corrientes a la cuenca de Oriental.

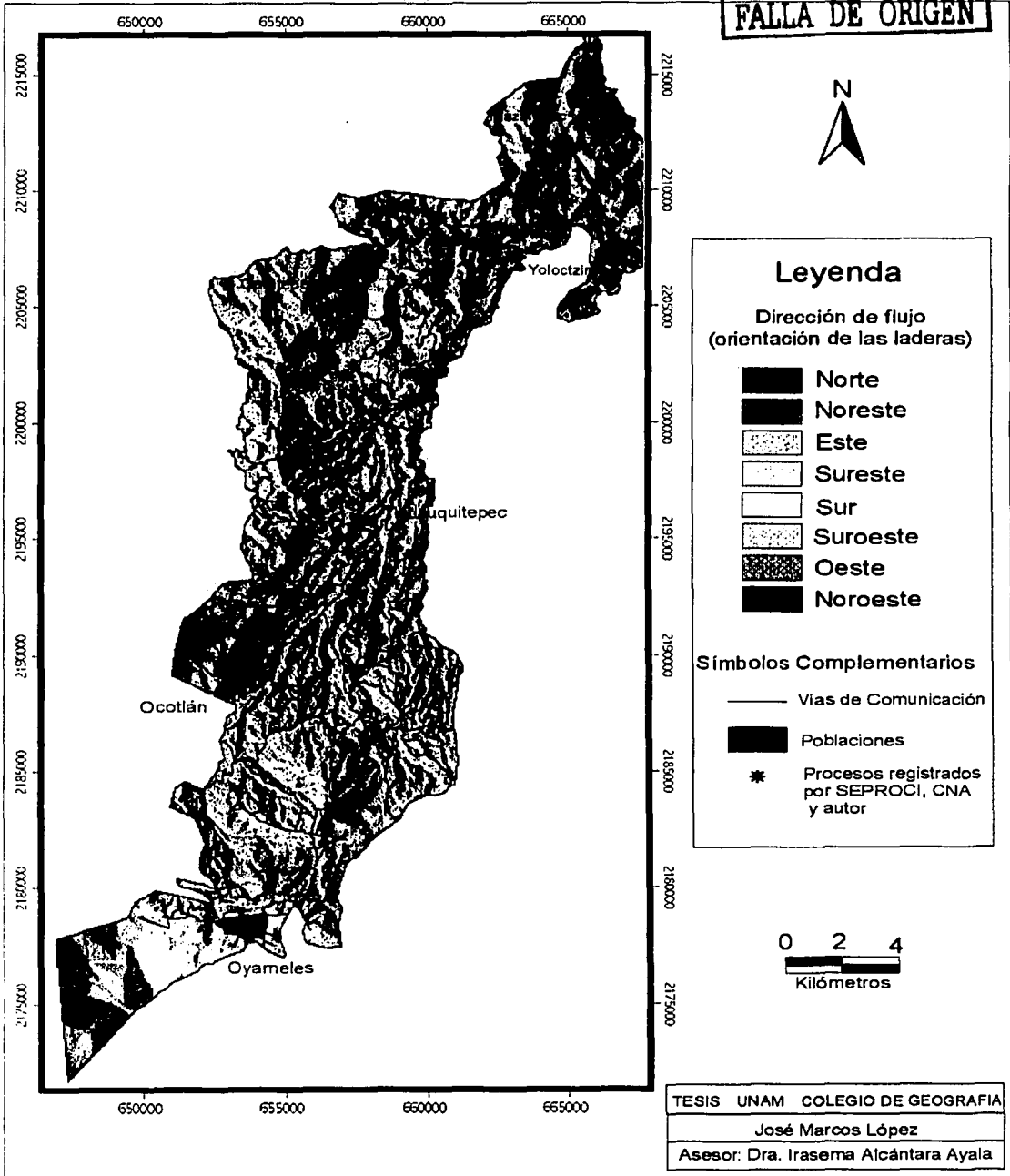


Figura 4.7 Mapa de dirección de flujo del municipio de Tlatlauquitepec.

La información contenida en el mapa de dirección de flujo es utilizada posteriormente para el cálculo del índice de susceptibilidad y mapas como el de área específica de la cuenca, además el de índice de humedad.

4.5.4 Mapa de área específica de la cuenca

Este mapa es elaborado en función del número total de celdas contenidas en el área de estudio y calculado usando el valor total de celdas, las cuales se dividen entre el total de las que se componen y la extensión que cubre, por medio de un algoritmo se calcula el punto al cual esta celda esta contribuyendo a su captación (Mark, 1988).

El área específica de la cuenca corresponde al valor de la celda en donde se capta o concentra la mayor cantidad de agua, debido a los escurrimientos en función del área drenada. La dirección a la cual drena este punto de concentración esta en función de la disposición y dirección altitudinal que tienen sus celdas adyacentes, este puede ser de modo cardinal o diagonal.

Como el área específica de la cuenca está en función de los valores altitudinales de las celdas adyacentes entonces del total de celdas que componen al área, las que tienen un valor alto son las que drenan a la de valor bajo próximo. El valor esta en función del número de total de celdas que componen a la cuenca multiplicado por el tamaño de celdas que componen a la malla de valores.

Los valores que se obtienen del mapa de área específica de la cuenca tienen una relación directa con la red hidrológica de la zona, ya que los valores de mayor concentración corresponden a los sitios donde hay una corriente fluvial. Las características topográficas que presenta el área de estudio y que se hallan contenidas en el MDE, se expresan claramente en este mapa, ya que refleja los puntos de concentración de escurrimientos los cuales tienen una alta semejanza con la red hidrológica real (Figura 4.8).

Los valores expresados en colores amarillos claros, presentan la característica de ser laderas altas de formas convexas correspondientes a las divisorias de aguas, donde la concentración de escurrimientos es poco factible además de ser sitios donde se inician los

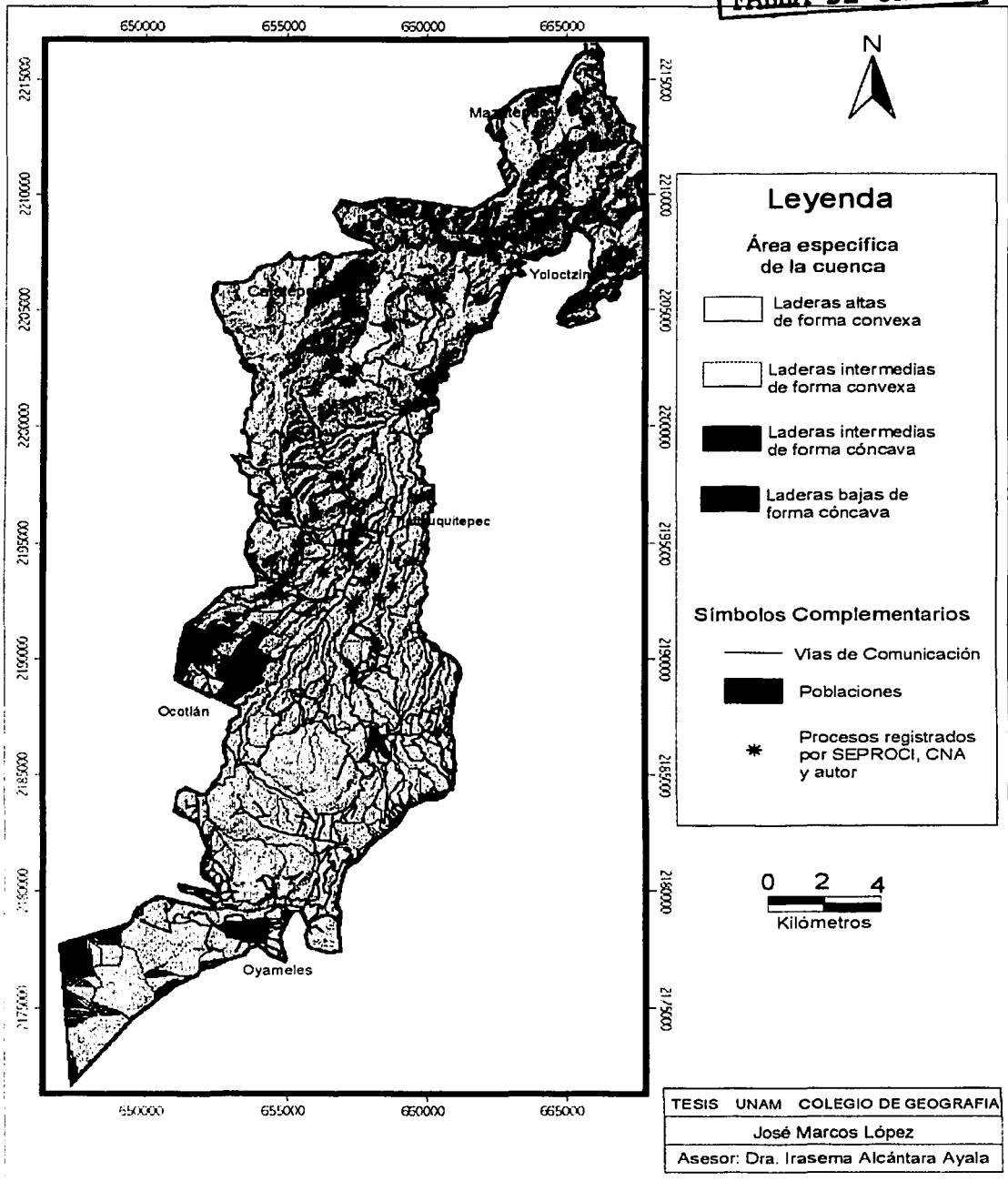


Figura 4.8 Mapa de área específica de la cuenca del municipio de Tlatlauquitepec.

escurrimientos que drenan las cuencas, siendo estos de tipo incipiente, efímero y difuso. Los colores verdes muestran laderas convexas intermedias donde la concentración de escurrimientos es baja debido a la geometría de la misma y su posición inmediata a las divisorias de aguas. Los tonos de azules claro indican laderas cóncavas donde la concentración de corrientes es optima y corresponden a los valles ocupados por ríos y talwegs, estas laderas presentan la característica de ser las zonas mas bajas dentro de la cuenca a la que pertenecen y ser zonas de concentración de humedad.

Los procesos de remoción en masa observados en la zona de Tlatlauquitepec corresponden a valores bajos del área específica, pero están próximos a las zonas de valores altos, esto refleja que existe una influencia directa de las zonas de concentración de escurrimientos con los sitios en donde se generaron los procesos de remoción en masa, por su cercanía a estos (Figura 4.9). Cabe mencionar que en estos casos los factores que controlaron la ocurrencia de los procesos de remoción en masa fue la litología, el estado de los materiales y la pendiente de la ladera, datos que nos se hallan expresados en el mapa, pero que fueron explicados en apartados anteriores.

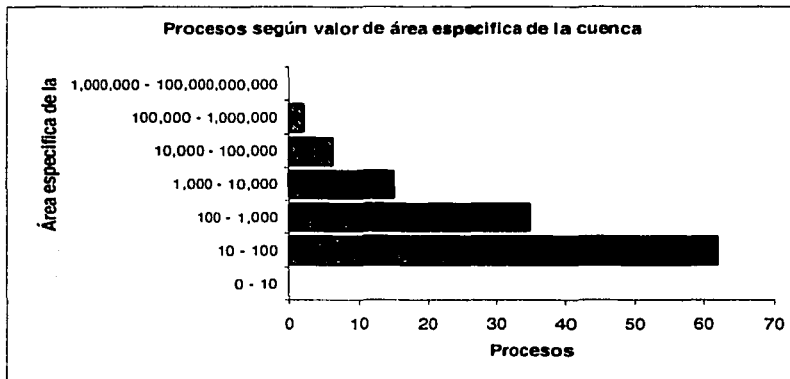


Figura 4.9 Número de procesos observados según el valor de área específica de la cuenca.

4.5.5 Mapa de índice de humedad

A partir de la obtención de los mapas preeliminares, se obtuvo el mapa de índice de humedad, el cual expresa los sitios donde se acumula la mayor cantidad de humedad a partir de la infiltración de la escorrentía en las laderas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la obtención de este mapa se deben de considerar los siguientes supuestos:

- 1- El flujo denominado como subsuperficial somero esta en función del gradiente topográfico por lo que se considera que este se halla en función de la topografía del terreno.
- 2- La descarga lateral encuentra un punto de equilibrio cuando la recarga presenta un estado constante.
- 3- La capacidad del flujo lateral está en función del valor de transmitividad del suelo.

El mapa de índice de humedad expresa sus valores en función de las características del suelo, rocas y las características de la geometría de la ladera. A partir del mapa obtenido se agruparon los valores en 4 clases que expresan el estado de los materiales en un grado de saturación (Figura 4.10).

Zona de saturación. Representa las áreas donde los materiales por su ubicación topográfica pueden presentar una condición de alta concentración de agua, además se muestran los valores más altos como producto de la alta influencia de concentración de escurrimientos que drenan en el área.

Umbral de Saturación. Es la zona donde la saturación de los materiales no es completa sino que se encuentra en una situación previa, además de que la cantidad de humedad es cercana a un punto medio alto de saturación de la ladera.

Zona parcialmente saturada. Es aquella donde los valores de concentración de agua tienen un valor medio-bajo, es decir que no hay una gran proporción saturación.

Zona de baja saturación. Son las laderas donde no es factible la acumulación de agua o no es posible por sus características topográficas del terreno.

Cabe mencionar que las zonas de saturación y umbral de saturación corresponden a las zonas de valles fluviales y zonas bajas de elevaciones. También se observa que en las zonas bajas que corresponden a corrientes fluviales donde se presenta una alta

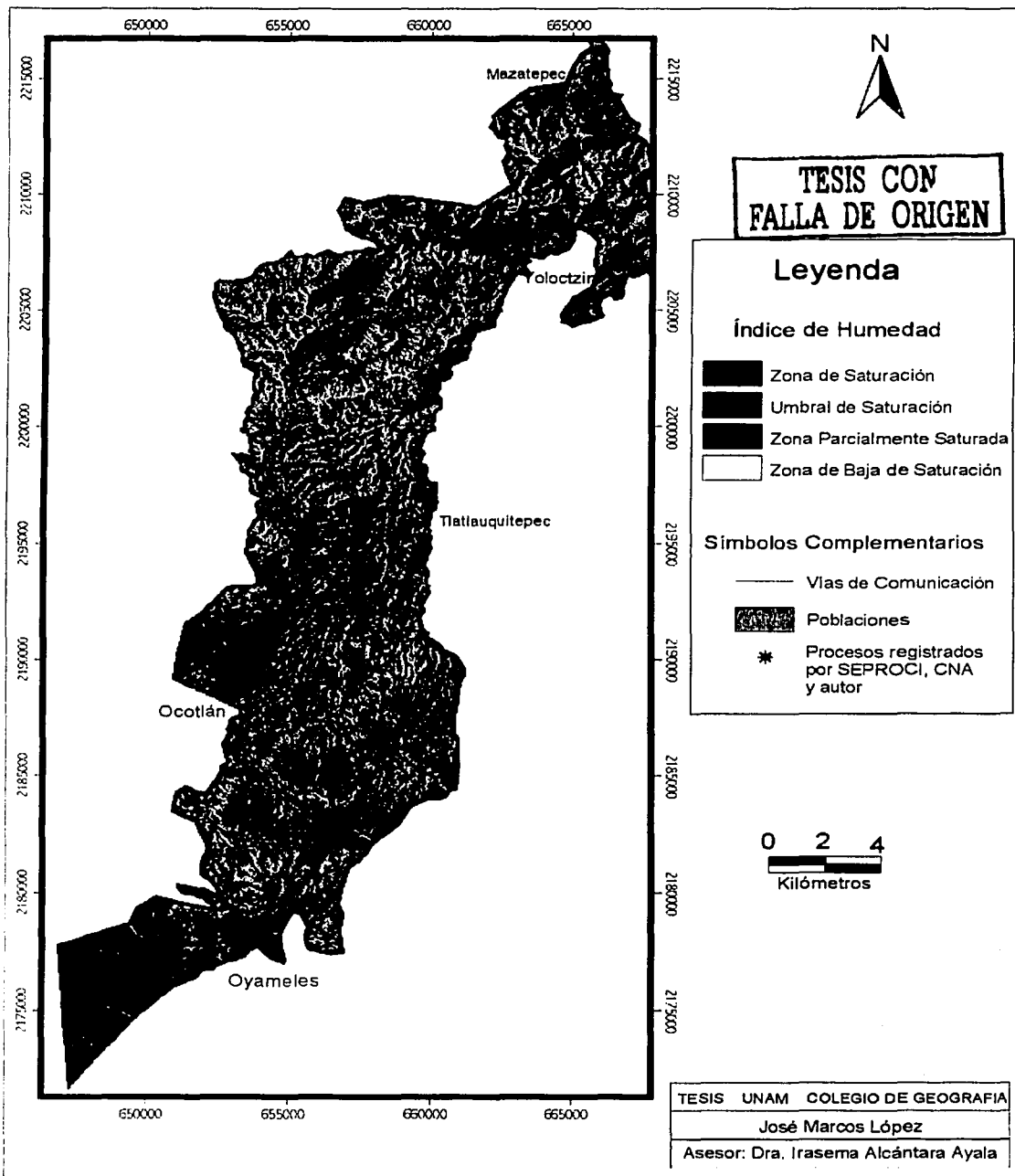


Figura 4.10 Mapa de índice de humedad del municipio de Tlatlaquitepec

saturación, contrario a esto, las áreas altas o de cimas dentro del área de estudio, son las que presentan los grados más bajos de saturación.

En el municipio de Tlatlauquitepec la mayor cantidad de procesos de remoción en masa observados se localizaron en las zonas de saturación y en menor grado en aquellas de umbral. También se localizaron en zonas de baja saturación, en el caso se trata de áreas bajas o de forma cóncava donde la concentración de agua de precipitación es factible, en el caso de zonas de baja saturación se trata de laderas convexas, planas o cimas donde la concentración de agua es poco posible por la expresión topográfica de las laderas y que la ocurrencia de los procesos de remoción en masa debido tener otros factores que condicionaron la inestabilidad, como pueden ser los de tipo geológico (Figura 4.11).

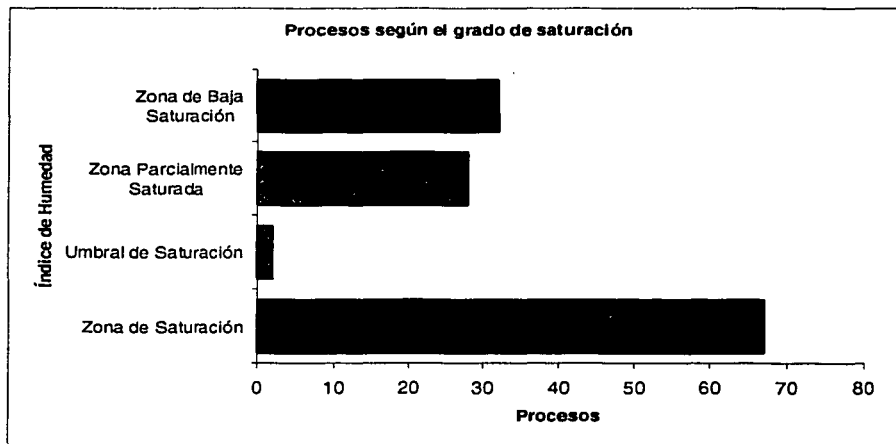


Figura 4.11 Número de procesos observados según el grado de saturación.

4.5.6 Mapa de índice de estabilidad

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El mapa de índice de estabilidad o susceptibilidad es uno de los productos finales de la utilización del SINMAP, este representa las zonas donde potencialmente se podría dar la ocurrencia de procesos de remoción en masa en condiciones de suelos saturados y de poca profundidad. Este índice calculado es el resultado de la manipulación de los elementos que componen al modelo que se utilizó del municipio de Tlatlauquitepec. Los valores resultantes están en función del Factor de Seguridad, el cual a su vez fue

calculado de acuerdo a ciertos elementos de tipo topográfico y geográfico existentes en el área de estudio.

Los valores de estabilidad están comprendidos en tres clases las cuales indican el estado de la dinámica que se presentaría en el terreno en las condiciones mencionadas (Cuadro 4.2). A partir del mapa de índices de estabilidad se obtuvo también un gráfico de relación procesos de remoción en masa por áreas y valores de clases, además una tabla de análisis de la distribución de estos procesos por regiones calibradas.

Cuadro 4.2 Valores de clases usadas en el mapa de índices de inestabilidad.

<i>Clases</i>	<i>Estado de predicción</i>	<i>Característica</i>
1	Zona estable	Zonas donde la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa es baja
2	Zona casi-estable	Zonas donde la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa es alta
3	Zona inestable	Zonas donde la posibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa es muy alta

El gráfico de relación de procesos de remoción en masa por áreas nos indica la distribución de los procesos que se registraron en el municipio según la tendencia del índice de estabilidad. También toma en cuenta un total de 2 000 puntos tomados al azar en las distintas regiones calibradas (Figura 4.12).

La distribución que nos presenta el gráfico indica que de los puntos tomados al azar y registrados como procesos, se encuentran en igual proporción dentro del rango de estabilidad en un estado poco saturado y se concentran en los valores bajos de área específica de cuenca, pero como se explicó en el caso de dicho mapa se encuentran cercanos a los sitios que presentan los valores altos de área específica y que se hallan influenciados por sitios con valores altos, además de ser laderas de geometría convexa donde la ocurrencia de procesos estuvo influenciada principalmente por la litología y la inclinación de la ladera. En la distribución de puntos se observa que la disposición de estos en los ejes de coordenadas se ubican en dos posiciones preferenciales, una en la que en condiciones naturales los sitios de análisis se hallan en valores bajos de pendiente y se hallan concentrados en los valores medios y bajos de área específica de cuenca que corresponden a los que se localizaron en la rampa de ignimbritas. La otra disposición que

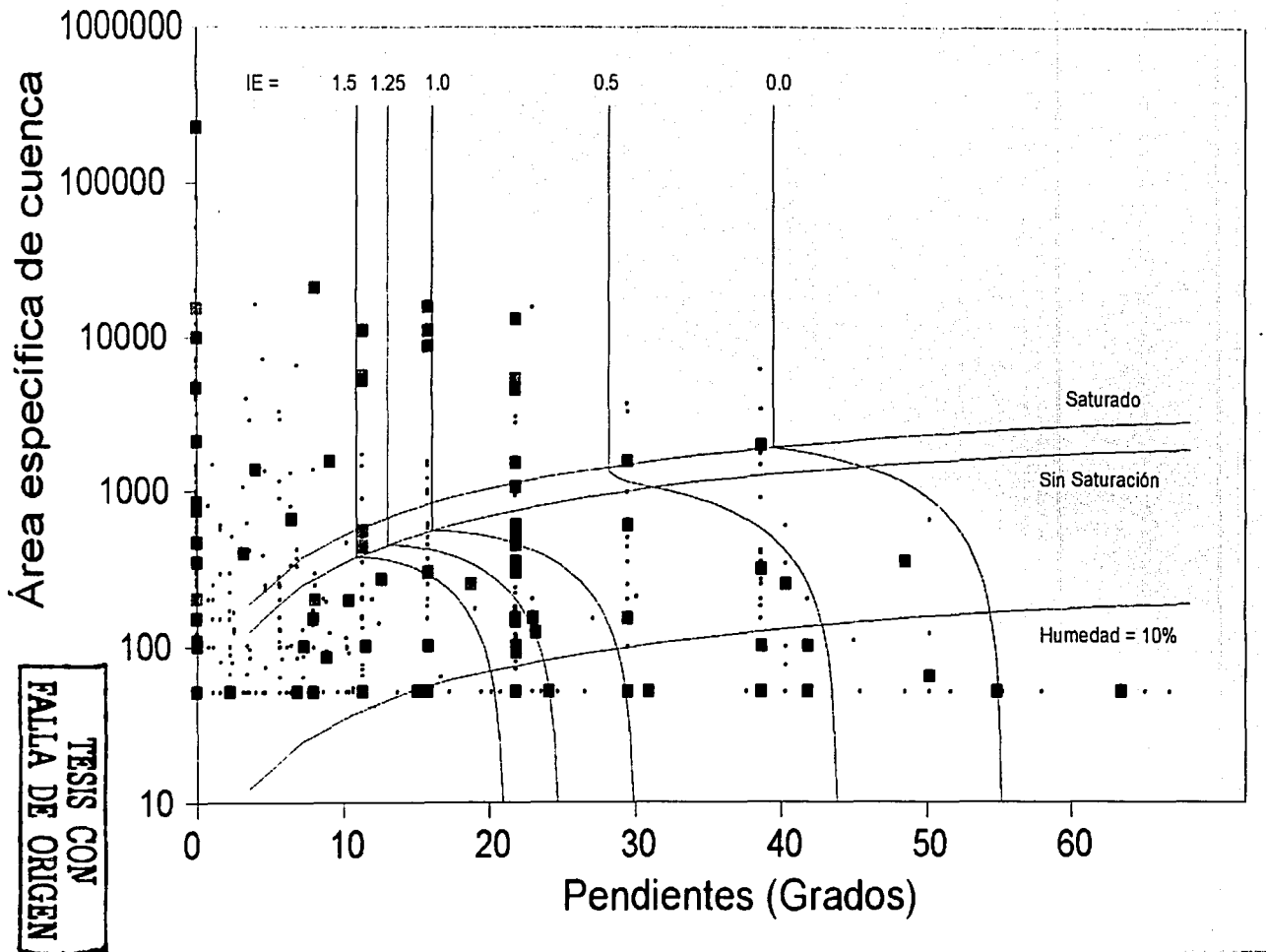


Figura 4 12 Grafico de relación de procesos de remoción en masa por áreas del municipio de Tlaltlauquitepec

Cuadro 4.3 Distribución de procesos por regiones del municipio de Tlatlauquitepec.

Región	Estado	Casi-estable	Inestable	Total	
Conjuntos montañosos de esquistos densamente disectados	Area Km2	2.3	3.5	10.3	16.1
	% de area region	14.2	21.9	63.9	100
	No de procesos	4	7	8	19
	% procesos	21.1	36.8	42.1	100
Laderas de material piroclastico	Area Km2	4.9	2.4	2.8	10.1
	% de area region	48.7	23.4	27.9	100
	No de procesos	6	7	3	16
	% procesos	37.5	43.8	18.7	100
Laderas montañosas	Area Km2	8.9	11.9	36.8	57.6
	% de area region	15.5	20.6	63.9	100
	No de procesos	4	6	14	24
	% procesos	16.7	25	58.3	100
Premontañas escalonadas de calizas y lutitas densamente disectadas	Area Km2	4.7	3.1	4	11.8
	% de area region	40	26.5	33.5	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100
Montañas plegadas, bloque y escalonadas con disecion moderada	Area Km2	3.5	2.8	8.5	14.8
	% de area region	23.6	18.9	57.5	100
	No de procesos	2	1	4	7
	% procesos	28.6	14.3	57.1	100
Elevaciones aisladas	Area Km2	0	0	0.1	0.1
	% de area region	1.8	21.4	76.8	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100
Rampa de piroclastos	Area Km2	64	14.1	8.3	86.4
	% de area region	74.2	16.3	9.5	100
	No de procesos	15	3	4	22
	% procesos	68.2	13.6	18.2	100
Valles erosivos	Area Km2	10.2	4.1	3.5	17.8
	% de area region	57.1	23	19.9	100
	No de procesos	8	2	2	12
	% procesos	66.7	16.7	16.6	100
Elevaciones intrusivas aisladas con disecion debil	Area Km2	0.4	0.6	1.6	2.6
	% de area region	16.4	23.4	60.2	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100
Rampa de lobas	Area Km2	18.9	3.1	1.2	23.2
	% de area region	81.8	13.2	5	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100
Domos de lava	Area Km2	12.6	3.9	3.5	20
	% de area region	63	19.4	17.6	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100
Derrames basalticos	Area Km2	5.2	1.6	1	7.8
	% de area region	66.8	21	12.2	100
	No de procesos	0	0	0	0
	% procesos	0	0	0	100

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

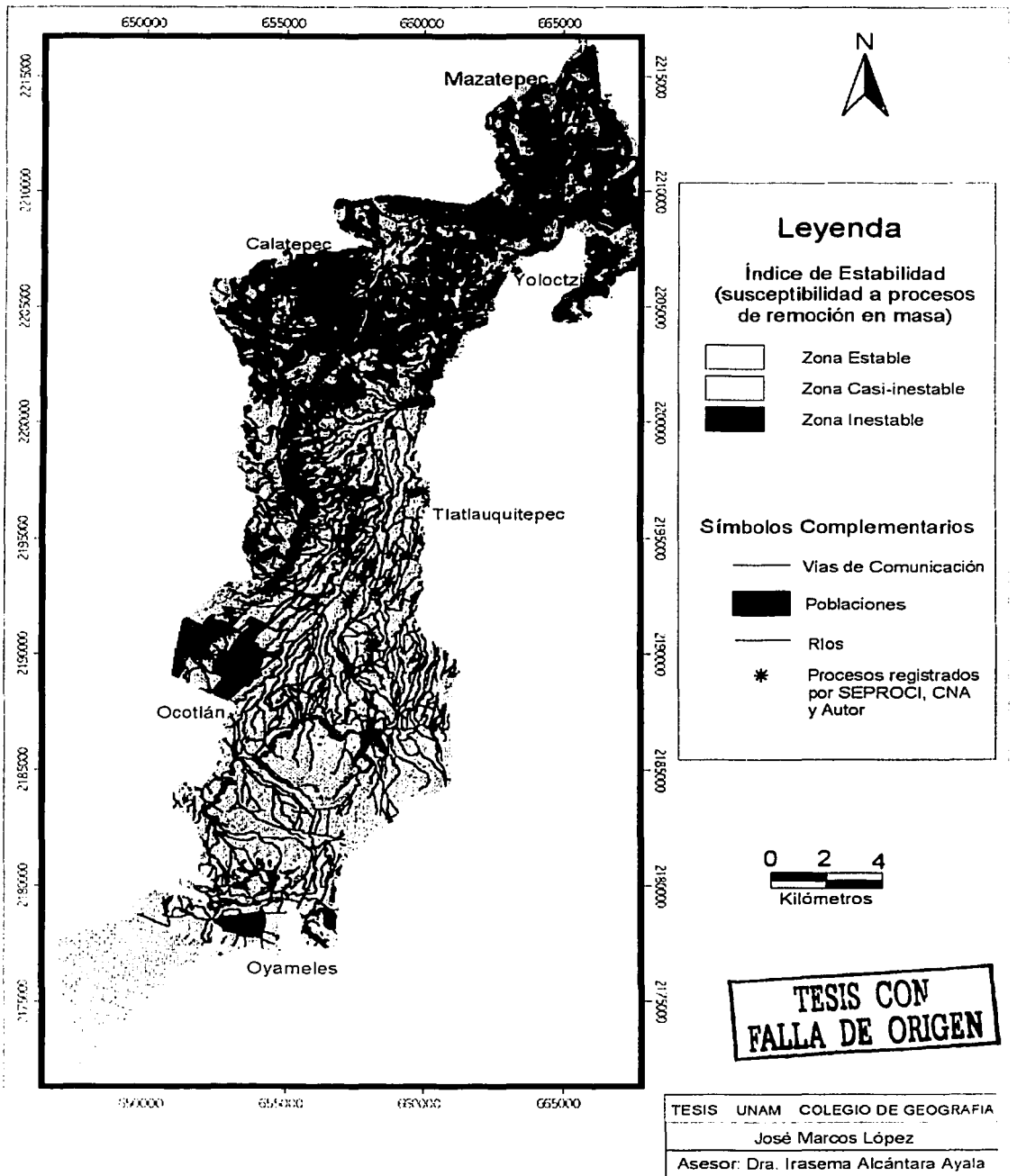


Figura 4.13 Mapa del índice de estabilidad del municipio de Tlatlauquitepec.

región de rampa piroclástica y en la zona montañosa ubicada en la porción centro-norte; esta última fue una de las mas afectadas durante Octubre de 1999.

En el área de estudio se observa que la mayor concentración de valores altos de inestabilidad se distribuye en las regiones de laderas de material piroclástico, montañas plegadas en bloque, premontañas escalonadas de calizas y lutitas densamente disectadas, conjuntos montañosos de esquistos y laderas montañosas. Estas regiones presentan la características de ser las áreas más montañosas dentro del municipio además de que en estas se presentan los valores más altos de pendiente y en los mapas morfométricos (Figura 4.14 y 4.15).



Figura 4.14 y 4.15 Zonas con valores altos de inestabilidad, la primera montañas plegadas y la segunda laderas de material piroclástico.

Existen otros valores de inestabilidad localizados en la porción centro y sur del municipio, éstas corresponden a la zona de rampa de piroclastos y la zona de transición de esta rampa con la de tobas; en ciertas porciones los valores de inestabilidad coinciden con las zonas de contacto entre estas dos regiones morfogenéticas y los valles erosivos que cortan a estas regiones. Este comportamiento también se puede observar en los frentes de los domos de lava, los cuales presentan desniveles mayores de 100 metros y que por la interacción de los factores analizados presentan condiciones de inestabilidad. Otras zonas ubicadas al sur del área de estudio presentan condiciones de inestabilidad en las cabeceras de los valles erosivos que se ubican en casi-inestable a inestable (Figura 4.16)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 4.16 Frentes de domos al sur de Xonocuaúta que presentan valores de inestabilidad.

Los procesos que ocurrieron en las laderas próximas a los valles erosivos, muestran valores de casi-inestable; cabe señalar que en estos casos existieron otros factores que intervinieron en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, principalmente el papel modificador del hombre que se expresa en la ocupación de áreas forestales con fines agrícolas.

En cuanto a la distribución de los procesos de remoción en masa según los rangos de estabilidad, la mayor parte de los valores (40%) se localizaron en el rango de inestabilidad (Figura 4.17) y corresponden a los que se generaron en la porción centro-norte y norte del municipio, la cual presenta altos valores de inestabilidad y fue una de las zonas más afectadas durante Octubre de 1999. Los procesos ubicados en el rango de casi-inestable (35%) corresponden a zonas de transición entre la rampa piroclástica y las premontañas, estos valores también se ubican en zonas de contacto entre la rampa de tobas con piroclastos y domos de lava. Los valores de estabilidad (25%) se presentaron principalmente en la región de rampa piroclástica, rampa de tobas, cimas de los domos de lava y derrames basálticos. También dentro de este rango se ubica el área sobre la que se asienta el poblado de Mazatepec.

La concentración más alta de valores de inestabilidad se localizó en la vertiente interior que drena a la presa La Soledad y la zona centro-norte del municipio. Entre las localidades que fueron afectadas por procesos y que se encuentran en zonas de

inestabilidad según los resultados del SINMAP, están El Canal, Calatepec, Chilistipan, San Agustín Chagchaltzin, San José Chagchaltzin, Chicuaco, Ahuatamimilol, Tamalayo, Eloxochitan y Yoloctzin.

Localidades como La Primavera, Tepetzintla, Coateczin y El Dos se ubican en sitios de valor casi-estable, pero circundadas por áreas de inestabilidad (Figura 4.18), estas localidades fueron afectadas por procesos que se generaron en la parte alta de las montañas que las rodean, las cuales presentan valores altos de inestabilidad.

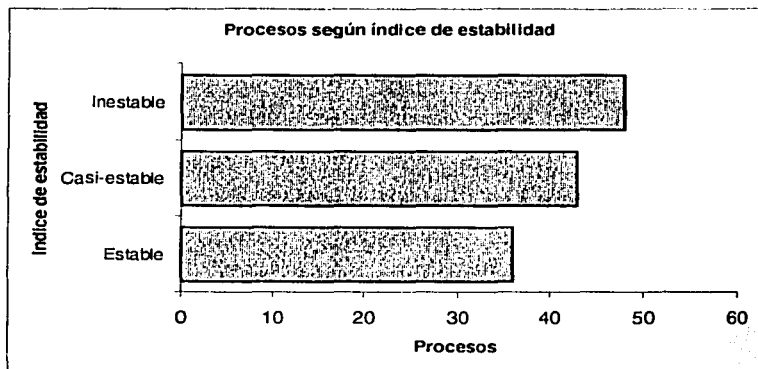


Figura 4.17 Número de procesos según valor de índice de estabilidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 4.18 Elevaciones con valor de inestabilidad que rodean al norte a la población de Tepetzintla.

4.6 Parámetros externos al SINMAP utilizados en el análisis del índice de susceptibilidad.

Dentro del análisis de la susceptibilidad de las laderas a procesos de remoción en masa se pueden obtener indicadores que ayuden a la comprensión de los valores expresados de la obtención de dicho índice, algunos de estos son la geometría del relieve, la rugosidad del terreno, la pendiente, entre otros. El objetivo de la obtención de indicadores asociados externos al SINMAP se basó en la validación, complementación y comprobación de la información resultante del modelo utilizado, además de obtener parámetros que en un caso dado se hallan en relación directa con la ocurrencia de procesos de remoción en masa

4.6.1 Mapa de concavidad-convexidad del terreno.

La concavidad-convexidad del terreno es uno de los parámetros que se ha empleado en la interpretación de los mapas de índices de susceptibilidad a procesos de remoción en masa y como un indicador asociado que tiene una relación directa con estos fenómenos (Iwahashi, 2001; Graff and Userly, 1993; Iwahashi and Kamiya, 1995).

El mapa de geometría del relieve o concavidad-convexidad, toma en cuenta a la morfología del relieve en función de su configuración tanto en planta como en sección, la cual presenta una forma semi-geométrica que se puede extraer de la interpretación de mapas topográficos o fotografías aéreas.

La realización del mapa de geometría del relieve se calcula a partir de un supuesto de que las laderas presentan en perfil una configuración de una curva, que tiene una semejanza a una porción de onda donde se observa la línea sinuosa con forma cóncava y otra convexa existiendo entre estas un punto de flexión que determina el cambio entre un tipo de curva y otra (Figura 4.19). Este proceso de clasificación de la morfología del relieve se puede llevar a cabo por medio de la interpretación de la configuración de las curvas de nivel del área estudiada, para lo cual se requiere que el ejecutante tenga experiencia en la interpretación de esta información y de la elaboración de perfiles en zonas donde su

configuración no indique algún tipo de geometría. Actualmente este proceso se puede realizar de forma automática a partir de la extracción de la información contenida en el MDE (Iwahashi 1995; 2001).

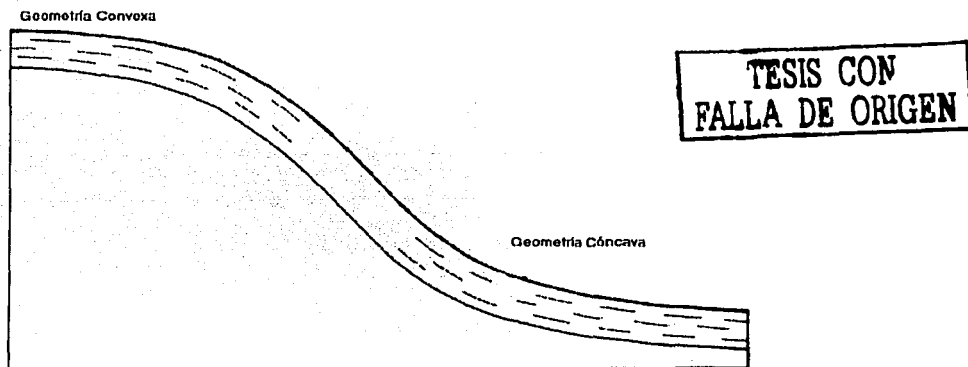


Figura 4.19 Forma hipotética de la convexidad-concavidad del relieve según Bloom (1991).

La geometría del relieve ha sido explicada como un factor que influye en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa (Bloom, 1991; Sparks, 1990), entendiéndose que en el relieve existe una conformación semejante a una curva ya sea de forma cóncava, convexa o recta. Las formas de tipo convexo son predominantes en las partes elevadas de las laderas, aunque pueden existir en combinaciones de estas en una misma ladera que se expresen como convexo-cóncavo-convexo, convexo-recto-cóncavo, cóncavo-convexo-recto, etc. La inclinación de la forma de la ladera dependerá de factores como tipo de rocas, condiciones climáticas, vegetación y orientación de la ladera (Bloom, 1991).

Las partes altas de laderas con forma convexa, que tienen un punto de flexión muy pronunciado ya sea una forma cóncava o recta, son zonas susceptibles a procesos de remoción en masa, las cuales se puede expresar con deformaciones iniciales en los puntos de flexión y pueden ser ocupados por escarpes en la ocurrencia de procesos. En las laderas de tipo cóncavo la ocurrencia de los procesos de remoción en masa es más frecuente, en condiciones en que estas laderas se encuentren en dirección preferencial de las corrientes fluviales o que en su parte más baja exista una corriente también es posible

el desarrollo de procesos como flujos de suelos y deslizamientos superficiales de suelo (Bloom, 1991).

Por otro lado en laderas de tipo convexo la ocurrencia de procesos de remoción en masa también es frecuente, pero en estos caso se hace preferencialmente en condiciones en las que ladera presenta cambios drásticos de pendiente en el punto de flexión entre un tipo de curva a otra, además de que se encuentran en zonas donde las condiciones de precipitación y de tipo litológico determinen la inestabilidad de ladera. También existen procesos en laderas convexas que son de poca altura y que su punto de flexión esta ocupado por alguna corriente fluvial o en laderas a favor de la pendiente, próximas a una corriente fluvial (Bloom, 1991).

La elaboración del mapa de concavidad-convexidad del municipio de Tlatlauquitepec se realizó por medio de la extracción de la información que contiene el MDE, en este caso se aplicó un filtro de tipo Laplace y D2FDXDY (Segunda derivada del ángulo del terreno) en el Sistema de Información Geográfica ILWIS. Estos filtros analizan la información altimétrica del MDE en mallas de 3 x 3 píxeles, en los cuales el valor examinado esta ubicado al centro de esta malla; a este se le asigna un valor de acuerdo con su relación existente con las celdas circundantes y los valores resultantes de estos filtros indicaran la geometría del relieve existente de acuerdo a un rango de valores de negativos a positivos.

En el municipio del Tlatlauquitepec se observa que la geometría del relieve predominante es la cóncava y la menos distribuida es la de tipo ligeramente inclinada, en la región de rampa piroclástica se observa una alternancia de laderas escalonadas de pequeñas dimensiones, las zonas de tipo convexo ocupan de manera preferencial las divisorias del terreno y las áreas de altura media del terreno (Figura 4.20). Las laderas de forma cóncava ocupan dentro del municipio las laderas próximas a las corrientes fluviales y abarcan una gran extensión, esto es apreciable en las que drenan a los ríos Apulco y Xucayucan, además de que este tipo tienen una gran coincidencia con la localización de corrientes fluviales.

Las laderas de poco inclinadas son las menos distribuidas dentro del área de estudio estas solo se localizan en la porción sur del municipio, una se encuentra al suroeste y

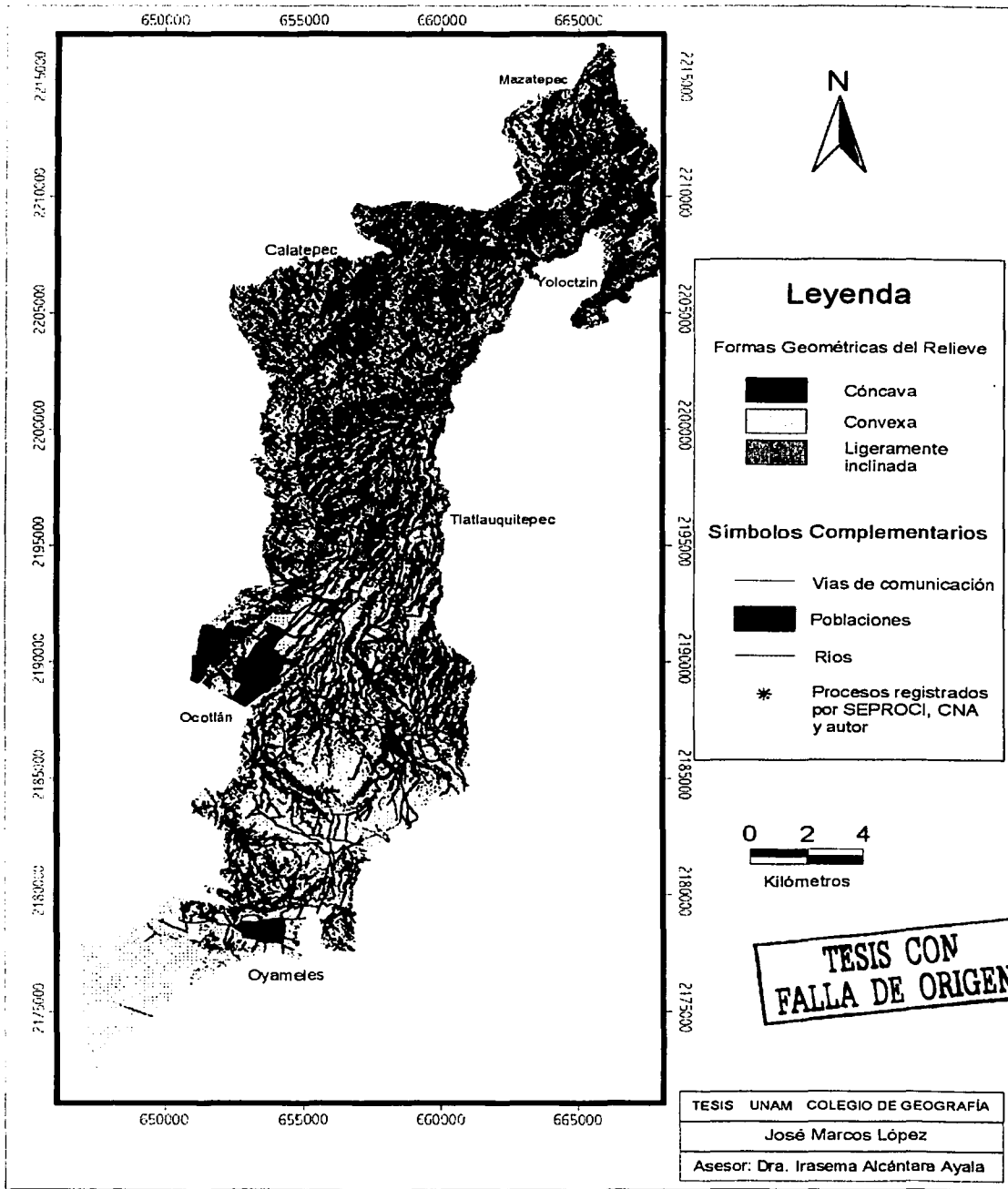


Figura 4.20 Mapa de geometría del relieve del municipio de Tlaltlauquitepec.

corresponde a una parte de la rampa piroclástica, las otras porciones corresponden a los pisos de la caldera de los Humeros donde la configuración del terreno es casi plana.

La distribución de los procesos de remoción en masa observados según el tipo de clasificación del relieve es homogénea, ya que se presentaron en casi igual proporción en laderas cóncavas y convexas, en las de ligera inclinación no hubo ocurrencia de estos procesos (Figura 4.21). Las laderas de tipo convexo donde hubo ocurrencia de procesos se distribuyen dentro de la rampa piroclástica y en las partes altas de las regiones de laderas montañosas, conjuntos montañosos de esquistos, laderas de material piroclástico y premontañas de calizas que se encuentran próximas a corrientes fluviales y circundadas por laderas cóncavas. Los procesos que ocurrieron en laderas cóncavas corresponden a las vertientes que drenan a los ríos Apulco y Xucayucan, las cuales presentan un alta disección y corresponden a regiones de laderas montañosas, de tipo piroclástica, areniscas y conjuntos montañosos de esquistos.

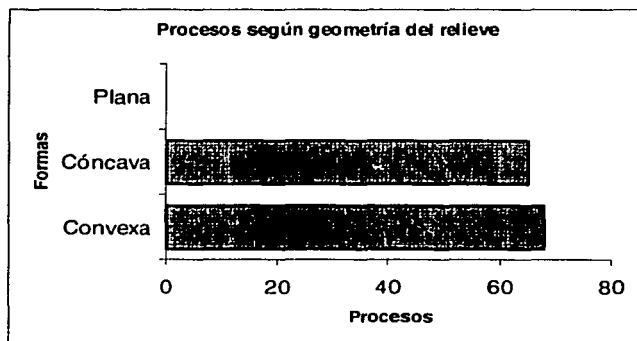
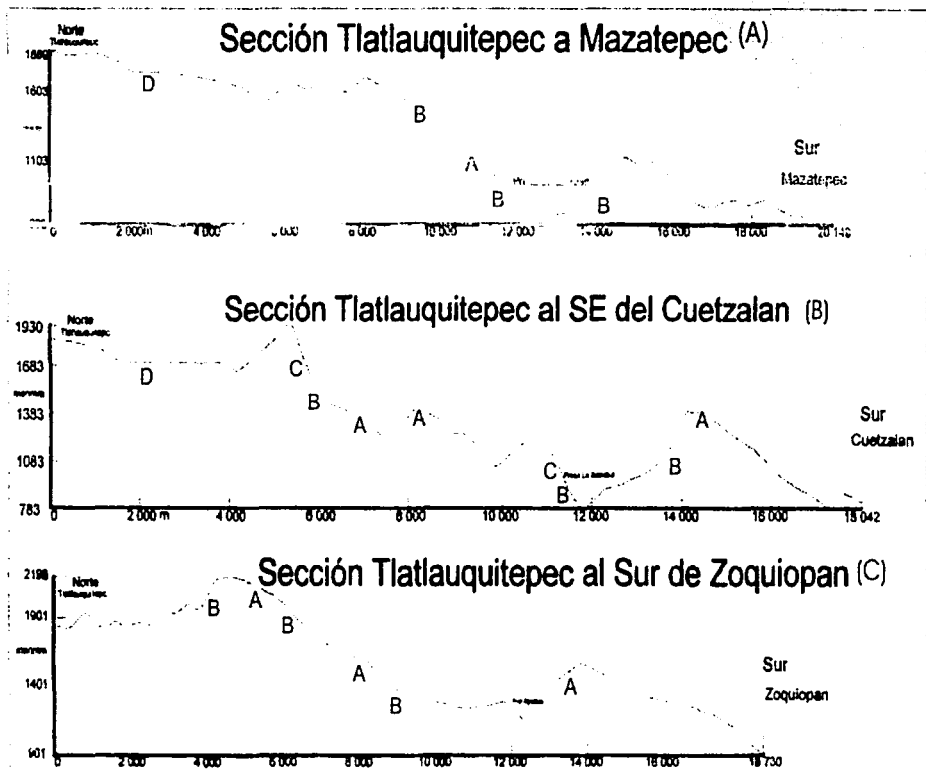


Figura 4.21 Número de procesos observados según valor de geometría del relieve.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En los perfiles que se realizaron en las zonas de mayor ocurrencia de procesos se observa una predominancia de laderas que presentan un inflexión pronunciada en el cambio de un tipo de ladera convexa a cóncava, además de que existen desniveles altos entre una ladera y otra (Figura 4.22). En la porción sur se presenta una serie de descensos escalonados con pendientes fuertes, en contraste con la porción norte, donde las laderas cercanas a la presa o al río Apulco son de tipo pronunciado y se extienden hacia el norte con un descenso suave de pendiente. Las características que presentan estos tipos de laderas indican una clara relación que existió con la ocurrencia de procesos



A- Laderas convexas B- Laderas concavas C- Laderas rectas D- Laderas ligeramente inclinadas

Figura 4.22 Perfiles elaborados para el municipio de Tlatlauquitepec.



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

de remoción en masa, entendiendo que factores como la pendiente, la litología, condiciones meteorológicas, propiedades de los materiales, entre otros influyeron en la ocurrencia de estos procesos.

4.6.2 Mapa de asociaciones o síntesis morfométrica

Otro mapa posible de ser utilizado como elemento para la interpretación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, es el mapa denominado en este trabajo como asociaciones o síntesis morfométrica. Este mapa fue elaborado tomando como punto de referencia el mapa publicado en Alcántara-Ayala, I., et al (2002) donde se hace una correlación de valores según las coincidencias de los valores altos expresados en la morfometría a partir de una comparación de valores de 1 contra 3 valores. En el mapa utilizado en el presente trabajo la correlación de los valores se fundamenta en comparaciones de 3 contra 3 valores. Este mapa consiste en realizar correlaciones entre los valores obtenidos de los mapas morfométricos y que puedan tener una relación directa con la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

La metodología para la obtención de este mapa consistió en:

A partir de los tres mapas morfométricos obtenidos en el capítulo 2 (densidad de disección, profundidad de disección y energía del relieve) se realizó una reclasificación de valores de cada uno en función de tres rangos, que tuvieran una asociación con la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Para este caso se tomaron como clases tres valores: alta, media y baja (Alcántara-Ayala, I., et al (2002)).

Una vez reclasificados los mapas a tres rangos de valores, se procedió a hacer una sumatoria de valores de los tres mapas, además de agregarle la variable de la topografía expresada en función de la pendiente con los rangos de 0° a 6°, 6° a 22° y 22° a más, clasificada en tres rangos según la influencia que pudiera tener en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa.

El mapa obtenido indica la zonas que en función de los valores morfométricos pueden ser susceptibles a procesos de remoción en masa y que están influenciadas por la topografía. Para una mejor comprensión del mismo mapa este también es expresado en tres rangos

de susceptibilidad: alta, media y baja (Figura 4.23). Los resultados de la obtención de este mapa ayudan a corroborar la información obtenida dentro del modelo manejado para la susceptibilidad y expresan la confiabilidad de la manipulación de este modelo en el análisis de la estabilidad de laderas.

Los valores más altos de susceptibilidad obtenidos en el mapa de asociaciones morfométricas, se distribuyen preferencialmente en la porción norte y centro norte del área de estudio, la cual coincide con la expresada por el mapa obtenido con el SINMAP.

Esta zona presenta un alta influencia de la acción erosiva que se distingue por contrastes altos en los que se refiere a valores altitudinales, valores morfométricos y expresión topográfica. Esta zona a su vez representa el área más afectada en Octubre de 1999 por procesos de remoción en masa, la cual se distribuye desde la porción sur del poblado de Mazatepec hasta el norte y oeste de la ciudad de Tlatlauquitepec, que corresponde a la zona mas montañosa dentro del municipio y donde la ocurrencia de este tipo de fenómenos es frecuente. Existe también otra porción que se indica como de alta susceptibilidad, esta es la localizada en los frentes de los domos que se hallan al sur de Xonocauatla y Tepeteno, corresponde a la zona de cambios altitudinales y la transición entre los domos y la rampa de tobas. Esta última zona también es coincidente con los resultados que se obtuvieron de la manipulación de los datos en el SINMAP.

Los valores de susceptibilidad media corresponden a la región morfogenética de rampa de piroclastos y de tobas, se refieren a zonas semiplanas, que muestran pocos cambios altitudinales y donde los materiales tienen una distribución más homogénea. Además los efectos modificadores de la acción erosiva son menos notorios que en la parte que se indica con valor alto, pero no es indicativo de que no exista este efecto modelador sino que tiene una expresión menor que la que presenta la parte norte del área de estudio.

Los valores bajos se distribuyen de manera preferencial en la porción sur y en menor grado en al centro, ésta se refiere a zonas aisladas donde los efectos modeladores de la erosión son menores y no presentan alguna posible relación directa con la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

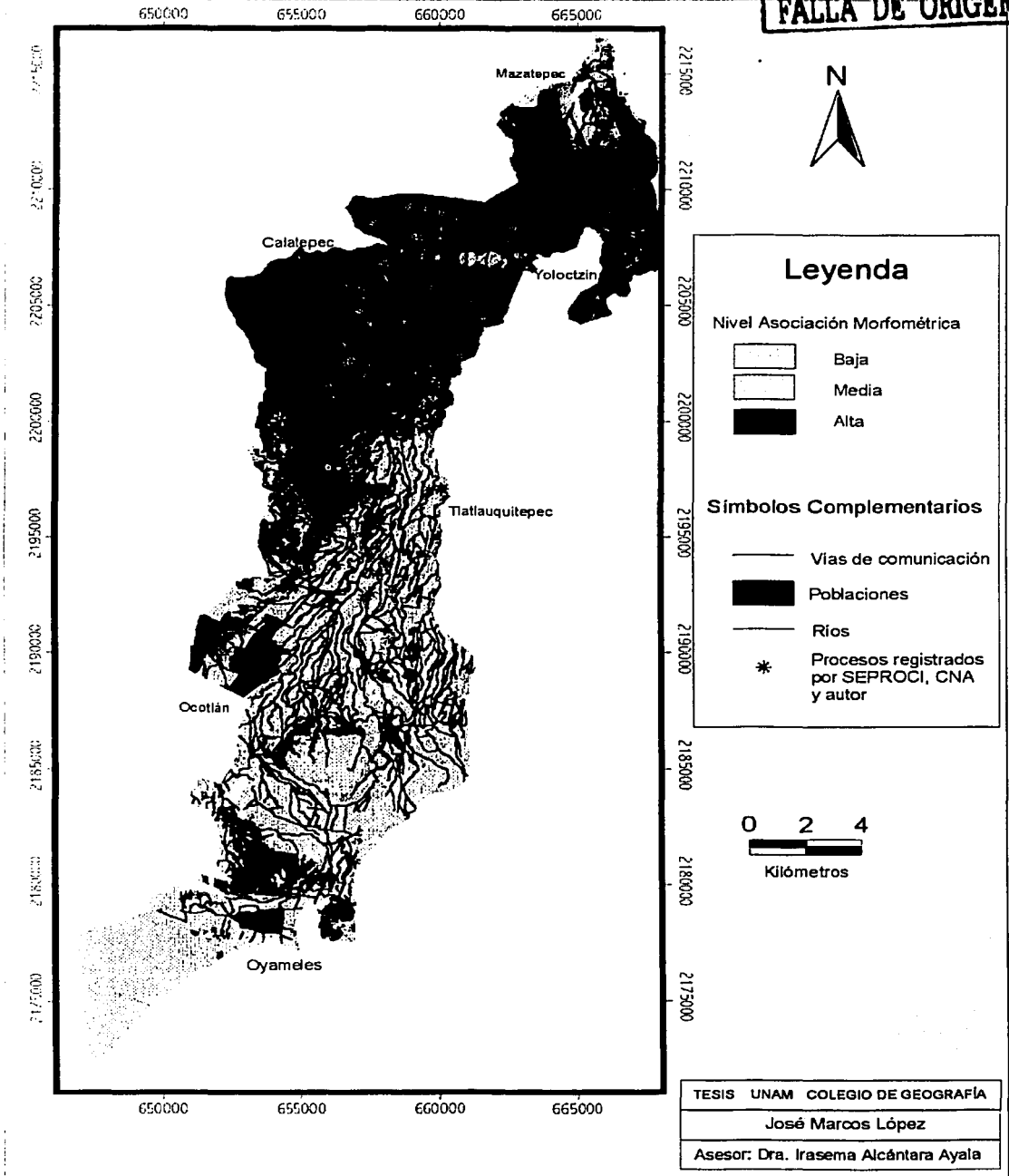


Figura 4.23 Mapa de asociaciones morfológicas del municipio de Tlatlauquitepec

La obtención de este mapa además de expresar la relación que existe entre los valores morfométricos con la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, sirve para validar los datos obtenidos dentro del SINMAP.

4.6.3 Determinación de volumen de masa movilizada

Otro parámetro utilizado en el análisis de inestabilidad de laderas es la determinación del volumen de masa movilizada de un proceso de remoción en masa, asociado a esto se deben de realizar también perfiles topográficos del mismo para analizar la geometría de la ladera, así como las características de la superficie resultante del proceso. Con lo anterior es posible entender la dinámica de las laderas.

La metodología utilizada para la determinación de la masa movilizada se explica a continuación:

Dentro del reconocimiento de campo que se hizo en el municipio de Tlaltlauquitepec, se realizó un inventario de sitios afectados por procesos de remoción en masa. Un segundo reconocimiento se enfocó en la zona donde la afectación por estos procesos fue mayor, en particular la porción norte y centro-norte. Posteriormente se eligió uno los procesos registrados que fuese representativo de todos los procesos que se originaron en la zona y que además hubiese afectado a asentamientos humanos localizados ya sea en la ladera donde se origino o próximos a esta.

El proceso elegido para el análisis fue él localizado en la población de San José Chagchaltzín, debido a que fue uno de los que causo mas daños dentro del municipio, además de una de las razones por las que fue elegido se debió a que por sus características morfológicas permitían la determinación del volumen. A este proceso le fue asignado el nombre de la localidad para su uso posterior. Este proceso fue de tipo deslizamiento translacional con dimensiones aproximadas de 500 metros de largo con 200 metros de ancho en su parte más amplia correspondiente al área del escarpe principal y 100 metros en su parte más angosta perteneciendo a la zona de pie del movimiento (Figura 4.24). Este proceso presenta un diferencia altitudinal de aproximadamente 250 metros entre la zona del escarpe y el pie del movimiento, se ubica

a una altitud promedio de 1400 msnmm. Según datos proporcionados por los pobladores de la localidad se origino la noche del día 5 de Octubre. Como consecuencia del movimiento se destruyeron 3 casas ubicadas en el cuerpo del movimiento y fueron afectadas 2 casas mas. Además se ocasionaron daños indirectos en el centro de salud y otros espacios públicos dentro de la localidad, así como la destrucción de la terrecería que comunica al poblado de El Canal con la ciudad de Tlatlauquitepec (Figura 4.25 y 4.26).



Figura 4.24 Dimensiones que presenta actualmente el proceso de San José.



Figura 4.25 Casa ubicada al oeste del proceso y que fue dañada en Octubre de 1999.



Figura 4.26 Tramo de carretera afectado por el deslizamiento.

El primer paso para la obtención del volumen fue la realización de un levantamiento topográfico del cuerpo del deslizamiento, así como en la superficie ubicada en sus flancos, el levantamiento fue realizado por medio de la utilización de una estación total Trimble 5600 series, el proceso consistió en la obtención de puntos del terreno con valores X (coordenadas UTM este), Y (coordenadas UTM norte) y Z (altitud en msnm). Estos valores fueron interpolados para obtener las curvas de nivel existentes en la superficie del movimiento y el área circundante a esta.

Obtenidas las curvas de nivel, se realizó una corrección de la configuración de estas, ya que actualmente la superficie ha sido modificada por maquinaria para la reconstrucción de la terracería que es única vía de acceso a la localidad. Obtenida la configuración de las curvas de nivel del deslizamiento, a estas se les denominó como “superficie resultante” dentro de este análisis.

Una vez obtenida la superficie resultante, el siguiente paso fue la obtención de la topografía original de la ladera en la que se generó el deslizamiento, a esta superficie se le denominó como “superficie original”. Para la obtención de la superficie original se tuvo que recurrir al análisis de la carta topográfica 1 : 50 000 donde se localiza la localidad, para tener una referencia general de la topografía preexistente en la zona, aunque esta herramienta fue omitida debido a que por la escala de la carta y la ubicación del símbolos complementarios no era legible. También se utilizó una ortofoto proporcionada por la presidencia del municipio del año de 1992 en donde se identifican aspectos como la localidad y la ubicación de original de la carretera, así como la expresión topografía de la ladera analizada (Figura 4.27). Por último se utilizaron fotografías tomadas desde diversos sitios para poder inferir de manera complementaria la configuración de curvas de la superficie original (Figura 4.28).



Figura 4.27 Ortografía donde se observa la ladera donde se desarrolló el proceso.



Figura 4.28 Fotografía panorámica del proceso San José.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A partir de estos elementos utilizados y la descripción de pobladores de la localidad se infirió la superficie original de la ladera, obteniéndose las curvas de nivel de esta superficie. Posteriormente se efectuaron una serie de perfiles topográficos con la finalidad de observar las diferencias y semejanzas entre la superficies y la posterior corrección de

las curvas de nivel obtenidas, se definieron un total de cuatro perfiles uno de manera longitudinal y tres transversales. (Figura 4.29).

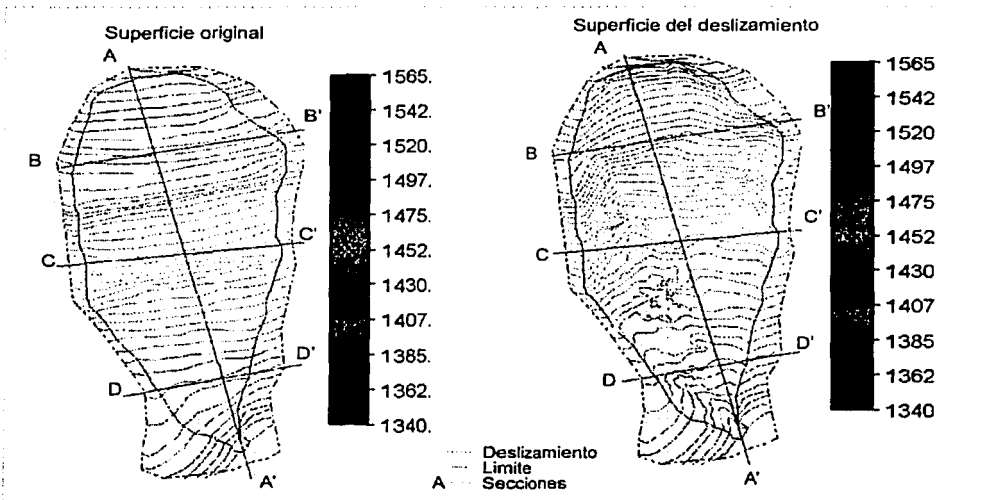


Figura 4.29 Curvas de nivel obtenidas para el proceso San José.

En los perfiles realizados a las dos superficies obtenidas se observa que en un sentido longitudinal (A-A'), la superficie original presenta una forma convexa con porciones donde la forma cambia a recta y cóncava, además de que en su porción inferior estos cambios son mas frecuentes pero solamente de unos cuantos metros. De los perfiles obtenidos en sentido transversal (B-B', C-C' y D-D') se observa que la superficie original presentaba una forma convexa teniendo su expresión mas geométrica en el perfil correspondiente a la porción mas alta (B-B'), en tanto que en la perteneciente a parte más inferior la forma es de menor expresión la forma convexa.

En lo que se refiere a la superficie del deslizamiento se observa que en el perfil en sentido longitudinal, la existencia de una zona de ruptura de pendiente correspondiente al escarpe principal en el cual se originó el deslizamiento, en este segmento se observa una altura de 30 metros entre la superficie original y aquella en la cuál se movilizó el material, dentro del perfil de la superficie del deslizamiento se observa además un segmento de forma cóncava-recta correspondiente a la superficie de ruptura y una porción de forma escalonada. Esta última parte corresponde al pie del deslizamiento original, el cual al

movilizarse debió de arrastrar y desplazar el material que se hallaba a su paso, con lo cual el pie del movimiento fue aumentado. La profundidad del movimiento decreció a partir del primer pie de movimiento. Dentro del deslizamiento el decrecimiento de esta profundidad es observable en los perfiles transversales en donde la superficie del deslizamiento decrece, además de que muestra una forma irregular, llegándose en la porción mas inferior a haber una diferencia entre las dos superficies de 8 metros.

La superficie del deslizamiento en la porción más ancha (B-B') presenta una forma cóncava, la cual decrece marcadamente hasta su porción más inferior (D-D') donde el perfil muestra una forma cóncava-convexa, además de que su expresión es menos notoria debido a que la remoción de los materiales no pertenece directamente al cuerpo del deslizamiento y corresponde a materiales movilizados por la fricción del cuerpo del movimiento durante su desplazamiento, de ahí que su forma sea irregular.

Deslizamiento San José Chagchatzin

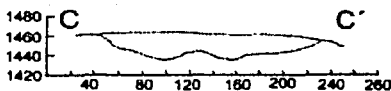
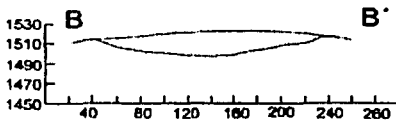
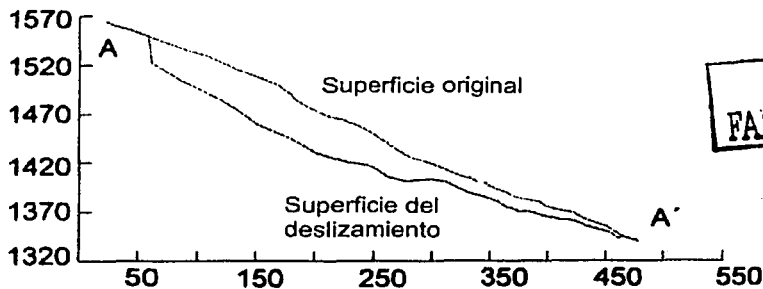


Figura 4.30 Perfiles elaborados para el proceso San José.

A partir de la diferenciación de las curvas de nivel de la superficie resultante y la original se procedió a la obtención del volumen de masa movilizada. Este cálculo fue realizado por medio de la extensión de la plataforma de AutoCAD denominada Land Development Desktop.

La obtención del volumen se realiza en Land Development Desktop por medio de tres métodos, debido a que los resultados obtenidos por cada uno de estos suelen estar calculados por parámetros distintos, además de que no resulta conveniente utilizar un valor como resultado definitivo sino que debe de compararse con otros para determinar cual es el más conveniente u obtener un promedio de estos, para tener un valor definitivo.

Cada uno de los métodos presenta una serie de ventajas y desventajas en su aplicación, además de que los cálculos son realizados de forma distinta por cada uno, el fundamento de la obtención del volumen por cada método se expone a continuación:

Malla de volumen (Grid Volumes). Este método se basa en la sobreposición de dos superficies a partir de las cuales elabora una malla de cuadrados de dimensiones m y n , y de mismas proporciones en las dos superficies; a partir de esto calculan una serie de prismas obtenidos de la diferencia entre superficies (Figura 4.31). El volumen es calculado en base a cada uno de estos prismas, para posteriormente ser sumado. La desventaja que presenta este método consiste en que solo realiza cálculos a prismas, por lo cual omite a aquellas áreas que donde no se originen prismas y la precisión varía en función de las dimensiones del prisma (Autodesk, 2000).

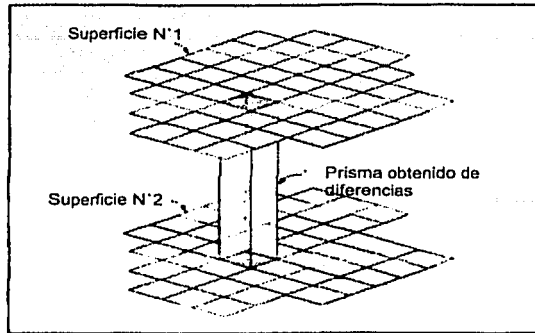


Figura 4.31 Esquema ilustrativo del método de malla de volumen.

Volúmenes compuestos (Composite Volumes). En este caso se usa como base a la malla calculada a través del método de malla de volumen. A partir de esta se realiza una triangulación en función de las diferencias existentes entre las dos superficies, con la finalidad de no omitir a los espacios que se generaron en el método anterior. A partir de la triangulación realizada se obtienen un grupo de prismas triangulares de forma irregular, a los cuales se les calcula el volumen y al final se realiza la suma de los valores obtenidos (Autodesk, 2000).

Método de secciones (Section Method Volumes). Este método mide el volumen en sentido horizontal a las superficies, contrario a los dos métodos anteriores que realizan las mediciones en sentido vertical. Para el cálculo del volumen se toman en cuenta dos procedimientos denominados como: Promedio final del área (Average End Area), el cual consiste en mediciones a lo largo se secciones que promedian el área por segmentos cuando se encuentra una discontinuidad de elevación en la sección (Figura 4.32). El método prismoidal (Prismoidal Method) efectúa los cálculos por medio de prismas que tienen como base un polígono irregular (Figura 4.33), además de que este es definido en sentido horizontal a las superficies (Autodesk, 2000)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

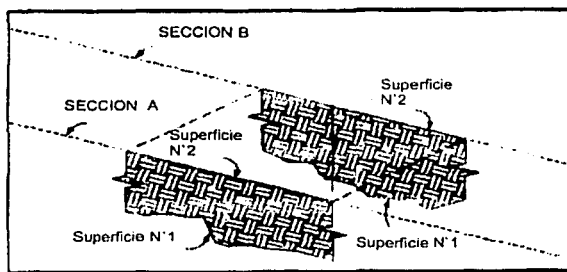


Figura 4.32 Principio del método de promedio final de área.

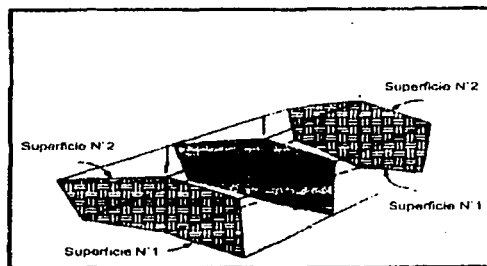


Figura 4.33 Principio del método prismoidal.

El cálculo del volumen fue realizado por medio de los tres métodos descritos, para lo cual fue necesario realizar el análisis a través de los siguientes pasos:

1) Sobreposición de las curvas de nivel en el siguiente orden: superficie original-superficie resultante y superficie resultante-superficie original, con la finalidad de que el programa calcule la diferencia existente entre las dos superficies, además de que en estos casos las curvas de nivel de las dos superficies deben de tener el mismo punto de origen y termino, o sea que no presenten segmentos cortos entre una superficie y otra.

2) Sobreposición de curvas de nivel en el siguiente orden: superficie original-superficie resultante (corta) y superficie resultante (corta)-superficie original. En este caso la superficie resultante es corta debido a que solo se toma en cuenta la superficie del deslizamiento y no la que se halle a sus extremos. Además de que la

superficie original debe de ser más grande que la resultante para que se obtenga la diferencia entre superficies.

Durante el cálculo del volumen se eliminan algunas superficies debido a que durante la generación de la malla de cálculo se agregan áreas que se encuentran fuera del cuerpo del deslizamiento, pero agregando los límites del proceso, esta eliminación se hace automáticamente. Los resultados obtenidos del cálculo del volumen del deslizamiento San José mostraron un valor de volumen de 1,216,913 m³, lo cual nos indica que por las dimensiones del proceso, la movilización de la masa fue rápida y por el peso que esta implicaba originó los daños secundarios en la población como consecuencia del roce que debieron sufrir los materiales con la superficie del terreno (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5 Valores obtenidos del cálculo de volumen del proceso San José.

Método	Tipo	Orden	Diferencia (m3)	Corrección (m3)	Volumen (m3)
Malla	Normal	Original-Resultante	1,221,149	120	1,221.028
Compuesto	Normal	Original-Resultante	1,221,686	187	1,221.500
Secciones	Normal	Original-Resultante	1,221,147	193	1,220.954
Malla	Corto	Original-Resultante	1,207,420	852	1,206.567
Compuesto	Corto	Original-Resultante	1,217,358	1,842	1,215.515
Secciones	Corto	Original-Resultante	1,217,742	1,829	1,215.913

Método	Tipo	Orden	Corrección (m3)	Diferencia (m3)	Volumen (m3)
Malla	Normal	Resultante-Original	120	1,221,149	1,221.028
Compuesto	Normal	Resultante-Original	187	1,221,686	1,221.500
Secciones	Normal	Resultante-Original	193	1,221,147	1,220.954
Malla	Corto	Resultante-Original	852	1,207,420	1,206.567
Compuesto	Corto	Resultante-Original	1,842	1,217,358	1,215.515
Secciones	Corto	Resultante-Original	1,829	1,217,742	1,215.913

Volumen promedio (m3)	1,216,913
-----------------------	-----------

De los resultados obtenidos del cálculo del volumen del deslizamiento de San José se pueden desprender las siguientes conclusiones:

- El método que presenta los valores mas confiables es el de secciones, pero no puede ser tomado como valido totalmente, se deben de realizar los cálculos necesarios por medio de los otros métodos para poder validar los resultados.

- Se debe de realizar el cálculo por medio del tipo corto ya que en este caso se omiten errores que se pudieran generar de la ejecución del tipo largo en el cual se asumen curvas de nivel con un mismo origen y termino.
- La información de la metodología utilizada en el deslizamiento San José es posible de ser utilizada en otros procesos para la determinación de la masa movilizada o bien en casos de la presencia de inestabilidad, ya que mediante la obtención de la topografía original y la posible superficie resultante se puede determinar la extensión hipotética que pudiera abarcar este proceso y el alcance que tendría la movilización de su masa.

Referencias

- Alcántara Ayala, I. (1999) **The Torviscon, Spain, Landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate**. *Geofísica Internacional* (1999), Vol. 38, Num 3, pp.175-184
- Alcántara Ayala, I. Zamorano, J. Lugo, J. Franco, O. (2002) **Estudio morfométrico y geomorfológico aplicado a procesos de ladera en la Sierra Norte de Puebla**. GEOS Unión Geofísica Mexicana. México
- Autodesk (2000) **AutoCAD Land Development Desktop**. User's Guide
- Brabb, E E (1984) **Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping**. Proc. Fourth International Symposium on Landslides, vol. 1. Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada, pp. 307-324
- Bromhead, E. N. (1986) **The stability of slopes**, Blackie and Sons, Surrey, U.K.
- Bloom, A. (1991) **Geomorphology, A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms**. Prentice Hall, New Jersey. 532 p.
- Bjorke, J (2002) **Efficient representation of digital terrain models: compression and spatial correlation techniques**. *Computers and Geosciences* 28 (2002) pp. 433-445
- Borja, R. (2003) **Análisis de la susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla**. Tesis-UNAM, México.
- Carrarra, A. (1991) **GIS techniques and statical models in evaluating landslide hazard**. *Earth Surf. Processes Land-forms* 16, 427-445
- Carrarra, A (1995) **GIS-based techniques for mapping landslide hazard**. (<http://deis158.deis.unibo.it>).
- Carso, M. (1971) **An application of the concept of threshold slopes to the Laramie Mountains Wyoming**. In: Brunnsden, D. Slopes form and processes, Inst. Of Bristh Geographers, Special Pub. 3, pp 178.
- Costa-Cabral, M. (1994) **Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over Hillslopes for computation of contributing and dispersal areas**. *Water Resources Research*, 30 (6), pp 1681-1962.
- Clerici, A (2002) **A procedure for landslide suceptibility zonation by the conditional analysis method**. *Geomorphology* 48 (2002) pp. 349-364
- Chandler, R. (1982) **Lias clay slope sections and their implication for the prediction of limiting of threshold slope angles**. *Earth Surface Proceses and Landforms*, 7, pp 427-438.
- Chorley, R. (1967) **Models in geomorphology**. In: R. J. Hagget (eds) *Models in Geography*, Methuen, London, pp. 59-96.
- Dai, F. C. (2002) **Landslide characteristics and slope instabilirty modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong**. *Geomorphology* 42 (2002) pp. 213-228
- Dietrich, W. (1986) **Hollows, colluvion and landslides in soil-mantled landscapes**, Chapter 17 in *Hillslope Process*, edit by A.D. Abrahams, Allen and Unwin Boston, pp 361-388

- Fairfield, J. (1991) **Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models**. Water Resources Research, 27 (5), pp 709-717.
- Flores Lorenzo, P. (2002) **Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Tezuitlan, Puebla**. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía. UNAM México
- García Romero, A (1993) **Análisis geomorfológica de la distribución de los riesgos naturales en la delegación Cuajimalpa de Morelos, D.F.** Tesis-UNAM México.
- Graff, L and Usery, E. (1993) **Automated classification of generic terrain features in Digital Elevation Models**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59 (9), 1409-1417
- Gritzner, M (2001) **Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho**. Geomorphology 37 (2001) pp. 149-165
- Hammond, C., (1992), "Level I Stability Analysis(LISA) Documentation for Version 2.0," General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- Harvey, D (1967) **Explanation in Geography**. Edward Arnold, London
- Iwahashi, J and Kamiya, I. (1995) **Landforms classification using the Digital Elevation Model with the skills of image processing – mainly using the Digital National Land Information**. Geoinformatics 6 (2), 97-108.
- Iwahashi, J. (2001) **Landforms analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan**. Computers and Geosciences 27 (2001) 851-865.
- Jenson, S. (1988) **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54 (11), pp 1593-1600.
- Lee, Saro (2002) **Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea**. Geomorphology 1153 (2002) Article in Press.
- Lugo, J. (1991) **Elementos de Geomorfología aplicada (Metodos Cartograficos)**. UNAM. México. 191p.
- Mark, D. M: (1998) **Network models in geomorphology, Chapter 4 in Modelling in Geomorphological Systems**, Edited by M. G. Anderson, John Wiley, pp. 73-97.
- Miller, D. J. (1995) **Coupling GIS with physical models to assess deep-seated landslide hazards**. Environ. Eng. Geosci. 1 (3), 263-276
- Montgomery, D. and Dietrich, W. (1994) **A physically model for the topographic control on shallow landsliding**. Water Resources Research, 30 (4), pp 1153-1171
- Moore, I. (1993) **Digital terrain modeling: a review of hidrological, geomorphological, and biological applications**. In: Beven, K. y Moore, I. D. (eds) Terrain Analysis and distributed modeling in hydrology, John Wiley and Sons, Chichester, 247 pp.
- O'Callaghan, J. (1984) **The Extraction of Drainage Networks From Digital Elevation Data**, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28, pp328-344.
- Okimura, T. (1985) **A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer**. Nat. Disaster Sci. 7, 41-51

Pack, R. T. (2001) **SINMAP user's manual**. Utha State University

Quinn, P. (1991) **The prediction of Hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models**. Hydrological Proceses, 5 , pp 59-80.

Selby (1982) **Hillslope materials and processes**. Oxford University Press. 264p.

Skempton, A. W. (1957) **Stability of natural slopes in London Clay**, Proc. 4th Int. Conf. On Soil Mechanics. Foundation Engineering, London, 2, pp. 378-381.

Sparks, B. (1990) **Geomorphology**. Longman and Scientific and Technial. New York. 561p.

Sidle, R (1985) **Hillslope stability and land use**. Water Resources Monograph 11 edition. American Geophysical Union. Pp. 140

Tarboton, D. G. (1997) **A new meted for the determination of flow direccctions and contributing areas in grid digital elevation models**. Water Resources Research, 33 (2), pp 309-319.

Von Bertalanffy, L (1978) **Tendencias en la teoría general de sistemas**. Ed. Alianza Madrid España

Capítulo 5. Riesgos por procesos de remoción en masa en el Municipio de Tlatlauquitepec

La determinación de los riesgos por procesos de remoción en masa constituye un elemento más dentro del análisis de estos fenómenos, ya que por medio de esta información se puede plasmar el estado de riesgo que guarda la población ante un peligro natural. Para determinar el grado de riesgo es necesario contar no solo la información del índice de susceptibilidad, sino también información de tipo socioeconómica, de tal manera que con estos parámetros sea posible la determinación del grado de riesgo asociado a los procesos de remoción en masa.

Una vez obtenido el índice de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, el siguiente paso es la elaboración del índice de vulnerabilidad para el municipio, para lo cual es necesario considerar los aspectos socioeconómicos que presenta el espacio geográfico analizado.

5.1 Características socio-económicas

Población

El municipio de Tlatlauquitepec según el XII Censo de Población y Vivienda del año 2000, contaba con una población total de 47,106 habitantes, siendo el 0.98% del total del estado. Este municipio del 1980 al 2000 presentó un crecimiento poblacional de 3.2 % anual. Del total de la población, el 25% era considerada como urbana y el 75% como rural. Esto debido a que solo en el municipio se consideran como localidades urbanas a la cabecera municipal (ciudad de Tlatlauquitepec) con una población de 8,935 habitantes y Xonocuautila con 2,622 habitantes; las cuales abarcan este 25%.

En su distribución por sexo el 48.35% corresponde a hombres y el 51.65% a Mujeres. En cuanto a los rangos de edad, el que abarca la mayor cantidad es el de 0 a 15 años con el 42.8%, contrario al de menor cantidad, que es el de 65 años y más, con el 15.0% de la población total.

Según datos de INEGI (2000) en la distribución de la población por ocupación se tienen que 14,762 habitantes (31.33% del total) constituían a la Población económicamente activa y el 68.67% representaba la población económicamente inactiva.

Del total de la población económicamente activa 14,667 habitantes representaban a la población económicamente activa ocupada, de esta según su distribución en cuanto a sectores de actividad, se tiene que el 52.2% del municipio se agrupa en las actividades primarias, las cuales según INEGI incluye a las actividades como agricultura, ganadería, silvicultura, caza y pesca. El sector secundario que comprende actividades como la minería, extracción de petróleo y gas, industria manufacturera, electricidad y agua, y construcción esta representada por el 17.76 %. El sector terciario ocupa el 28.69% de la población económicamente activa ocupada, la cual abarca actividades como el comercio y servicios.

Educación

En lo relacionado a educación, el municipio de Tlaltlauquitepec cuenta con servicios de educación preprimaria, primaria, secundaria y bachillerato a escala local.

Del total de población de 15 años y más el 43.7% es analfabeta, de este mismo rango de población el 18 % no ha tenido ningún tipo de instrucción, el 26% no completó sus estudios de primaria y el 4.54% no concluyó estudios de secundaria. El nivel de instrucción promedio de la población es 5° de primaria, aunque existe un cierto número de población que asiste a secundaria y bachillerato en menor grado.

El municipio cuenta con un total de 191 centros educativos , 79 de educación primaria, 27 de secundaria, 3 de profesional medio, 2 de normal y 3 de bachillerato, de los cuales las de carácter federal y estatal son las que ocupan el mayor porcentaje de centros. Hasta el año de 1998 se contaba con una planta de 738 profesores distribuidos de modo que había 120 en preescolar, 335 en primaria, 124 en secundaria, 32 en profesional medio, 72 en normal y 55 en bachillerato.

El municipio cuenta además con una biblioteca municipal, Casa de Cultura dentro de la misma biblioteca, una oficina de servicios educativos y una casa del DIF para educación preescolar.

Vivienda

El municipio en el año 2000, según datos de INEGI, contaba con un total de 9,689 viviendas; de este total 9,314 eran viviendas particulares o sea que no se incluye a aquellas denominadas como viviendas colectivas o albergues. El promedio de habitantes por vivienda particular era de 4 a 5 habitantes, aunque en algunas localidades como Buena Vista alcanza un promedio de 7 habitantes.

Del total de viviendas particulares habitadas en el municipio el 11% presenta paredes construidas con materiales ligeros o de desecho, aproximadamente el 25% presenta techos construidos por materiales ligeros y el 35.7% cuenta con pisos de tierra u otro material diferente al concreto.

Según datos del censo del año 2000, del total de viviendas particulares habitadas, el 20.81% no contaba con servicio de agua entubada, el 40% tenía servicios de drenaje conectados a tubería, en tanto que el 60% estaba conectado a otro tipo de desagüé como fosa séptica, barranca o grieta, río, lago o mar. El 60% de las viviendas particulares habitadas cuenta con servicio de energía eléctrica.

En su distribución por localidades un total de 32 pequeñas localidades cuentan con el servicio de agua potable y 11 con el servicio de drenaje y alcantarillado (INEGI, 1999).

Actividad económica

En cuanto a la distribución por sectores de producción, la mayor proporción de la población se agrupaba en el año 2000 en el sector primario, con un total de 52.2%, esto es reflejo de que las actividades más importantes del municipio son las de este sector, el 17.76% se agrupó en actividades secundarias y el 28.69% en el sector terciario.

Entre las actividades que caracterizan al municipio según el tipo de sector se encuentra:

Actividades primarias. Agricultura de granos como maíz, haba, café y trigo. Cultivo de frutales como durazno, naranja, ciruela, manzana, pera y aguacate. Hortalizas como la papa, follajes y cebada. Existe la ganadería de traspatio con especies como bovino, porcino, equino, mular, asnal y aves de corral. Se practica la pesca de autoconsumo y deportiva en la presa la Soledad con especies de carpa, escamola, lobina y carpa. Así como también se realiza la explotación forestal de especies maderables para actividad artesanal y artículos caseros.

Actividades secundarias. Dentro del municipio las actividades secundarias son pocas, se realiza la manufactura de prendas de vestir, la cual actualmente va en aumento. Se desarrolla trabajo de moldeado de maderas para artesanías, corcho y en pequeños locales se realiza el destazamiento de animales. La actividad minera es escasa en el municipio y actualmente se encuentra en decremento.

Actividades terciarias. Las actividades terciarias predominantes del municipio son las de servicios, representadas principalmente por restaurantes, venta de productos especializados, servicios de salud, educativos, bancarios, de autotransporte y de gobierno; cabe destacar que la concentración principal de este tipo de actividades se ha dado en la cabecera municipal y las localidades de Xonocautla, Mazatepec y Oyameles.

En lo que se refiere a ingresos, un total de 23.80% no recibía algún ingreso por su trabajo, el 29.30% percibía en promedio un salario mínimo como ingreso mensual y un 28.82% de 1 a 2 salarios mínimos mensuales. Esto nos da la perspectiva de que aproximadamente el 60% de la población económicamente activa ocupada del municipio recibe ingresos menores a dos salarios mínimos.

Servicios de Salud

En cuanto a los servicios de salud, el municipio de Tlaltlauquitepec cuenta con un Hospital General de la Secretaría de Salud con servicio de dos ambulancias, clínicas familiares del IMSS, ISSTE e ISSTEP, laboratorios clínicos, médicos generales y de especialidad, además de 47 clínicas periféricas donde se brinda atención primaria a la población. También cuenta con una unidad de la Cruz Roja con servicio de dos ambulancias.

El municipio en el año 2000 tenía una población de 37,621 habitantes que no contaban con servicios de salud, siendo un aproximado de 79.86% y solo el 20.14% estaba oficialmente registrado como derechohabiente de alguna institución de salud. De la población registrada como derechohabiente el 55.38% esta afiliado al IMSS y el 44.61% al ISSTE. En la localidad se tiene un registro de que existe un total de 714 personas con discapacidad, representando el 1.51% de la población total.

Infraestructura

El municipio de Tlaltlauquitepec se comunica con la ciudad de Puebla y Veracruz por medio de la carretera 129, perteneciente del ramal Amozoc-Teziutlán; existen otras vialidades menores dentro del municipio como son la carretera que comunica a la cabecera municipal con Zacapoaxtla y Zacatlan. Dentro del municipio existen diversas vialidades menores de carácter local como la carretera que comunica a la ciudad de Tlaltlauquitepec con las localidades de Mazatepec y Xonocuatla, la primera en constante reparación por estar frecuentemente afectada por procesos de remoción en masa.

Actualmente se encuentra en construcción una autopista que comunica a la ciudad de Zaragoza y Teziutlán, la cual cruza al municipio por la parte sur, pasando por las localidades de Xonocuatla y Gómez Oriente.

El municipio cuenta además con servicios internos de autotransporte, ya que las vías comerciales solo tienen una terminal en la cabecera municipal, de ahí que existan diversas líneas que se dirigen de la cabecera municipal a diversas localidades.

También se cuenta con 5 oficinas de correos, una oficina de red de telégrafos, red de servicios telefónicos por domicilio tanto local como de larga distancia y servicios bancarios, la mayoría de todos estos servicios están concentrados en la cabecera municipal.

Se cuenta además con la presa La Soledad, importante por el servicio de generación de energía eléctrica y de distribución de agua potable. Existen un total de 63 puntos de abastecimientos, de los cuales solo uno es pozo profundo y los 62 son manantiales de los cuales se extrae agua para consumo humano.

5.2 Calculo del Índice de Vulnerabilidad

5.2.1 Definición del índice de Vulnerabilidad

El calculo del índice de vulnerabilidad consiste en representar de manera sintética las condiciones de la población analizada, para lo cual es necesario bosquejar bajo cual definición de vulnerabilidad se trabajará.

Existen actualmente diversas definiciones de vulnerabilidad, cada una de éstas presenta variaciones propias de acuerdo con la tendencia u objeto de estudio de interés, pero su objetivo común es el tratar de integrar la variable social en el análisis de riesgos. El análisis de la vulnerabilidad tiene su justificación en función de que durante mucho tiempo la población ha interactuado con diversos peligros naturales, pero se le ha considerado en pocas ocasiones dentro del análisis de estos fenómenos.

Actualmente el estudio de la vulnerabilidad implica el análisis de diversos factores económicos y sociales que determinan que la población sea en menor o mayor grado vulnerable.

Según Smith (1996), la vulnerabilidad implica una medición que resulta de la combinación de las características sociales y la capacidad económica de la población, en su capacidad de solucionar los problemas resultantes de la presencia de cierto fenómeno perturbador.

Canon (1994) define a la vulnerabilidad como una condición de la población o individuos en función de sus características económicas y sociales en la que se desarrolla, además de su localización geográfica y sistema económico imperante, lo cual los hace más o menos vulnerables a ser afectados por un fenómeno natural.

La vulnerabilidad llega a ser diferencial según la escala a la que se analice, estos se ve también modificado por la estructura económica regional dentro de un mismo espacio geográfico.

Para la finalidad de este trabajo se utilizó la definición propuesta por Cannon (1994), por considerar además de la variables social y económica, a la localización geográfica y la escala en la que se desarrolla el análisis.

A partir de estas definiciones, el índice de vulnerabilidad se puede conceptualizar como el valor que representa a un grupo de indicadores específicos de ciertas localidades y que indica la condiciones de la población en su posibilidad de asimilar y mitigar los efectos o daños que pudiera originar un peligro natural.

5.2.2 Grupos de información utilizada

Para el análisis de vulnerabilidad del municipio de Tlatlauquitepec se tomaron en cuenta los aspectos más representativos del espacio social analizado: población, educación, empleo y vivienda. Dichos datos fueron obtenidos a partir de información estadística contenida en las bases de datos de los sistemas SINCE y CONTAR-ITER (2000), distribuidos por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Dicha información fue extraída tanto para localidades rurales como localidades urbanas.

Para el caso de las localidades urbanas, los datos fueron considerados en función de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) que constituyen al municipio, siendo un total de cuatro, tres correspondientes a la cabecera municipal y una a la población de Xonocuatla.

Un AGEB corresponde a un espacio geográfico delimitado por rasgos naturales o culturales, permanente y reconocibles en el terreno, con extensión convencional al interior del municipio. Esto permite la captación o la referencia de ciertos elementos de información y que zonifican una homogeneidad de características de la población (INEGI, 1998).

En el caso de las localidades rurales se obtuvo la información a partir de los listados de localidades rurales existentes en el municipio, para lo cual fue necesario hacer la selección de datos de aquellas que contenían valores posibles de analizar o que no concentrarán errores, obteniéndose un total de 66 localidades para el municipio de Tlatlauquitepec.

De los aspectos utilizados en el análisis de vulnerabilidad se utilizó aquella información que representa las condiciones de la comunidad como:

- *Población.* Se consideró a aquellas concentraciones de población por AGEB y localidad rural que pudieran presentar pocas posibilidades de mitigar los daños que pudiera provocar un fenómeno natural, por ejemplo la población con discapacidad.
- *Educación.* Se consideró a aquellas concentraciones de población que tuvieran las condiciones menos favorables de poder informar o informarse sobre las condiciones generales del municipio en caso de la presencia de un peligro natural, por ejemplo la población de 15 años y más analfabeta.
- *Empleo.* Para el caso de este grupo de indicadores se consideró a aquellos grupos de población que presentaran las condiciones más desfavorables en la posibilidad de mitigar y restablecerse económicamente de los daños que pudiera ocasionar un peligro natural dentro de la localidad, por ejemplo la población económicamente inactiva.
- *Vivienda.* Se consideró al número de viviendas particulares que presentaran condiciones desfavorables en la ocurrencia de un fenómeno que potencialmente pudiera ocasionar daños en los asentamientos humanos, por ejemplo el número de viviendas construidas con materiales ligeros.

El análisis para la determinación del grado de vulnerabilidad para un grupo de población se puede realizar tanto de manera cuantitativa como cualitativa, el procedimiento de manera cualitativa suele ser subjetivo ya que en este caso se realiza una clasificación de acuerdo a un criterio de percepción, y este puede ser variable en cuanto a la experiencia del investigador. En el procedimiento cuantitativo se debe realizar un estudio por pruebas estadísticas de n cantidad de variables para determinar un valor de vulnerabilidad, el cual debe de ser traducido a elementos comprensibles.

Cada una de las distintas metodologías en el cálculo del índice de vulnerabilidad debe de ser complementada con trabajo de campo, esto con la finalidad de ajustar los valores expresados en una realidad analizada.

La elaboración del índice de vulnerabilidad puede variar en función del peligro natural que se esté analizando, la finalidad del estudio analizado, la escala de análisis y destinatario de la información que se obtenga.

5.2.3 Metodología del índice de vulnerabilidad

A partir de la obtención de los indicadores extraídos de las bases de datos SINCE y CONTAR-ITER (2000) editados por INEGI, se ordenaron un total de 18 grupos de variables por 70 localidades que incluyen a los AGEB urbanos. A partir de la ordenación de los datos en una tabla se procedió a la aplicación del método estadístico de componentes principales. Este método involucra el cálculo de estadísticas básicas del grupo de variables (media y desviación estándar), con la finalidad de obtener los datos posibles de analizar. La técnica de análisis de componentes principales es comúnmente ocupada en la realización de topologías. En dicha técnica se obtiene la formación de familias de variables cuyo comportamiento o peso dentro de su grupo tiene alguna correlación con otros grupos de variable.

El principio de este análisis implica que en un espacio de n dimensión existen n cantidad de variables a analizar; en donde algunas de ellas pueden coincidir en importancia dentro del mismo espacio en escalas intra e interespaciales con otras variables. Estas coincidencias se consideran a partir de un sistema de referencias representadas por valores llamados componentes, donde cada uno es una dimensión en las que se agrupa el valor de la variación común entre variables, o sea son grupos de familias de variables correlacionadas (Kunz, 1988).

En los primeros valores o componentes se agrupan la mayor cantidad de varianza posible dentro del grupo de variables y objetos analizados.

Para poder manipular los datos y realizar el análisis se requirió la obtención de la estadística básica de la matriz de datos utilizada, la cual consistió en 18 columnas por 70

filas. De esta se obtuvo por cada variable la media y la desviación estándar, para posteriormente realizar una estandarización de valores. La estandarización consiste en una operación que se obtiene a partir de los valores de la media y desviación estándar, la cual tiene como fin referir el conjunto de datos de cada una de las variables a su propia medida, medidos en desviaciones por arriba o por debajo de esta. De tal modo que los valores son independientes de las unidades de medida, con los cuales se pueden hacer cálculos y comparaciones (Kunz, 1988).

Posteriormente a la estandarización de valores, se obtiene una tabla de datos de características equivalentes a la original pero referida en otro plano de medidas. Una vez realizada la estandarización de valores se procedió a la aplicación de la técnica de componentes principales. Para el caso del análisis solo se tomo en cuenta el primer componente, en la cual se agrupo en la mayoría de los casos mas del 70% de las varianzas. A partir de los valores obtenidos se pudo agrupar los valores de las variables de acuerdo a su varianza, una vez realizado este procedimiento se efectuó la agrupación de los objetos analizados en clases.

5.2.4 Mapa de índice de vulnerabilidad para el municipio de Tlatlauquitepec

Para el municipio de Tlatlauquitepec se utilizaron un total de 3 clases de vulnerabilidad, las cuales fueron definidas en función de los valores que se obtuvieron del análisis estadístico, esta clases son alta, media y baja (Figura 5.1), las cuales son indicadores de un grupo de variables que expresan las características de la población (Cuadro 5.1).

Clase	Valor de vulnerabilidad	Característica
1	Baja	Localidades que donde se concentra la población que presenta las condiciones menos favorables de ser afectados por un desastre natural.
2	Media	Localidades que cuentan con población con condiciones desfavorables ante un desastre natural.
3	Alta	Localidades que concentran población donde la afectación por un desastre natural tiene una posibilidad de ser mayor debido a que no se cuentan con los recursos suficientes para atención inmediata en caso de desastre.

Cuadro 5.1. Clases designadas según su valor de vulnerabilidad.

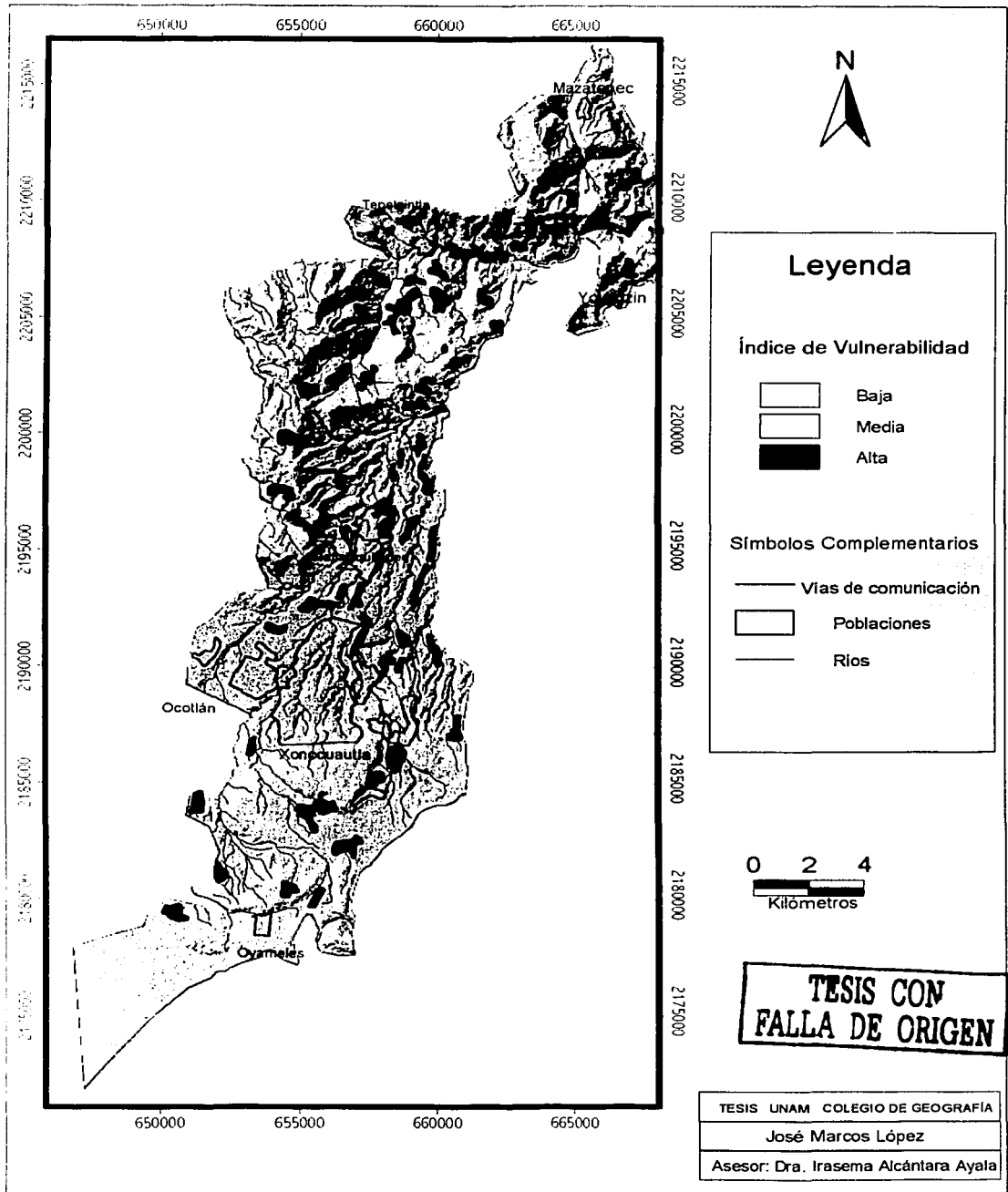


Figura 5.1 Mapa de Índice de vulnerabilidad del municipio de Tlatlauquitepec.

Vulnerabilidad Baja

Las localidades que se agrupan dentro de esta clase corresponden a aquellas que dentro de una escala intramunicipal presentan las condiciones mas favorables en cuanto a la posibilidades de mitigar los daños que pudiera ocasionar un peligro natural, esto reflejado en servicios de salud, comunicaciones, educación, además de ser aquellas donde la población cuenta con todos los servicios básicos en cuanto a servicios e infraestructura y concentrar una la menor cantidad de población que presenta condiciones precarias o mas vulnerables a ser afectadas durante un desastre. Para el caso del municipio de Tlatlauquitepec se trata en su mayoría a los AGEB's urbanos que representan a la ciudad de Tlatlauquitepec y Xonocuaulla (Figura 5.2 y 5.3).

La ciudad de Tlatlauquitepec se caracteriza por ser la cabecera municipal, sitio donde se concentran la gran mayoría de bienes y servicios, en esta se concentran todas las instituciones que en caso de un desastre prestarían ayuda a la población mas vulnerable, además de que las condiciones de vivienda, salud y empleo son mas favorables dentro de una escala intramunicipal, lo cual le da una condición de vulnerabilidad baja dentro del municipio.

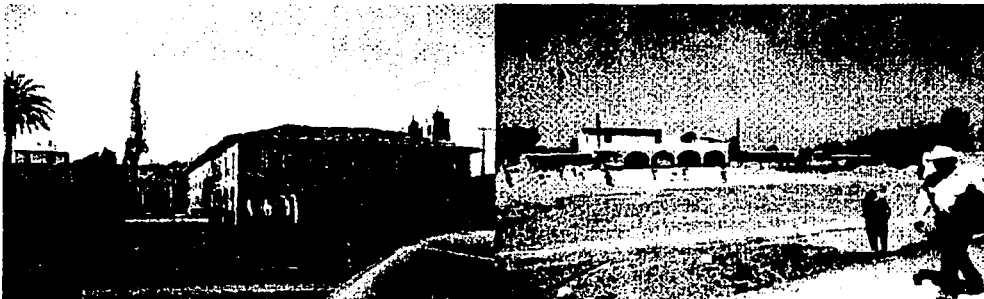


Figura 5.2 y 5.3 La Ciudad de Tlatlauquitepec (izquierda) y Xonocuaulla (derecha) presentan los valores mas bajos de vulnerabilidad dentro del municipio.

También dentro de este rango se ubican localidades como Oyameles, Ocotlán, Mazatepec y Tatauzoquico, las cuales además de contar con la mayoría de los servicios básico como agua entubada, drenaje, electricidad, entre otros, están comunicada por medio de vías de tipo primario y presentan las condiciones favorables de poder prestar

atención en caso de un desastre a la población vulnerable. Cabe destacar que localidades como Oyameles, Ocotlán y Mazatepec, no son consideradas como AGEB's urbanos por INEGI aunque cuentan con servicios e infraestructura semejantes a aquellos que se les asigna esta categoría.

Vulnerabilidad Media

Esta clase indica a aquellas localidades que presentan condiciones que no son altas, ni bajas dentro de su posibilidad de mitigar los daños que pudiera causar un fenómeno natural, ya que cuentan con servicios e infraestructura pero no en la proporción que se presenta en las grandes concentraciones de población como las localidades de ciudad de Tlatlauquitepec y Xonocuautila. Para el caso de las localidades de presentan los valores de vulnerabilidad media, se caracterizan por ser localidades que presentan condiciones desfavorables en cuanto a servicios de salud ya que estos son brindados por medio de clínicas de la Secretaria de Salud que solo prestan servicios de primera atención, los servicios distribuidos a viviendas son los básicos y en algunos casos algunos no han sido cubiertos en su totalidad, las vías de comunicación son principalmente de tipo de terracería y se conectan a las carreteras de tipo local.

En esta clase de vulnerabilidad se ubican las localidades de Plan de Guadalupe, Gómez Oriente, Gómez Sur y Tepeteno de Iturbide, las cuales se encuentran cerca a las localidades de baja vulnerabilidad; en este caso su valor esta relacionado con la cercanía e influencia que ejerce la cabecera municipal, y que ha provocado que se cuente con los servicios básicos de infraestructura (Figura 5.4 y 5.5).

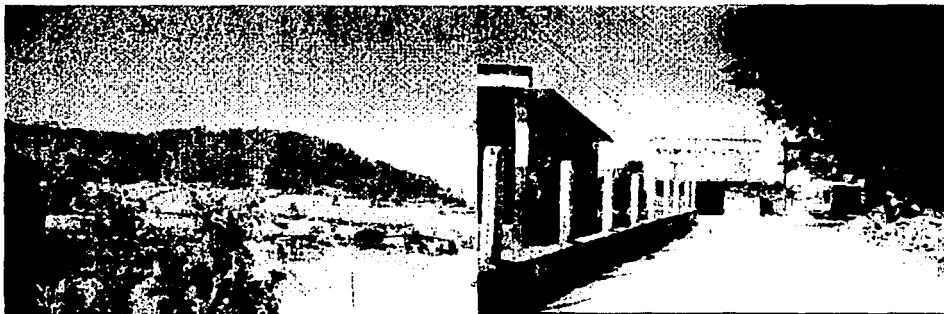


Figura 5.4 y 5.5 Las localidades de Gómez Oriente (izquierda) y Tepeteno (derecho) presentan valores medios de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad Alta

Esta clase corresponde a aquellas localidades que presentan condiciones mas desfavorables en la probabilidad de mitigar los daños que pudiera ocasionar un fenómeno natural dentro de una escala intramunicipal, ya que no cuentan con servicios básicos e infraestructura que les permita movilizarse en el caso de la presencia de un fenómeno natural potencialmente dañino.

Dentro de las características que caracterizan a estas localidades esta: falta de alguno o varios servicios básicos, vías de comunicación principalmente de terracería, servicios de salud brindados en días determinados y de atención primaria, además de distribución dispersa de la población con viviendas en su mayoría de materiales precarios y que no cuentan con un trabajo fijo o no perciben ingresos.

Dentro de esta clase se ubican todas las demás localidades restantes, entre las que son características de esta clase están: El Canal, Chillistipan, San José Chagchaltzin Chicuaco, Mecalucan, Xomiaco, Tamalayo, La Unión, Yoloctizin, San Antonio, Loma de la Yerba, Tunel Dos, Tepetzintla y Ahuatamimilol, por mencionar algunas. Estas presentan características de alta concentración de viviendas con condiciones precarias, la vías de comunicación principales son de terracería o pavimento en malas condiciones, falta de infraestructura de salud y servicios básicos como agua entubada y drenaje (Figura 5.6 y 5.7).

Dichas localidades presentan una concentración preferencial en la porción norte-centro del municipio, localizándose en las partes altas de las laderas montañosas, por lo que la falta de servicios e infraestructura es evidente, y por ende también su grado de vulnerabilidad es alto. Otro grupo de localidades se encuentra también concentrado en la porción sur del municipio, localizándose en las áreas pertenecientes a la caldera de los Humeros y los derrames basálticos.

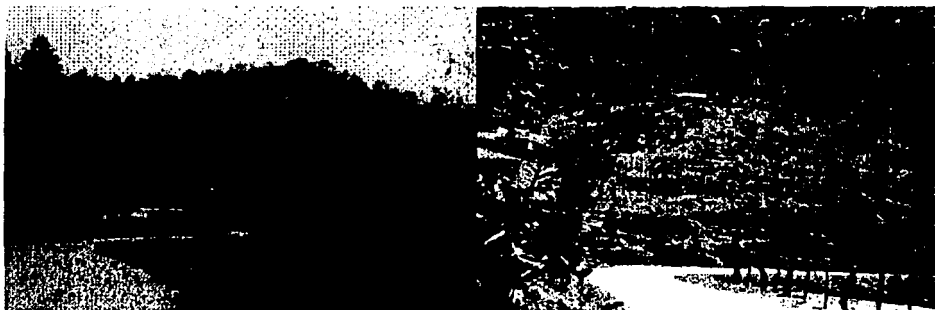


Figura 5.6 y 5.7 Las localidades de La Unión (izquierda) y San Agustín Chagchaltzin (derecha) son algunas de las localidades con valores altos de vulnerabilidad.

La concentración de los índices de vulnerabilidad sigue en el municipio un arreglo preferencial, ya que en la zona centro se concentran localidades con vulnerabilidad baja y media, en cambio en las zonas norte y sur se concentra la mayor cantidad de localidades de vulnerabilidad alta, exceptuando a las localidades de Mazatepec y Oyameles, ubicadas al norte la primera y en el sur la segunda.

Las áreas restantes del municipio en las que no existen registros de asentamientos humanos, no son indicativas de que no exista vulnerabilidad, en este caso se les asignó un valor bajo, debido a que no se tienen registros oficiales de concentraciones de población.

5.3 Riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Tlatlauquitepec

5.3.1 Definición del mapa de riesgos

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El análisis de riesgos de un espacio determinado implica tener que interactuar con variables tanto del medio físico como social, este último es expresado por medio de la vulnerabilidad de la población, en tanto que el medio físico se expresa por medio de la información del mapa de peligros.

En el caso de esta investigación, la definición de riesgos que se utilizó es la propuesta por Smith (1996) en la cual un riesgo es definido como la exposición de la población a un determinado peligro, este a menudo considerado en combinación con otras causas o fenómenos que pueden generar la probabilidad de pérdidas tanto físicas como humanas.

El grado de riesgo es considerado en algunas ocasiones como una consecuencia de la interacción de la sociedad con diversos peligros, el cual puede variar de acuerdo con la vulnerabilidad que presente la población.

Para el caso de los procesos de remoción en masa Crozier (1989) define al riesgo como la probabilidad de la ocurrencia de un fenómeno de gran magnitud en combinación con la posibilidad de generar daños en la población. En este sentido es necesario identificar cuales son los elementos que nos permitirán obtener el riesgo total, y estos elementos deben de estar expresados en las mismas unidades para determinar el riesgo.

5.3.2 Elementos del mapa de riesgos

En el análisis de riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Tlatlauquitepec se tomaron en cuenta los siguientes elementos:

- Mapa de peligros
- Mapa de vulnerabilidad

Mapa de peligros a procesos de remoción en masa

Este mapa es obtenido a partir del mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, es este caso se reclasificaron los valores del factor de seguridad en función del grado de estabilidad (Figura 5.8), obteniéndose tres clases (Cuadro 5.2):

Cuadro 5.2 Valores utilizados en el mapa de peligro según su condición a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Clase	Valor de peligro	Características
1	Bajo	Sitios donde la probabilidad de afectación por procesos de remoción en masa es baja.
2	Medio	Sitios donde la probable afectación por procesos de remoción en masa es alta.
3	Alto	Sitios en donde es muy alta la probabilidad de ocurrencia y afectación por procesos de remoción en masa.

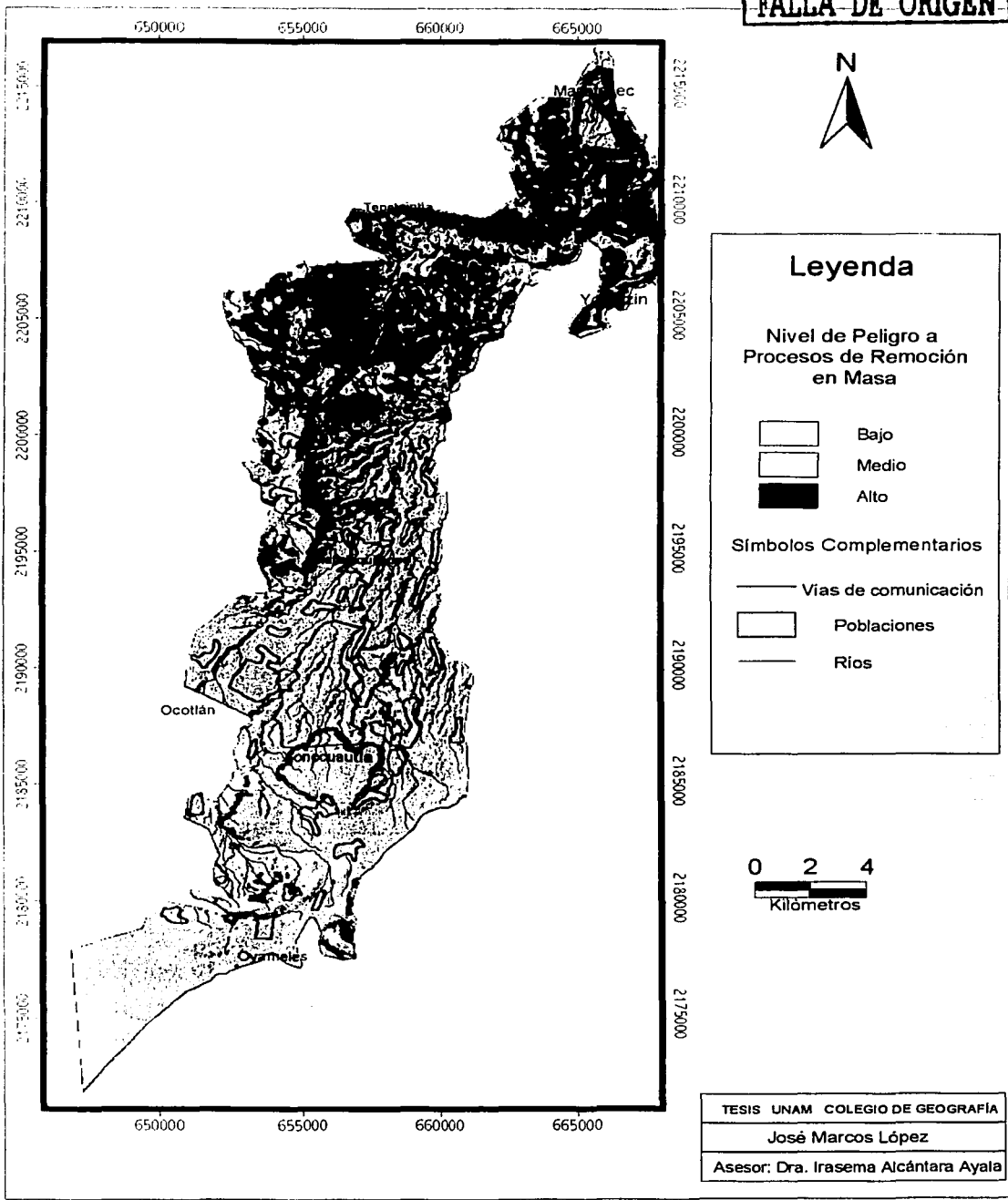


Figura 5.8 Mapa de nivel de peligro a procesos de remoción en masa del municipio de Tlatlauquitepec.

Peligro Alto. Coincide con los valores de inestabilidad dentro del mapa de susceptibilidad, corresponde a aquellas zonas donde la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa es muy alta, debido a las condiciones físicas que presenta el relieve a partir de elementos como geología, pendiente y estado de los materiales.

Peligro Medio. Corresponde a las zonas donde la ocurrencia de un proceso de remoción en masa medio, donde existen condiciones de inestabilidad para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, además de ser una zona transicional entre los sitios de estabilidad y los de presentan una alta inestabilidad. Esta clase coincide con las zonas de casi-estables dentro del mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Peligro Bajo. Indica las zonas donde la ocurrencia de procesos de remoción en masa es baja esto debido a que las características como tipo de suelo, pendiente, litología y estado de los materiales permiten que la ladera presente estabilidad, en este caso estos valores coinciden con la zona de estabilidad dentro del mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Mapa de vulnerabilidad

El mapa de vulnerabilidad nos indica las condiciones de la población en la posibilidad de mitigar los daños que pudiera causar la presencia de un peligro natural.

En este caso el mapa fue desarrollado en el apartado anterior, y se obtuvieron las clases siguientes.

Vulnerabilidad Alta.- Indica las localidades en condiciones desfavorables en la posibilidad de mitigar los daños que pudiera causar un peligro natural, debido a que la población no cuenta con los elementos suficientes para restablecerse de un desastre o la concentración de población vulnerable es muy alta.

Vulnerabilidad Media.- Indica a aquellas localidades que presentan condiciones medias en cuanto a las posibilidades de brindar atención a la población vulnerable, además de concentrar población vulnerable.

Vulnerabilidad Baja.- Muestra a las localidades que presentan condiciones favorables en la posibilidad de mitigar lo efectos dañinos de un peligro natural o que las condiciones de vida de la población les permite mitigar los daños que pudiera ocasionar un desastre.

5.3.3 Mapa de riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Tlatlauquitepec

Del cálculo de los dos elementos para evaluar el riesgos se procedió a hacer una sumatoria de valores de vulnerabilidad y peligros para obtener el mapa de riesgos (Figura 5.9).

Para el caso del municipio de Tlatlauquitepec fue necesario definir cada uno de los mapas de entrada en las mismas unidades y clases, esto con la finalidad de hacer una operación aritmética para obtener el riesgo a procesos de remoción en masa. Una vez realizada esta suma, se definieron tres categorías o clases:

Riesgo Alto

Este rango indica las zonas donde la probabilidad de afectación en la ocurrencia de un proceso de remoción en masa es alta debido a sus condiciones socioeconómicas y por las características del relieve que se expresan por medio del índice de estabilidad de laderas.

En este rango se ubican localidades como La Cumbre, Gómez Sur, Pablogco y San Antonio. Estas localidades presentan valores de riesgo alto debido a que en el análisis de vulnerabilidad su valor fue alto y además en el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa se ubican en zonas donde el peligro es medio (Figura 5.10). Cabe mencionar que en estas localidades durante el desastre de Octubre de 1999 no se tuvo registro de algún proceso de remoción en masa, aunque esto no es indicativo de que no pudieran existir estos tipos de procesos en dichos lugares, ya que el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa refleja que existe un estado de inestabilidad en la zona, pero que debido a diversas causas no ha tenido impacto en las localidades asentadas. Estas localidades se ubican dentro de las regiones morfogenéticas

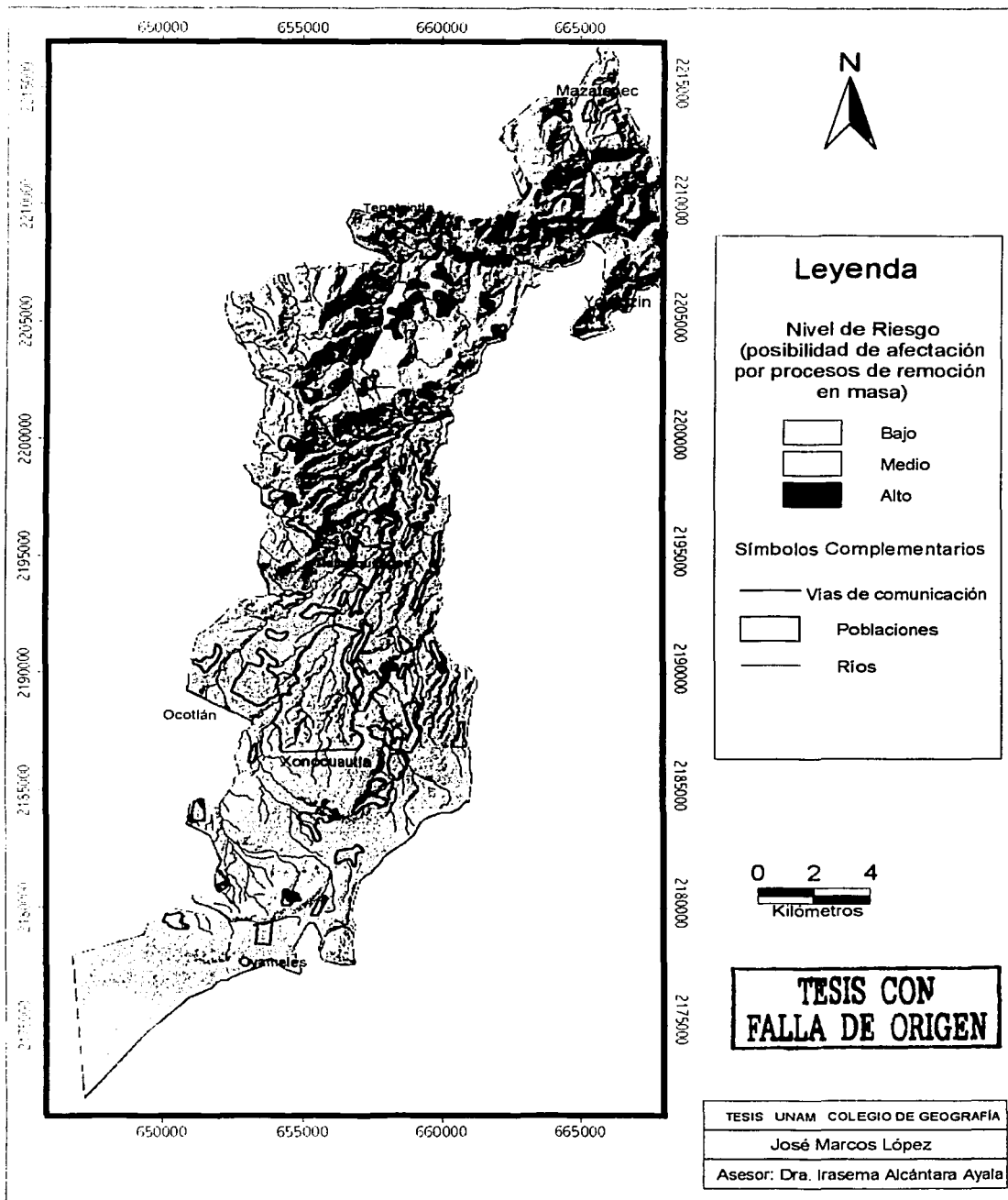


Figura 5.9 Mapa de riesgos a procesos de remoción en masa del municipio de Tlaltlauquitepec

de rampa de tobas y piroclastos, también se encuentran en los bordes de los domos de lava, que son sitios donde los desniveles son de más de 100 metros y zonas donde hay contactos litológicos entre dos tipos de materiales.



Figura 5.10 La localidad de Gómez Sur presenta un valor alto de riesgos, esta se ubica al sur del municipio.

Dentro de la cabecera municipal existe un AGEB con un valor de riesgo alto, esto debido a que se localiza en la única parte de la cabecera municipal que presenta un valor alto de susceptibilidad a procesos de remoción en masa y que a su vez dentro del análisis de la vulnerabilidad observo un valor alto. Esta zona coincide con una porción de la rampa piroclástica que se está fuertemente disectada por dos valles erosivos. Dentro de esta zona que se ubicada al norte de la ciudad de Tlaltlauquitepec se presentan asentamientos humanos con condiciones precarias y nivel de servicios bajos, además de que se encuentran asentados en valles erosivos que durante Octubre de 1999 fueron afectados por procesos de remoción en masa (Figura 5.11).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.11 Zona norte de la cabecera municipal que presenta valor alto de riesgo.

Localidades como Tepehican, San José Chagchaltzin, San Agustín Chagchaltzin, Chililistipan, Tamalayo, Calacatepec, Macuilquila, Chiacuaco, Tepetzintla, Coateczin, Tunel Dos, Jilotepec, Ahuatamimilol y Zapotitan, presentan valores altos de riesgo, debido a que sus condiciones de vulnerabilidad son altas, reflejado en que cuentan con pocos servicios e infraestructura para mitigar los daños que pudiera causar algún peligro natural (Figura 5.12, 5.13 y 5.14). En estas localidades coinciden además con aquellas en que hubo una afectación directa por procesos de remoción en masa en Octubre de 1999, entre los daños principales que se presentaron están: destrucción de casas, infraestructura, caminos, cultivos y servicios.

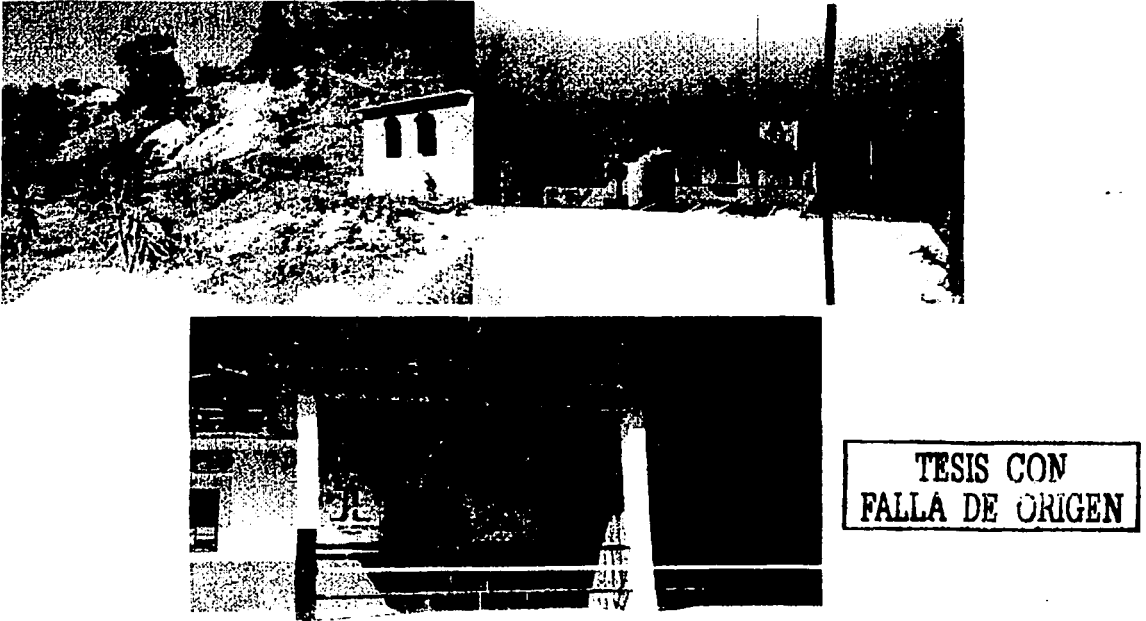


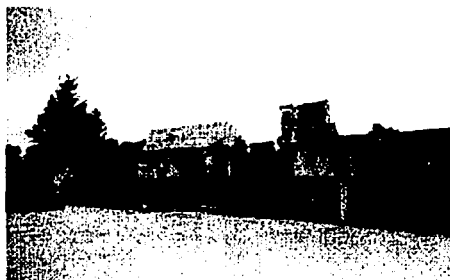
Figura 5.12, 5.13 y 5.14 Las localidades de Tepehican (izquierda), El Dos (derecha) y Coateczin (abajo) son algunas de las localidades con valores de riesgo alto.

Cabe mencionar que las localidades ubicadas en la porción centro-norte y norte del municipio presentan valores más altos de riesgos, ya que son altamente vulnerables y con valores altos de inestabilidad.

Riesgo Medio

Dentro de este rango se ubican las localidades que presentan condiciones de vulnerabilidad y peligro semejantes o en algunos casos uno de los valores es bajo y el otro medio o alto.

En esta clase se localizan la mayoría de la localidades del municipio ubicadas en la porción centro y sur. Localidades como El Retiro, Jalacinguito, El Duraznillo, San Antonio, Gómez Sur, El Carmen, El Mirador, Tochimpa, Amoloni, Contla, Xomiaco, Tzinacantepec, Pexmatlan, Jiliapa y Acamalota, presentan valores de riesgo medio (Figura 5.15, 5.16 y 5.17). La mayoría de los que se localizan en la porción sur presentan las características de tener valores de vulnerabilidad media y alta, pero que se encuentran en zonas de peligro bajo.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 5.15, 5.16 y 5.17 Localidades con valor medio de riesgo. El Mirador (izquierda), Xomiaco (derecha) y El Carmen (centro).

En el caso de las localidades ubicadas en la porción centro, son zonas de pendiente de $1^{\circ}30'$ a 6° , predominado en regiones morfogenéticas de derrames basálticos, rampa de tobas, rampa de piroclastos y en menor proporción en valles erosivos. Los procesos que ocurrieron en estas localidades se concentraron principalmente en aquellos asentamientos que se ubican en los valles erosivos, como lo son Tzinacantepec, El Carmen, Xomiaco, Pexmatlan, Contla y Tochimpa.

Para el caso de localidades como Jiliapa y Acamalota su valor de vulnerabilidad es alto pero se localizaron en zonas de estabilidad que denotaron un valor de riesgo medio.

Riesgo Bajo

Dentro de este rango se ubican localidades como Ocotlán, Oyameles, Xonocuatla, Mazatepec, Tatauzoquico y la porción centro y sur de la Ciudad de Tlatlauquitepec. En éstas los valores de vulnerabilidad son bajos, al igual que el valor de peligro o el peligro es medio y la vulnerabilidad media, son asentamientos en los que se cuenta con las condiciones favorables en el carácter socioeconómico y se encuentran en zonas donde el peligro por estos procesos es bajo (Figura 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21).



Figura 5.18 y 5.19 Localidades con valor bajo de riesgo. Oyameles (izquierda) y Mazatepec (derecha)

Localidades como Mazatepec, Oyameles, Xonocuatla y Ciudad de Tlatlauquitepec, se caracterizan por ser zonas donde el nivel de servicios e infraestructura es favorable y pueden ser útiles para brindar servicios de atención en caso de daños por procesos de remoción en masa o fenómenos hidrometeorológicos. Estas localidades están en zonas de estabilidad donde la ocurrencia de procesos de remoción en masa es baja.



Figura 5.20 y 5.21 Las localidades de Tlatlauquitepec y Xonocauitla, se caracterizan por presentar valores bajos de riesgo.

Las localidades que presentaron valores bajos de riesgo, coinciden con las localidades más importantes del municipio, y son las que albergan la mayor cantidad de servicios e infraestructura en el municipio. La localidad de Mazatepec es la única que se encuentra rodeada por una zona que presenta valores de riesgo alto y medio, esto se debe a que se ubica en un área pequeña con valor bajo de peligro y que por su distribución de servicios e infraestructura presenta una vulnerabilidad baja.

Un mapa de riesgos es un estado temporal dentro del espacio analizado, este puede variar según las diferencias que presenten tanto la población en su dinámica natural de crecimiento y movilidad, así como en el relieve, en el cual también pueden existir alteraciones. Un mapa de riesgos es válido solo para el fenómeno natural que se este estudiando y no es posible aplicarlo a otro tipo de fenómeno, ya que existe una diferente expresión de cada uno sobre la superficie terrestre.

En el municipio de Tlatlauquitepec existen además grandes extensiones de terreno donde no hay localidades, por lo que presentan valores de riesgo bajo. Estas se localizan principalmente en la porción sur y centro del municipio y corresponden principalmente a regiones de rampas de toba, piroclastos y derrames basálticos.

Dentro de la distribución de procesos observados según su valor de riesgos (Figura 5.22), se observa que 28 procesos ocurridos en Octubre de 1999 se localizaron en zonas de bajo riesgo, las cuales corresponden a la zona centro y centro-sur del municipio, y las regiones morfogénicas de rampa de piroclastos y tobas. Aproximadamente 78 procesos

se localizaron en zonas de riesgo medio y corresponde a la porción centro y norte del municipio. En esta zona se localiza la región más abrupta dentro del municipio, además de que estos procesos están en zonas cercanas a localidades que presentan valores altos. Un total de 21 procesos se localizaron en zonas de peligro alto y que en este caso coinciden con las localidades que presentaron valores altos de riesgo y que fueron afectados durante Octubre de 1999.

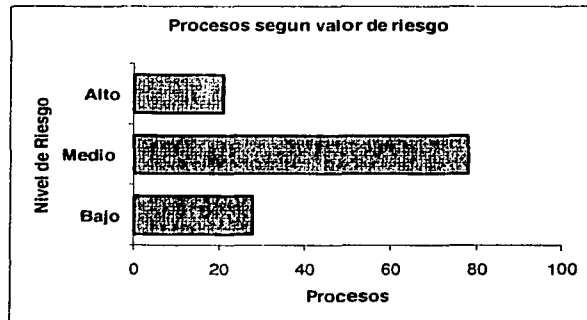


Figura 5.22 Distribución de procesos según valor de riesgo.

La distribución preferencial de los procesos en zonas de valor medio, muestra un relación directa con sitios que presentan valores altos de inestabilidad, ya que los primeros se localizan en zonas inhabitadas, pero cercanas a localidades que presentan valores altos de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Referencias

Cannon, T. (1994) **Vulnerability Analysis and the Explanation of "Natural" Disasters**. In Valey (1994). **Disasters, Development and Environment** Ed. John Wiley and Sons, pp.13-30

Crozier, M. J. (1989) **Landslides: Causes, consequences, and Environment**. Routledge Press, London, 252 pp.

INEGI (1998) **NIBA Niveles de Bienestar**. México

INEGI (1999) **Cuadernillo Estadístico Municipal. Tlatlauquitepec Estado de Puebla**. México.

INEGI (2000) **XII Censo General de Población y Vivienda**. Tabulados Básicos. México.

INEGI (2000) **SINCE Sistema de Consulta de Información Censal 2000**. México.

INEGI (2000) **CONTAR 2000 Sistema de Consulta de Tabulados y Bases de Datos. ITER Integración Territorial**. México

Kunz B, I (1998) **El uso de la estadística para la construcción de clasificaciones y regionalizaciones**. Serie Varia T-1, num. 11 Instituto de Geografía. México

Smith, K. (1996) **Environmental Hazards. Assessing risk and reducing disaster**. Ed. Routledge. London, Great Britain. 389 pp.

Conclusiones

La geología que conforma al municipio y su ubicación dentro del territorio nacional ha originado una zona transicional donde se encuentran materiales tanto de tipo volcánico, representados por el centro volcánico Los Humeros, y materiales de origen sedimentario pertenecientes a la Sierra Madre Oriental, los cuales constituyen regiones que por sus condiciones del material y formas determinan una alta influencia en la generación de procesos de remoción en masa de manera natural, siendo la zona más representativa la ubicada al centro-norte y norte del municipio. Dentro de éstas zonas los contrastes en cuanto a materiales, formas y relieve son altos dentro un área reducida, esto ha generado condiciones particulares para la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Los tipos de materiales en los que preferencialmente se desarrollaron los procesos de remoción en masa en el municipio son: laderas de material piroclástico con disección fuerte, complejos montañosos de esquistos densamente disectados, laderas montañosas de material volcánico, montañas de calizas plegadas densamente disectadas y rampa de flujos piroclásticos.

Los resultados obtenidos de la manipulación de la información del modelo digital de elevación y de atributos de los materiales en el SINMAP proporcionan una zonificación de las áreas que presentan un estado temporal de inestabilidad y son zonas potenciales para la generación de procesos de remoción en masa. La utilización de los modelos en SINMAP nos permiten realizar los cálculos necesarios para la zonificación de áreas potencialmente inestables a partir de la información contenida en el MDE, lo cual nos permite la manipulación de la información y obtención de resultados de manera rápida. La precisión de los resultados que se obtengan de la utilización del modelo estarán en función de las dimensiones del área de estudio y la resolución esperada.

La validez de la utilización de SINMAP para el municipio de Tlatlauquitepec, se apoya entre otras cosas en la existencia de dos trabajos realizados sobre inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla, en los cuales se han obtenido resultados confiables en cuanto a la determinación de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa y los riesgos a estos. En el caso de este trabajo los resultados confirman la veracidad de los valores obtenidos, ya que ajustaron a la realidad de los sitios que fueron afectados

durante octubre de 1999 y la localización de otros que actualmente presentan problemas de inestabilidad.

Las zonas que se obtuvieron como inestables para el municipio de Tlatlauquitepec corresponden directamente con aquellas donde la ocurrencia de procesos de remoción en masa es frecuente y que en octubre de 1999 resultaron altamente dañadas por este tipo de fenómenos. La obtención del mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, además de haber servido para corroborar las zonas que presentan problemas de inestabilidad, permitió la identificación de zonas potenciales donde existe la posibilidad de ocurrencia de procesos .

La información que se obtuvo de SINMAP no puede ser interpretada a partir de la simple manipulación del modelo digital de elevación, sino que requiere el conocimiento del territorio en estudio, además de la utilización de información de tipo geográfico y verificación de campo, que ayude a la comprensión de los resultados. En el caso del municipio de Tlatlauquitepec existieron procesos que se localizaron en sitios considerados como casi-inestables pero que ocurrieron en sitios modificados por el hombre, y cuyo impacto no se considera en este tipo de modelación.

La obtención de parámetros externos al SINMAP en el análisis de inestabilidad de ladera, permite corroborar, validar y complementar los resultados obtenidos de la manipulación de modelos. El mapa de concavidad-convexidad del terreno que muestra la configuración geométrica del relieve, nos permite entender la forma general que muestra las características particulares del relieve y cuáles de estas se asocian directamente a procesos de remoción en masa. La obtención del mapa de asociaciones o síntesis morfométrica permite entender que además de los valores manejados en el SINMAP, existen otros elementos morfométricos que se asocian a los procesos, los cuales nos ayudan a entender de manera clara la dinámica que presenta el relieve en la generación de procesos de remoción en masa.

El cálculo del volumen del deslizamiento San José permitió tener una idea del impacto generado por este tipo de procesos tanto de manera local, como regional, además de ser un ingrediente importante en el análisis del mecanismo de inestabilidad de laderas y su dinámica actual.

En el municipio de Tlatlauquitepec la ocurrencia de procesos de remoción en masa estuvo influenciada por las características de los materiales y la precipitación que se originó en octubre de 1999. En el caso de la precipitación, ésta funcionó como un detonante para generación de los procesos; debido a que el fenómeno hidrometeorológico que afectó a la región fue un caso extraordinario, que superó los valores máximos registrados con anterioridad.

El análisis de normales climáticas, valores diarios, información documentada y entrevistas con habitantes del municipio se infirió que en la región existe una recurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, que se asocia a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en magnitudes semejantes a las que se presentaron en octubre de 1999. Los procesos de remoción en masa dentro del municipio de Tlatlauquitepec, tienen una ocurrencia constante pero en pequeñas dimensiones, sin embargo sus efectos son más notorios en la presencia de fenómenos extremos de precipitación.

La vulnerabilidad dentro del municipio presenta una distribución preferencial, los valores bajos se concentran en las localidades de mayor importancia dentro del municipio y que además se ubican dentro de relieves poco accidentados. Los valores medios se ubican próximos a las zonas de valor bajo, estos presentan una influencia relativa de su cercanía a las localidades más importantes, además de que se hallan en la porción sur y centro. Las localidades de valores altos de vulnerabilidad se distribuyen principalmente en las zonas centro-norte y norte del municipio, se caracterizan por ser zonas donde el nivel de servicios e infraestructura son bajos y se ubican en la zona más abrupta del municipio, y que en consecuencia el acceso a éstas es muy difícil, lo cual condiciona en cierto grado su vulnerabilidad.

El análisis de riesgos a procesos de remoción en masa realizado a partir de los mapas de susceptibilidad y vulnerabilidad, indican que las condiciones de la población son diferenciales en la posibilidad de generarse daños causados por un desastre como el ocurrido en octubre de 1999. Esto se refleja en la concentración zonal de los sitios de riesgos. En la zona sur se concentran las localidades que presentan un valor medio de riesgos, debido a que son áreas con vulnerabilidad media y un peligro bajo. En la porción centro se ubican las localidades que presentan valores bajos de vulnerabilidad, y son

aquellas donde se da la mayor concentración de servicios e infraestructura, además del centro de gobierno del municipio. Los valores bajos de riesgo se concentran en las localidades que presentan un nivel de servicios e infraestructura bajos, además de que en su mayoría son aquellas que fueron afectadas durante el desastre de octubre de 1999. Estas localidades tienen la característica de ser las zonas donde los valores de inestabilidad son altos y la vulnerabilidad alta.

La utilidad de cada uno de los mapas elaborados para el análisis de riesgos por procesos de remoción en masa está en función de los resultados que nos muestra. El mapa de susceptibilidad nos muestra los sitios donde la ocurrencia de procesos es potencial, además de servir de ayuda para establecer zonas de monitoreo a procesos y determinar áreas prioritarias al estudio particular de procesos de remoción en masa. El mapa de vulnerabilidad indica las condiciones de la población ante la posible ocurrencia de un fenómeno natural dañino; a partir de éste se puede establecer un estado de prioridad de localidades que presentan las condiciones más desfavorables para mitigar los daños que se pudieran causar y la atención que se debiera prestar. El mapa de riesgos nos indica las localidades donde la afectación por parte de procesos de remoción en masa pudiera ser mayor, esto en función de sus características naturales del relieve y la población. La información que nos presenta este mapa sirve de base para el establecimiento de localidades prioritarias donde los daños son probables de concentrarse y que requerirían atención especial. Finalmente la aplicación de esta metodología permite establecer las zonas donde es indispensable fomentar una cultura de prevención, así como el monitoreo de la inestabilidad y la realización de estudios específicos.

La utilidad del presente trabajo se apoya en la continuidad de estudios sobre los procesos de remoción en masa para la Sierra Norte de Puebla, ya que esta fue una de las zonas más dañadas durante octubre de 1999, además de que no se cuentan con trabajos de índole geográfica sobre esta temática, ni a escalas de tipo municipal. La realización del estudio a un ámbito municipal nos permite plasmar información de utilidad para la elaboración de estrategias de prevención de desastres para las comunidades que abarca el municipio, contrario a un estudio de tipo regional, donde no se toma en límites administrativos.

