

Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla

Pablo Flores Lorenzo*
Irasema Alcántara Ayala*

Recibido: 17 de junio de 2002
Aprobado en versión final: 7 octubre de 2002

Resumen. Como consecuencia de las lluvias extraordinarias de octubre de 1999, varios desastres asociados a la inestabilidad de laderas ocurrieron en el estado de Puebla. De manera especial, Teziutlán fue fuertemente afectado por varios movimientos complejos, con mecanismos de deslizamiento y flujo. Uno de estos procesos de ladera sepultó varias casas, ocasionando la pérdida de más de 100 vidas humanas y cuantiosos daños a la infraestructura local.

Este trabajo presenta una caracterización de la génesis y dinámica de los procesos de ladera ocurridos en Teziutlán, e incluye la elaboración de un mapa geomorfológico. En este último, se identifican las principales unidades morfogenéticas, a partir de las cuales es posible distinguir las zonas de mayor ocurrencia de procesos de remoción en masa. Para ello se integraron registros de los eventos de octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, lo cual permitió evidenciar las zonas más susceptibles, en función de la composición de los materiales y la morfología. Los resultados muestran que alrededor del 90% de los procesos registrados en octubre de 1999 en esta zona ocurrieron en la unidad denominada rampa piroclástica.

Palabras clave: Mapa morfogenético, procesos de ladera, Teziutlán.

Morphogenetic cartography and Identification of slide processes in Teziutlán, Puebla

Abstract. A number of significant disasters associated to slope instability occurred in the state of Puebla as a consequence of the extraordinary precipitations of October 1999. Specifically, the municipality of Teziutlán was severely affected by complex landslides characterized by sliding and flowing mechanisms. Several houses were buried, causing over 100 deaths, and considerable damage to the local infrastructure as a result of a single event.

A characterization of landslide genesis and dynamics in Teziutlán is presented in this paper. It includes the elaboration of a geomorphic map, where the main morphogenetic units are identified to distinguish areas with a high mass-movement incidence. To this end, records of the events that took place in the Sierra Norte de Puebla in October 1999 were integrated, allowing to identify the most landslide-susceptible zones according of their morphology and materials' composition. The results indicate that around 90% of the October 99 landslides took place within the pyroclastic piedmont unit.

Key words: Morphogenetic map, mass-movement processes, Teziutlán.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa involucran el desplazamiento de distintos tipos de material ladera abajo, por lo que existen diferentes movimientos con una amplia variedad y complejidad. Entre ellos cabe destacar los flujos, caídas, deslizamientos, vuelcos, expansiones laterales y movimientos complejos (Alcántara, 2000). Este tipo de procesos ocurren cuando una ladera se vuelve inestable como resultado de la interacción de una serie de factores en el relieve, esto es,

cuando los materiales formadores de ladera (suelo, roca o detritos) se ven afectados por diferentes cambios, que pueden ser internos o externos.

La importancia del estudio de los procesos de ladera está determinada por el impacto que éstos pueden tener en la población, ya que el desarrollo de asentamientos humanos en sitios inadecuados o potencialmente inestables pone en riesgo la vida de los habitantes de dichas comunidades.

* Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: irasema@igiris.igeograf.unam.mx

En México, este tipo de fenómenos no son nuevos; en épocas anteriores se presentaban principalmente en lugares inhabitados y, hoy en día, con la expansión de asentamientos humanos, se han intensificado en gran medida. En la última década estos procesos han tenido una mayor recurrencia como consecuencia de intensas y prolongadas precipitaciones, que han afectado carreteras y otro tipo de infraestructuras. Entre los eventos recientes que más han perjudicado a nuestro país se encuentran el huracán *Pauline* en 1997 y la depresión tropical número 11, en 1999.

Inundaciones considerables y gran cantidad de procesos de ladera fueron desencadenados por las lluvias ocasionadas por *Pauline*, principalmente en los estados de Guerrero y Oaxaca; aunque no existen cifras oficiales, más de 100 personas perdieron la vida y se produjeron grandes daños. La depresión tropical número 11, originada en el Golfo de México durante el otoño de 1999, provocó cientos de procesos gravitacionales y más de 250 decesos en la Sierra Norte de Puebla, por lo que se le consideró como el mayor desastre de los años noventa en México (Bitrán, 2000). Uno de los municipios más afectados fue Teziutlán, donde se registró el mayor número de víctimas.

Teziutlán se encuentra localizado en un entorno donde el peligro por inestabilidad de laderas es evidente, de tal modo que es importante analizar las características geomorfológicas de la zona para entender la ocurrencia de este tipo de procesos.

En este trabajo se identifican las diferentes unidades morfogenéticas, para poder establecer una relación con la ocurrencia de procesos gravitacionales. Se hace una representación espacial mediante un mapa geomorfológico, en donde se observan la distribución y arreglo de los diferentes elementos que componen el relieve actual. Dicho mapa es un documento gráfico en el

que están representadas, de manera sintética, las formas del relieve de una determinada región, en este caso, del municipio de Teziutlán, lo cual permite analizar la incidencia de procesos gravitacionales y su relación con el tipo de morfología presente.

La cartografía geomorfológica elaborada es de tipo morfogenético. Ésta se refiere al origen de las formas del relieve terrestre, resultado de la interacción de los procesos endógenos y exógenos. Para ello, se identifican las principales características geológicas, se hace una evaluación de los elementos morfológicos más importantes, así como también, un análisis morfométrico.

La conjunción de dichos elementos permitió identificar las diferentes unidades morfogenéticas presentes en la zona y su influencia en la ocurrencia de procesos gravitacionales en Teziutlán.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

El área en estudio se localiza en la parte SE de la Sierra Norte de Puebla (Figura 1). El relieve presenta, como característica general, un descenso constante en forma de rampa, en dirección de sur a norte, mientras que en la parte norte contrasta con elevaciones montañosas. La altitud oscila entre los 300 y 2 280 msnm. Se localiza en la zona de transición de dos unidades fisiográficas: por una parte, el Cinturón Volcánico Transversal, y por otra, la Sierra Madre Oriental.

La geología local se caracteriza principalmente por la presencia de flujos piroclásticos de pómex provenientes de la caldera de Los Humeros, material de origen volcánico del Cuaternario, pertenecientes al Cinturón Volcánico Transversal. La descomposición de estos materiales rocosos, poco consolidados y con alto contenido de arcilla, ha originado la formación de suelos residuales, los cuales sobreyacen al material sedimentario del Mesozoico, plegado durante el Eoceno.

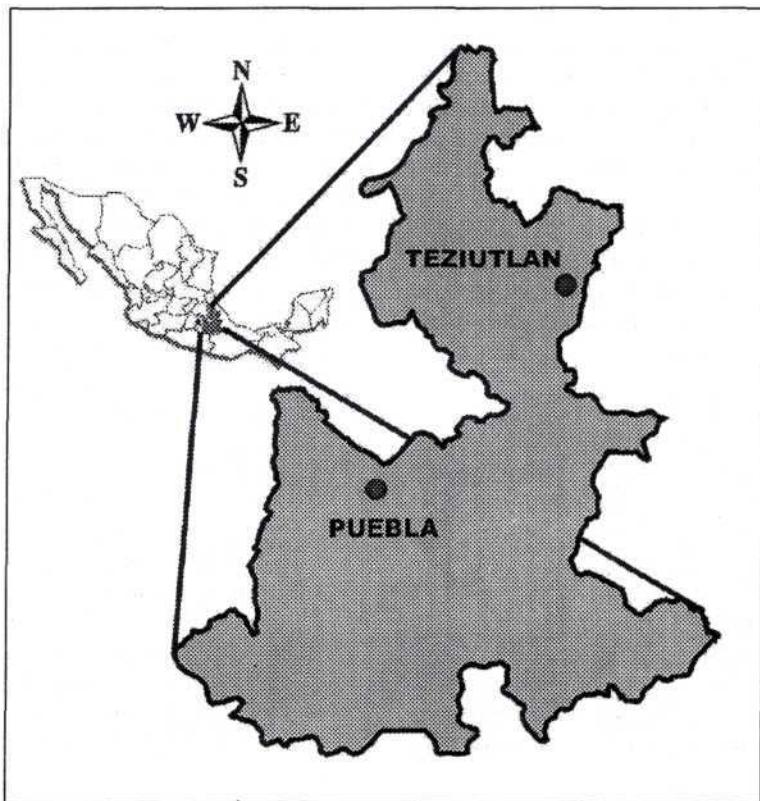


Figura 1. Localización del área en estudio.

El suelo que predomina es el andosol, derivado de los materiales volcánicos depositados durante la actividad volcánica de la zona; este tipo de suelos es muy ligero y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes. La zona está expuesta a procesos de remoción en masa, aunque por la constante humedad, crece toda clase de especies forestales características de esta zona.

El clima de esta área es templado con lluvias todo el año, con una precipitación media anual de 1 593 mm, siendo el mes más seco enero (52.1 mm) y el mes más húmedo septiembre (383.4 mm). La temperatura varía de 13.1°C, en enero, a 18.6°C, en mayo (García, 1981); esto significa que la variación de temperatura es mínima durante todo el año en Teziutlán, y sólo los cambios drásti-

cos se observan en la precipitación.

La población de Teziutlán es de alrededor de 75 000 habitantes (Bitrán, 2000). La migración rural-urbana ha dado origen a un rápido crecimiento de asentamientos humanos sobre las laderas en suelos inestables, el cual, combinado con pobres e inadecuadas construcciones, hace factible la presencia de procesos de ladera, a partir de factores desencadenantes, tales como eventos de precipitación extraordinaria o bien sismicidad.

INESTABILIDAD DE LADERAS EN TEZIUTLÁN, PUEBLA

Antecedentes

Los procesos de ladera no son recientes en

Teziutlán. En 1955 el huracán *Janet* ocasionó algunos procesos de remoción en masa en la zona, afectando las carreteras y las comunicaciones e, indirectamente, propiciando un desabasto alimentario. Sin embargo, en esa ocasión no hubo pérdidas humanas, ya que de acuerdo con Motte (2000), en esa época el municipio contaba con 20 000 habitantes y las casas no estaban asentadas al borde de las laderas, por lo que el peligro era mínimo y los procesos sólo se presentaban en lugares deshabitados.

Durante los primeros días de octubre de 1999, sobre las costas de Veracruz se presentó una depresión tropical, la número 11; ésta se mantuvo estacionada durante dos días, frenada por el frente frío número cinco proveniente del noreste. Tal situación y la influencia húmeda del Pacífico y del Golfo de México ocasionaron que se generara una gran cantidad de vapor de agua en la atmósfera y, como consecuencia, una intensa precipitación pluvial. Estas lluvias provocaron varios cientos de procesos gravitacionales,

afectando principalmente a Teziutlán, Totomoxtlá, Patla, Zapotitlán de Méndez y un tramo de la carretera Acuaco-Cuetzalan. El total de municipios afectados fue de 81, de los cuales 41 tuvieron daños mayores (Bitrán, 2000). Esta situación ocasionó la pérdida de 263 vidas, las cuales ocurrieron, en gran medida, en Teziutlán. Por otro lado, entre los efectos provocados, se presentaron daños a la infraestructura de carreteras, transporte, vivienda, salud, educación y a la agricultura (Tabla 1). El sector más dañado fue el de infraestructura y servicios con el 66.3% de los daños totales (Bitrán, 2000).

Precipitación

Teziutlán se caracteriza por tener un régimen pluvial de precipitación media anual de 1 593 mm. Sin embargo, a partir del análisis de la precipitación total anual de 1921 a 1980, se puede observar que, en distintos períodos, se ha sobrepasado esa cantidad (Figura 2a). En dicho lapso se han alcanzado ocho niveles de más de 2 000 mm, de

Tabla 1. Daños totales (en millones de pesos) ocasionados por las lluvias de octubre de 1999 en el estado de Puebla

Sector/Concepto	Daños directos	Daños indirectos	Total	Porcentaje del total
<i>Sectoressociales</i>	505.0	15.0	520.0	22.4
Vivienda	486.1	-	48.1	20.9
Educación	16.4	15.0	31.4	1.3
Salud	2.5	-	2.5	0.1
<i>Infraestructuray servicios</i>	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
<i>Sectoresproductivos</i>	190.7	35.0	225.7	9.7
Agropecuario, 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 (acuicultura)	7.8	-	7.8	0.3
<i>Atención a la emergencia</i>	-	38.6	38.6	1.6
<i>Total de Efectos</i>	2 235.7	89.6	2 325.3	100.0

Fuente: Bitrán, 2001.

los cuales tres se presentaron de 1954 a 1956 La máxima precipitación anual que se alcanzo en 1956 fue de 2 351 6 mm es decir casi el 150% de la media anual Esto nos permite identificar eventos extraordinarios que se han presentado frecuentemente Los meses mas lluviosos corresponden a septiembre y octubre (Figura 2b) Durante estos meses se han alcanzado precipitaciones por arriba de los 600 mm cuando el mes mas lluvioso es septiembre,

cuando la media anual es de 383 4 mm Durante este mes en 1944 se tuvo una precipitación de 1 072 8 mm lo que equivalió al 280% de la media anual (Tabla 2)

Como consecuencia de la depresión tropical numero 11 del Golfo de México en octubre de 1999 ocurrieron precipitaciones extraordinarias durante los días 4 (300 mm) y 5 (360 mm) equivalentes al 110% y al 135% de la media mensual (Figura 3)

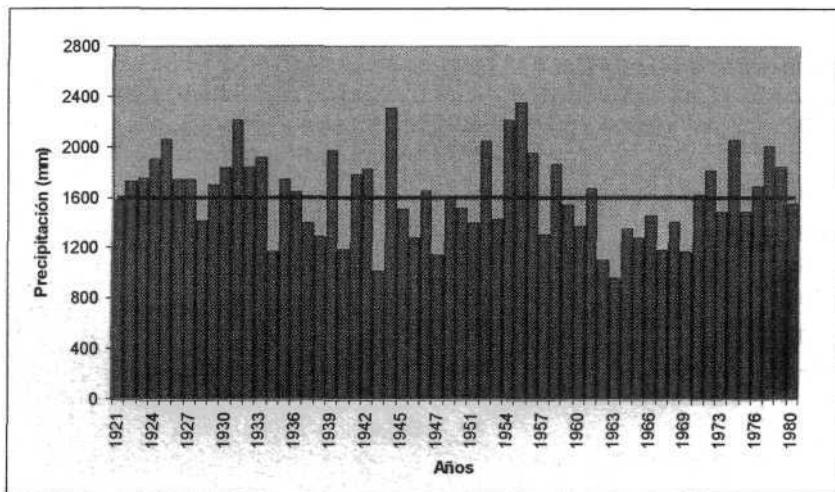


Figura 2a Precipitación total anual de 1921-1980 en Teziutlán Puebla
(fuente Instituto de Geografía, 1984)

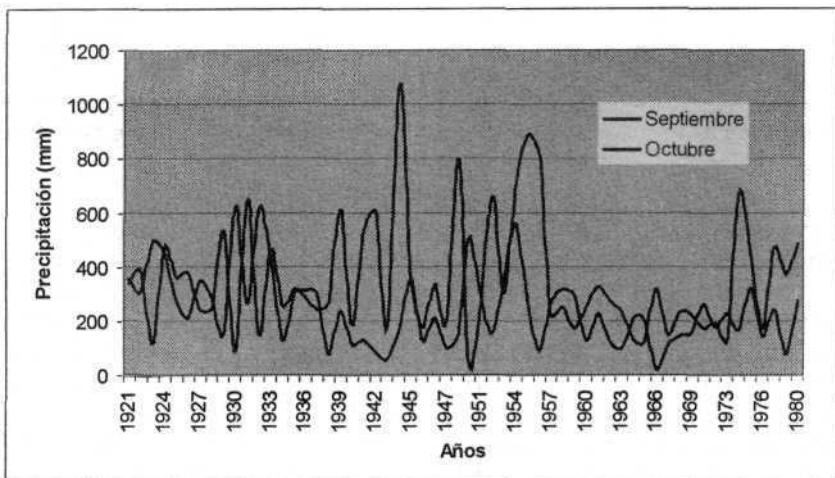


Figura 2b Precipitación de los meses mas lluviosos de 1921-1980 en Teziutlán, Puebla
(fuente Instituto de Geografía 1984)

Tabla 2 Datos hidrometeorológicos de Teziutlán, Puebla

	Precipitación en mm
Precipitación media anual	1 593.0
Precipitación media en octubre	270.0
Precipitación máxima en 24 horas en octubre de 1999 (día 5)	360.0
Precipitación máxima en 24 horas antes de octubre de 1999	380.0
Precipitación total del 4 al 6 de octubre de 1999	712.5
Precipitación total del 27 de septiembre al 1 de octubre de 1955	635.0
Precipitación total en septiembre de 1944	1 072.8

Fuente Servicio Meteorológico Nacional y datos de precipitación del Instituto de Geografía, 1984.

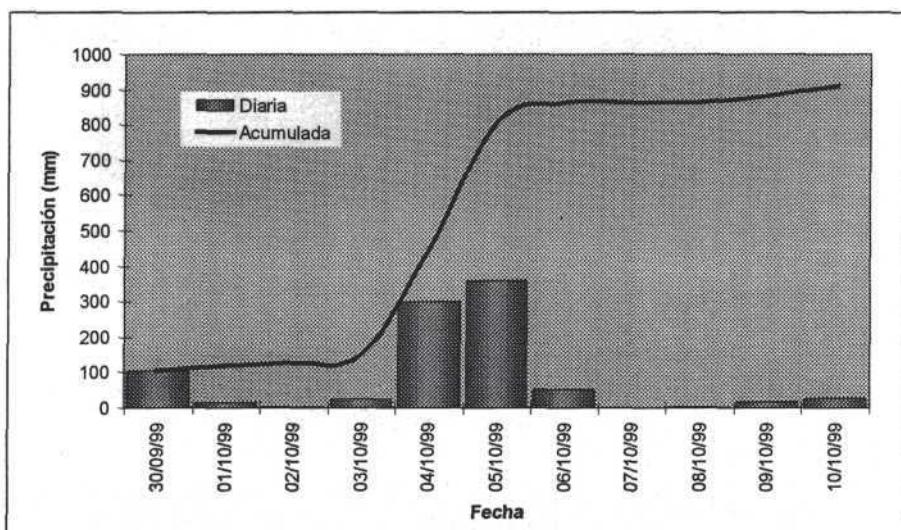


Figura 3 Precipitación diaria y acumulada del 30 de septiembre al 10 de octubre de 1999 en Teziutlán (fuente Servicio Meteorológico Nacional)

La precipitación total acumulada de estos dos días alcanzó el 42% de media anual, lo cual significa que, entre el 4 y 5 de octubre de 1999, llovió casi la mitad de lo que llueve al año en Teziutlán y la precipitación acumulada del 30 de septiembre al 10 de octubre correspondió al 57% del total anual para Teziutlán. Tal cantidad de lluvia alcanzó un umbral de precipitación que, a nivel local, ocasionó inestabilidad de laderas y produjo considerables pérdidas.

Inestabilidad de laderas

Los procesos de ladera que ocurrieron en Teziutlán fueron principalmente movimientos complejos, los cuales se iniciaron como deslizamientos y, posteriormente, se convirtieron en flujos de lodo en laderas con pendientes mayores a 15°. Asimismo, aunque en menor proporción, se presentaron derrumbes o caídas, en pendientes casi verticales.

El evento mas catastrófico ocurrió en la colonia La Aurora (Figura 4) donde un deslizamiento sepultó a más de 130 personas. Este movimiento ocurrió en una ladera con una inclinación aproximada de 23° compuesta por materiales derivados de ignimbritas, en cuya cima se encuentra un cementerio. De acuerdo con observaciones de los pobladores la presencia de una barda que limita al panteón de la zona habitada ocasiono la acumulación de agua a través de la infiltración en una grieta sobre la cual presumiblemente se origino la superficie de deslizamiento. El movimiento tuvo un mecanismo de iniciación de deslizamiento con componente rotacional en la corona y translacional en el cuerpo principal el cual posteriormente

evolucionó a flujo (Figura 5). De acuerdo con Mendoza *et al* (2000) la masa en remoción tuvo una longitud máxima de 100 5 m con una profundidad media de la superficie de deslizamiento de 4 4 m y a pesar de que el volumen de material involucrado no era muy grande 7 350 m³ fueron suficientes para producir un impacto considerable.

Por otro lado en la comunidad de Huehuenico localizada al noreste de Teziutlán (Figura 4) un movimiento complejo que se inicio con un deslizamiento rotacional y que posteriormente se convirtió en un flujo lodoso ocasiono la muerte de 24 personas y daños a 12 casas.

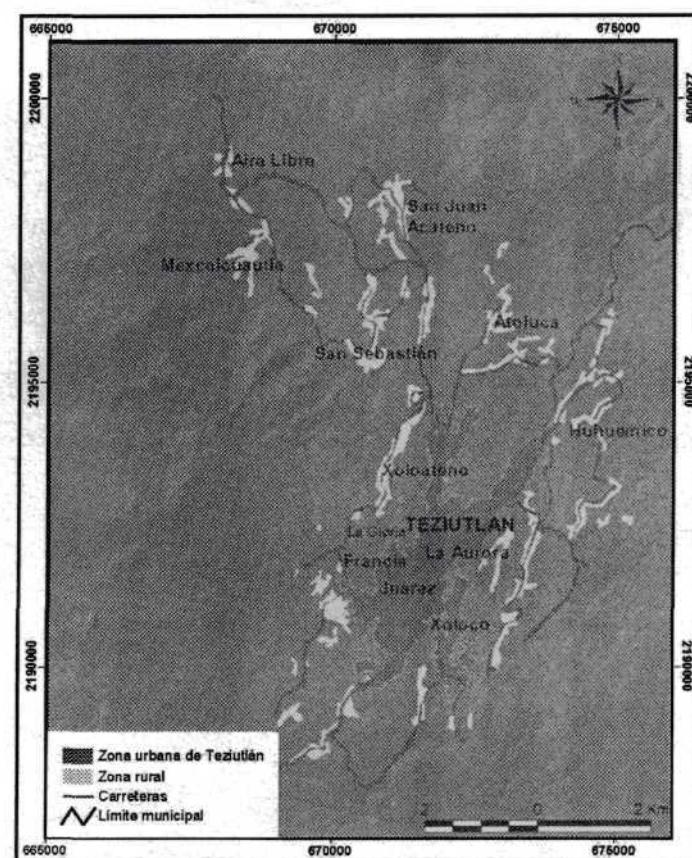


Figura 4 Colonias afectadas por los procesos de remoción en masa desencadenados por la precipitación extraordinaria de 1999 en Teziutlán Puebla

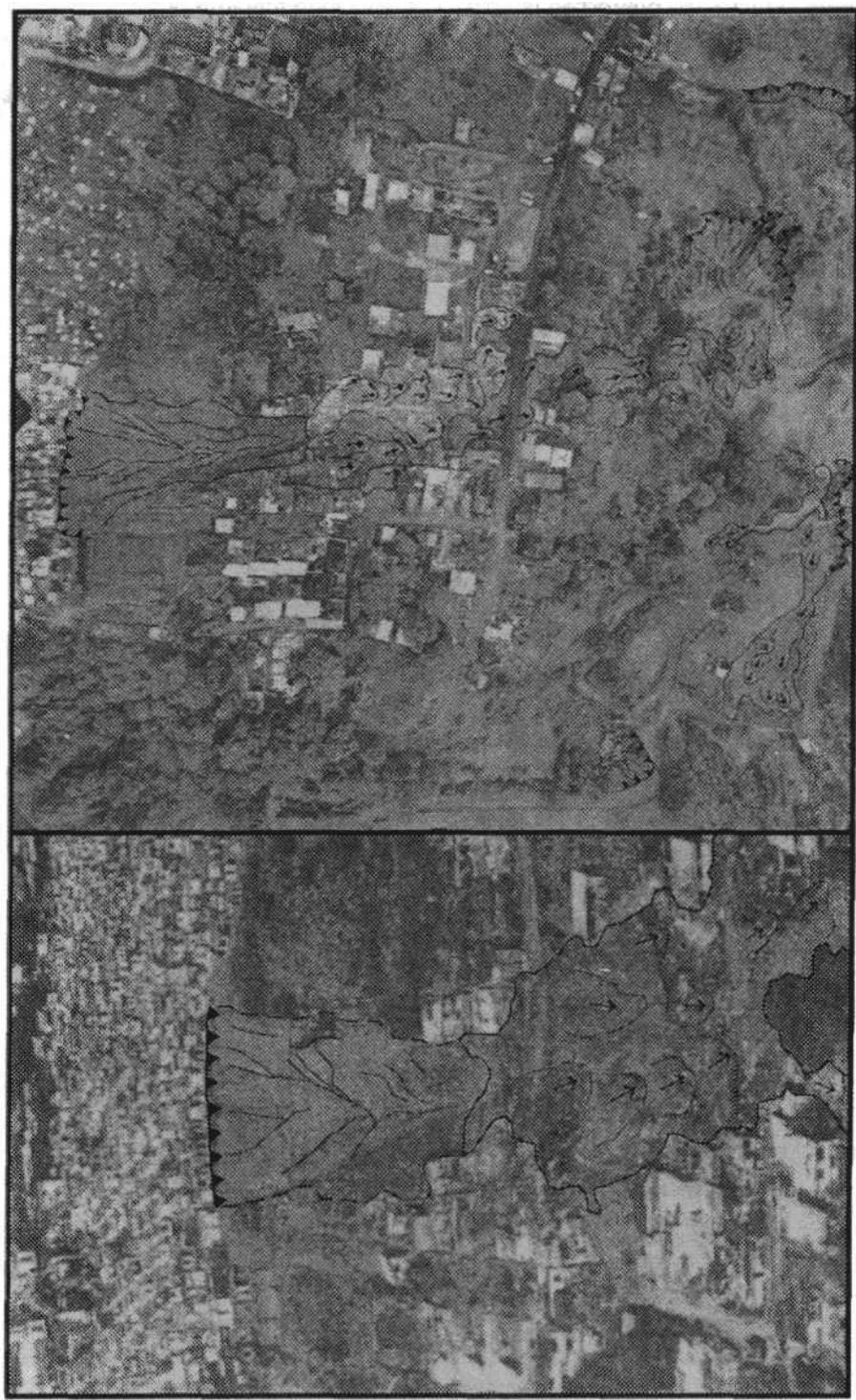


Figura 5. Impacto del deslizamiento (tomada de Mendoza *et al.*, 2000), y vista aérea de La Aurora en la zona habitacional.

En la colonia La Gloria, situada en la parte poniente de Teziutlán, también se presentaron vanos procesos de ladera como deslizamientos, flujos y caídas (Figura 6). De acuerdo con la información proporcionada por Protección Civil del municipio, esta zona fue la que más procesos gravitacionales presentó. No obstante que varias casas sufrieron daños, afortunadamente, no se presentaron pérdidas humanas.

En otras colonias también se presentaron procesos de ladera, aunque los daños sufridos se concentraron en casas y carreteras, la mayoría de ellas quedaron parcialmente destruidas. Entre las colonias que fueron afectadas se encuentran: Aire Libre, Xoloco, San Sebastián, Mexcalcuautla, Juárez, Atochapa y San Juan Acateno (Figura 4).

Las consecuencias de las lluvias de octubre de 1999 en el municipio de Teziutlán se pueden resumir en más de 100 decesos, 500 viviendas catalogadas como pérdida total y 1 200 con daños parciales, siendo La Aurora y La Gloria las colonias más afectadas.

Factores internos y externos de inestabilidad

Los factores internos que causaron inestabilidad están relacionados principalmente con las características geológicas de Teziutlán. Los materiales formadores de las laderas se originaron a partir de la actividad de la caldera de Los Humeros y, posiblemente, de otros cuerpos volcánicos, lo cual originó una intercalación de materiales ignimbíticos con un bajo contenido de arcillas y paleosuelos ricos en arcillas. La presencia de este tipo de materiales de diferente grado de permeabilidad provocó una alta saturación de agua en suelos arcillosos.

Muestreos realizados por Mendoza *et al.* (2001), en días posteriores al evento, indican que el contenido natural de agua alcanzó un valor medio de $w = 97.8\%$, esto es, un contenido ligeramente mayor que el límite líquido con una resistencia cortante muy baja, de tal modo, que la gran cantidad de precipitación generó una alta presión de poro que determinó la inestabilidad.



Figura 6 Inestabilidad de laderas en la colonia La Gloria

De acuerdo con Capra *et al* (2002), los movimientos complejos se presentaron en secuencias compuestas por paleosuelos ricos en arcillas intercalados con una secuencia de pómex/escoria, resultado de las erupciones plinianas de la caldera de Los Húmeros, con una capa removida de entre 1-2 m. Mientras que, en el caso de los flujos, la capa del material removido fue muy superficial, ya que éstos se originaron en pendientes pronunciadas, constituidos por depósitos ignimbriticos de poca consolidación y con un alto contenido de arenas.

Las precipitaciones extraordinarias que ocurrieron desde finales de septiembre hasta el 6 de octubre actuaron como el principal factor externo de inestabilidad. Durante este corto periodo se alcanzaron niveles históricos, originando la infiltración y acumulación de una gran cantidad de agua en el suelo. Sin embargo, cabe mencionar que el 30 de septiembre de 1999, se presentó un sismo con magnitud de $Mw= 7.4^{\circ}$, cuyo epicentro se localizó cerca de las costas de Puerto Escondido, Oaxaca, a una profundidad de 12 km. De acuerdo con Protección Civil de Teziutlán, dicho evento produjo fracturas en algunas casas del municipio. Tomando en cuenta que en nuestro país los procesos de ladera se desencadenan por erupciones volcánicas, precipitaciones intensas y sismos, no se descarta la posibilidad de que este evento sísmico, ocurrido días antes de las lluvias intensas, haya influido en la ocurrencia de los procesos gravitacionales.

Por otro lado, es importante considerar la existencia de pendientes fuertes y la incisión de los ríos en los valles fluviales. Entre las causas de índole antrópica es necesario mencionar la posible influencia de la deforestación en los procesos de ladera, como consecuencia del incremento poblacional, ya que el uso de suelo ha pasado de ser forestal a agrícola o habitacional, deteriorando las condiciones naturales de la región. Finalmente el rápido crecimiento urbano desor-

denado y anárquico a lo largo del municipio ha dado origen a diversos asentamientos en laderas inestables, por lo que la mala edificación de algunas construcciones hace este sitio más propenso a eventos como los de octubre de 1999.

METODOLOGÍA

La morfogénesis se refiere al origen de las formas del relieve a partir de los procesos que les dan lugar, es decir, endógenos y exógenos (Lugo, 1989). Su representación a través de mapas permite visualizar y entender la dinámica existente. Con la finalidad de analizar la relación geomorfología-procesos de ladera, se elaboró un mapa morfogenético, a partir de aspectos como morfología, geología y morfometría.

El punto de partida de este análisis fue la carta topográfica Teziutlán (INEGI, 2000), escala 1:50 000. La elaboración del mapa morfogenético se hizo con base en la interpretación de las curvas de nivel, con un criterio morfológico, mismo que fue complementado con información morfométrica y geológica regional (INEGI, 1987). De la relación relieve-geología se reconocieron tres grandes unidades, relieve endógeno, relieve estructural-denudativo y relieve exógeno erosivo, en tanto que, en función de las curvas de nivel, se distinguieron laderas montañosas, rampas y valles intermontanos, como los tipos de morfología predominante.

GEOLOGÍA

El análisis de las características geológicas representadas por la litología y estructura geológica de la zona en estudio permitieron entender los procesos que dieron origen al relieve actual y la secuencia de los mismos en tiempo geológico.

La geología de Teziutlán muestra la transición de rocas o unidades de diferente edad y composición. En la parte norte, se presenta

la Sierra Madre Oriental, constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico plegadas en el Eoceno, en tanto que la parte sur corresponde al Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), influenciado por la caldera de Los Húmeros, la cual inicia su actividad al final del Plioceno (Ferriz, 1985). Dentro de la zona de estudio se tienen varias formaciones geológicas, que corresponden a diferentes períodos que están relacionados con estas dos unidades fisiográficas.

El basamento local de la zona en estudio está constituido por un complejo paleozoico metamórfico e intrusivo, una secuencia mesozoica plegada a finales del Eoceno, intrusiones cinéticas y granodioríticas del Terciario Inferior y andesitas pliocénicas (Ferriz, 1985). Las rocas más antiguas que afloran en el área se originaron con el depósito de sedimentos clásticos; éstos tuvieron un metamorfismo regional de bajo grado, y es representado por esquistos, los cuales están muy ligados a rocas intrusivas de composición granítica y granodiorítica (Viniegra, 1965); éstos se encuentran en la porción central del área en estudio, en laderas montañosas.

Un ambiente continental estable, donde predominaba la erosión, favoreció depósitos regionales de tipo principalmente fluvial, conocidos como lechos rojos, que están representados por conglomerados, areniscas y lutitas (Formación Huizachal y Formación Cahuasas).

MORFOMETRÍA

Las características cuantitativas del relieve están representadas a través de cuatro mapas morfométricos. Con base en la metodología presentada por Lugo (1991), se elaboraron los siguientes mapas: pendiente, densidad de la disección, profundidad de la disección y energía del relieve. Su aplicación permitió una mejor interpretación de las características morfológicas de la zona, y el

mejor entendimiento de la dinámica de Teziutlán.

El mapa de pendientes permitió diferenciar las unidades más básicas (Figura 7). De esta forma, se distinguieron extensas áreas de pendiente suave y zonas de sierras contrastantes. La densidad de la disección refleja los procesos erosivo-fluviales en los que se encuentra la zona, en donde los valores bajos significan que los escurrimientos no determinan la dinámica del territorio, en tanto que, cuando la densidad es alta, hay una mayor influencia fluvial en el relieve (Figura 8).

La profundidad de la disección refleja los procesos de erosión fluvial, los cuales varían de un lugar a otro, y están en función de las condiciones litológicas, estructurales, tectónicas y climáticas (Figura 9). El mapa de energía del relieve muestra la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena, es decir, presenta los desniveles de ambas (Figura 10).

MORFOGÉNESIS

La integración de la información de las características geológicas, morfológicas y morfométricas, permitieron la identificación de varias unidades morfogenéticas en las cuales se refleja el grado de susceptibilidad que puede tener una con respecto a la otra (Figura 11).

I. Relieve endógeno

El relieve endógeno corresponde al originado por eventos volcánicos del Plioceno y Cuaternario, relacionados con la actividad de la caldera de Los Húmeros, localizada 15 km al SW de la ciudad de Teziutlán. Esta estructura ocupa una extensión considerable dentro de la zona en estudio. De este tipo de relieve hay una subdivisión entre el volcánico acumulativo del Cuaternario y el volcánico modelado del Plioceno.

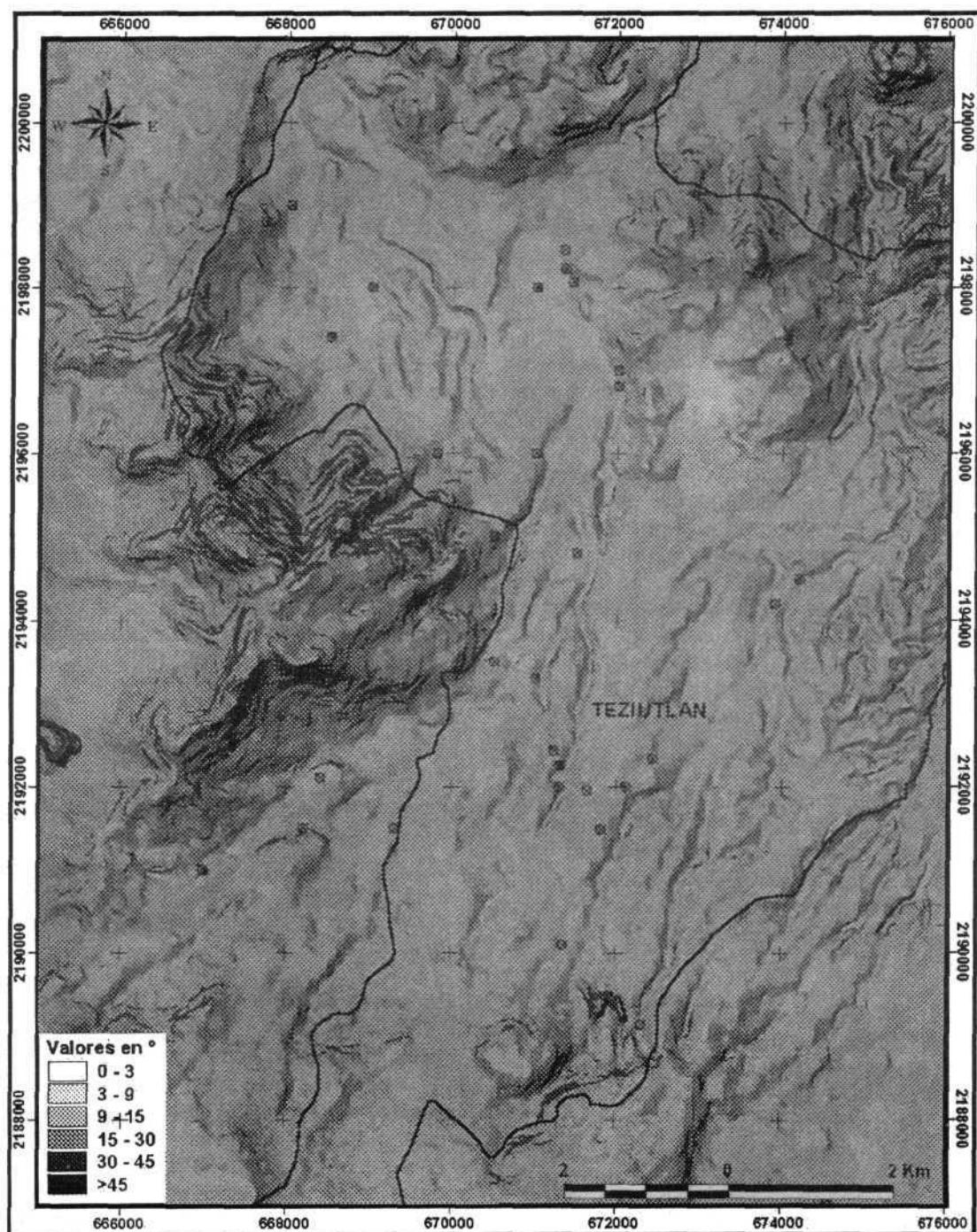


Figura 7. Mapa de pendientes de Teziutlán.

Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla

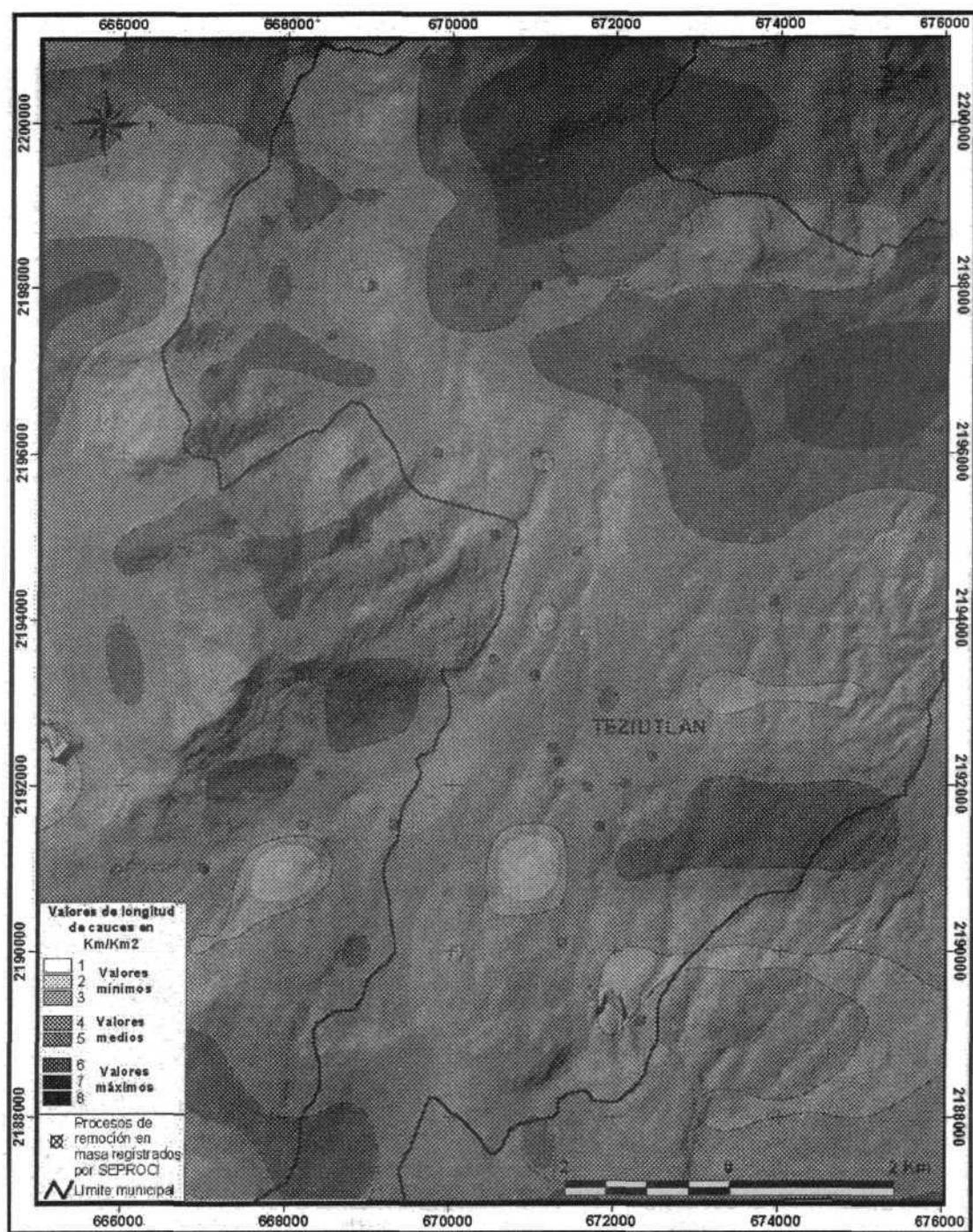


Figura 8. Mapa de densidad de la disección de Teziutlán.

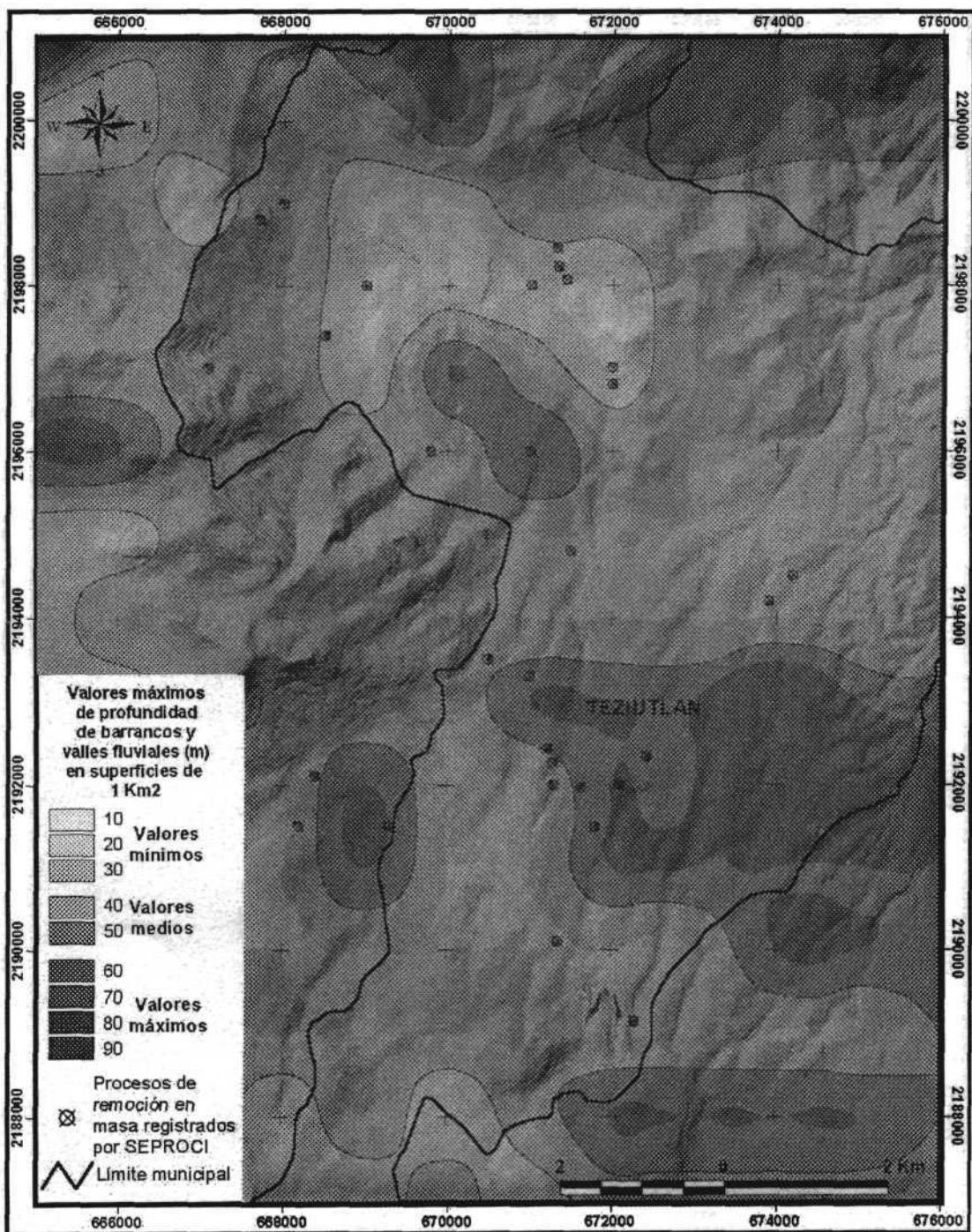


Figura 9 Mapa de profundidad de la disección de Teziutlán

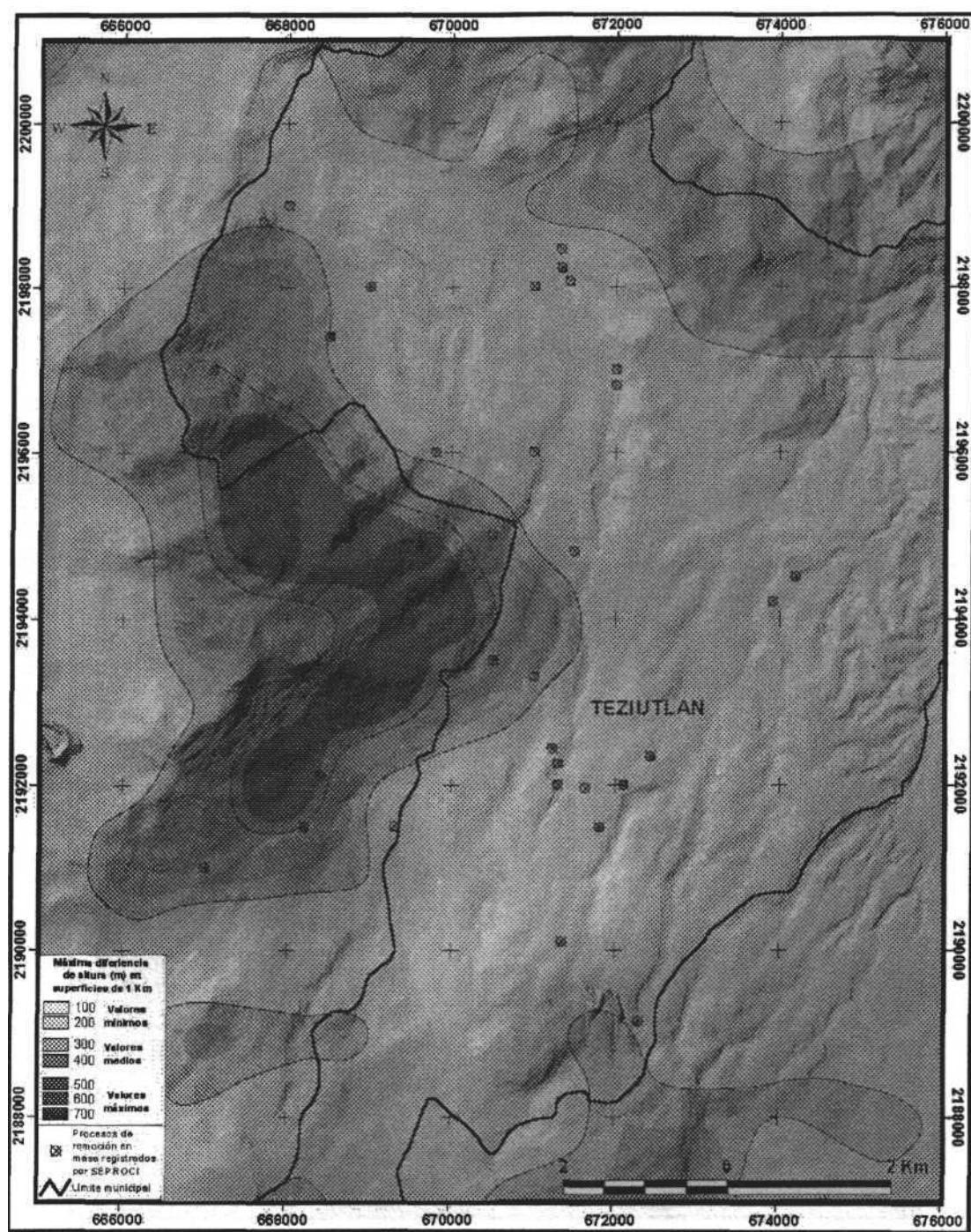


Figura 10 Mapa de energía del relieve de Teziutlán

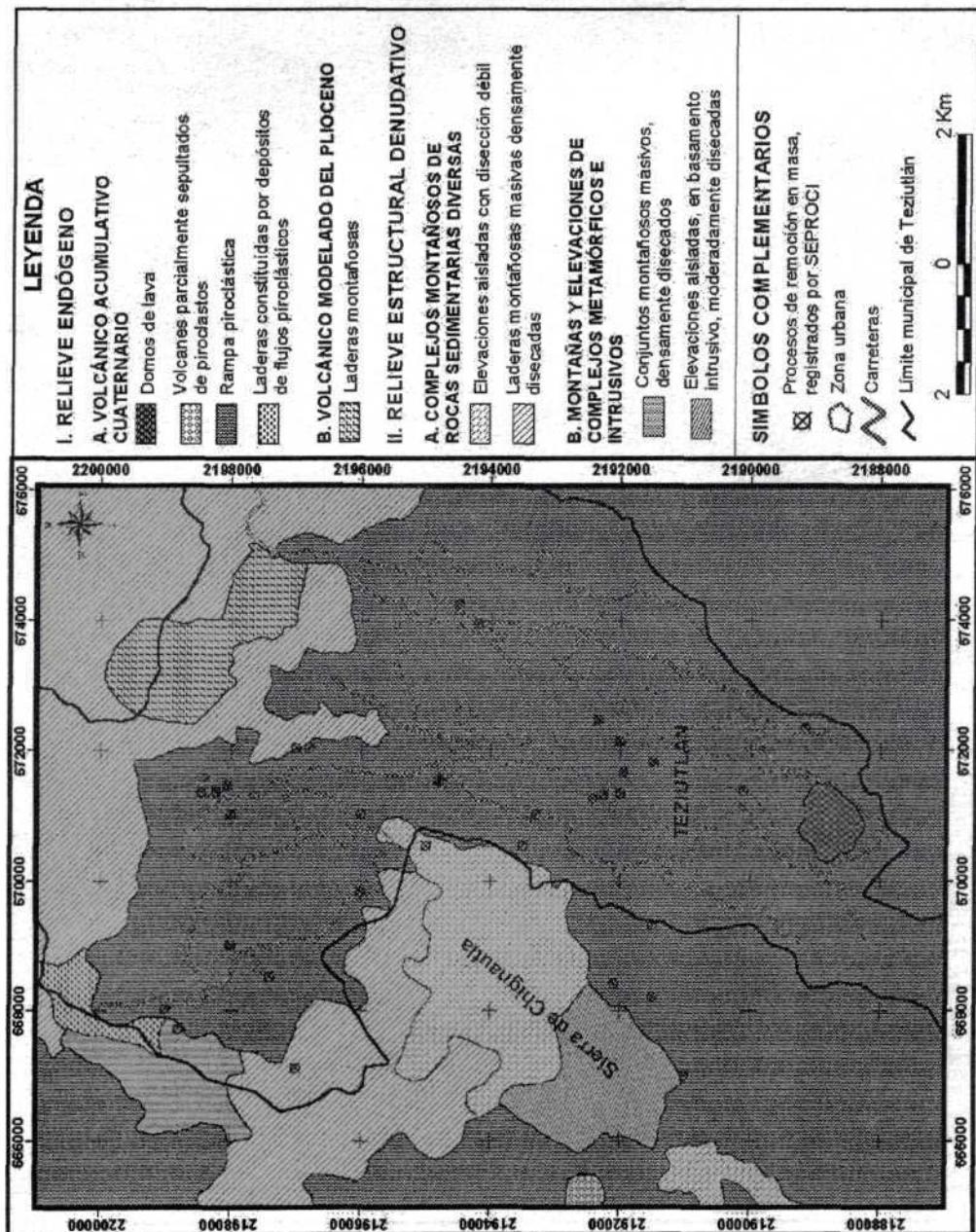


Figura 11. Mapa morfogenético de Teziutlán.

A. Volcánico acumulativo Cuaternario

Domos de lava

Los domos de lava son cuerpos extrusivos, en forma de cúpula, con laderas de fuerte inclinación. Son representativos de la porción sur de Teziutlán. Su emplazamiento es anterior al colapso de la caldera de Los Humeros, como lo demuestran los cambios de dirección de flujo y las cubiertas de piroclastos, que sepultan parcialmente algunas laderas de dichos domos. La disección fluvial en los domos es incipiente, por ello, se conserva la morfología original de todas las estructuras.

Volcanes parcialmente sepultados de piroclastos

Los volcanes de basalto y brecha del Cuaternario se localizan al NW de Teziutlán; su altura relativa promedio es de 80 m. Están constituidos de flujos de lava sobrepuertos (basalto de olivino). Estas estructuras están parcialmente sepultadas por potentes capas de piroclastos de la caldera de Los Humeros. Su distribución es dispersa y sin arreglo aparente; fueron un obstáculo para el emplazamiento de los flujos piroclásticos.

Rampas piroclásticas

El relieve explosivo-acumulativo de la zona en estudio se relaciona con las tres erupciones plinianas de la caldera de Los Humeros. Durante el Plioceno y el Cuaternario, se desarrolló una intensa actividad volcánica de composición básica, formándose un gran cono volcánico, que estuvo constituido por basaltos de augita y olivino (Demant y Robin, 1975). La actividad se refleja en el relieve a partir de tres grandes erupciones que dieron origen a la Ignimbrita Xáltipan, la Toba Faby y la Ignimbrita Zaragoza, formándose la rampa piroclástica.

Esta unidad abarca una amplia extensión en la zona en estudio, la cual corresponde a

cerca del 60% del área total, tiene un descenso de sur a norte, entre las cotas de 2 800 y 1 200 msnm, lo que refleja una diferencia de 1 600 m, y la cual corresponde a una morfología de rampa. La composición de dicha unidad es producto de flujos piroclásticos, de composición dacítica, riolítica y fragmentos gruesos de pómex, que corresponden a las últimas etapas del vulcanismo desarrollado durante el Cuaternario (Yáñez y García, 1982).

Estos depósitos cubren parcial o totalmente un relieve preexistente de rocas sedimentarias. También se tienen domos de lava y volcanes que no fueron cubiertos completamente. La rampa corresponde a una superficie de terreno con pendiente suave (5°) y alargada, con un descenso de sur a norte. En la zona en estudio se presentan depósitos de tobas y cenizas finas y gruesas con poca consolidación. Cerca de Teziutlán el grosor de estos depósitos llega a tener de 15 a 18 m y disminuye hacia el norte de la zona en estudio. La disección vertical ha originado laderas de pendiente fuerte, susceptibles a los procesos de ladera.

En esta unidad es donde se concentran la mayor parte de los procesos gravitacionales que ocurrieron en octubre de 1999, debido principalmente a la intercalación de materiales ignimbíticos y suelos arcillosos. Esto provoca una diferencia textural entre los materiales que componen a la unidad de la rampa piroclástica, que origina una permeabilidad variable entre las secuencias de la zona, lo que se refleja en el grado de concentración de humedad, siendo uno de los factores principales para la inestabilidad de laderas en Teziutlán.

Laderas constituidas por depósitos de flujos piroclásticos

Esta unidad corresponde principalmente a laderas de los valles montañosos principales, donde los flujos piroclásticos se depositaron

sin llegar a cubrir totalmente las elevaciones con alturas de alrededor de 1 400 m. Estas cubiertas se asocian al colapso de la caldera de Los Humeros, las cuales están compuestas por ignimbritas. Este tipo de relieve se presenta en forma alargada, principalmente en las laderas de los ríos, ya que la característica de los flujos es que recorren principalmente los valles. La morfología de estos taludes es cóncava y refleja el grado de erosión en materiales muy deleznable con poca consolidación. Esto provoca una desestabilización al pie de las laderas, como consecuencia de la erosión fluvial.

B. Volcánico modelado del Plioceno

Laderas montañosas

Esta unidad se localiza en la parte noreste de la zona en estudio, se presenta en forma alargada y aislada, con una altura relativa de 300 m. Ésta se compone de tobas producto del vulcanismo pliocénico (Yañez y García 1982). Las laderas de esta unidad tienen forma cóncava, con fuerte disección fluvial y abarcan la mayor parte de la unidad. Este material sirvió de cobertura para los esquistos que actualmente se encuentran expuestos.

II. Relieve estructural denudativo

El relieve estructural-denudativo corresponde a la porción montañosa compuesta por rocas ígneas intrusivas, sedimentarias y metamórficas. El relieve corresponde a extensas zonas montañosas en las que se combinan laderas y elevaciones plegadas a finales del Eoceno. Estas se ven seriamente afectadas por agentes exógenos modeladores principalmente por la alta densidad del drenaje que da lugar a una fuerte disección en la mayor parte de este relieve. En cuanto a los procesos de ladera que ocurren en estas unidades son mínimos, debido a que no hay cambios drásticos en las secuencias de los materiales.

A. Complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas

Elevaciones aisladas con disección débil

Se presentan al suroeste de la zona en estudio, con alturas de 200 m, compuestas por calizas y lutitas del Jurásico Superior. Estas corresponden a una parte de la Sierra de Chignautla, la cual pertenece al área donde se localizan las zonas más abruptas por lo que favorece a presencia de procesos de remoción en masa, principalmente del tipo de caídas y desprendimientos.

Laderas de montañas masivas con fuerte disección

Esta unidad se localiza en la parte oeste. La altura relativa es de 800 m, y consiste en grandes elevaciones montañosas, constituidas principalmente por una secuencia de limolitas y areniscas del Jurásico Medio. Su expresión en el relieve es de sierras altas y alargadas, con fuerte disección debido al tipo de material, con laderas muy escarpadas. La superficie de estas unidades es cóncava con cimas en forma aguda.

B. Montañas y elevaciones de complejos metamórficos e intrusivos

Conjuntos montañosos masivos densamente disecados

Este relieve es producto de la transformación de materiales de una secuencia volcán-sedimentaria y cuerpos máficos. Estas rocas forman parte del basamento (Yañez y García 1982). Se encuentra un afloramiento de poca extensión al NW de Teziutlán con una altura relativa de 1 160 m que constituye uno de los pocos afloramientos de la Sierra Norte de Puebla. Presentan una fuerte disección fluvial y sus laderas son cóncavas, lo que permite apreciar una fuerte erosión.

Elevaciones aisladas, en basamento intrusivo, moderadamente disecadas

El relieve de origen intrusivo surge a partir de material que se forma dentro de la corteza terrestre, pero la erosión de los materiales suprayacentes lo deja al descubierto. Esta unidad se localiza al oeste de Teziutlán. Se encuentra dentro de una altura relativa de 660 m sobre el nivel de base local, en los límites de la rampa y el relieve montañoso. Los afloramientos del Mioceno están compuestos por granito, sobre yacidos discordantemente por brecha volcánica básica del Cuaternario (Yáñez *et al.*, 1979). La forma de esta unidad se presenta como *Stock* (tronco), de poca extensión en forma irregular y con pendientes casi verticales.

CONCLUSIONES

La Geología y la Geomorfología juegan un papel importante en el estudio de los procesos de remoción en masa. En este trabajo se presenta un análisis general, que permite identificar las principales unidades morfogenéticas, así como distinguir la incidencia de inestabilidad en una unidad en particular, misma que está determinada principalmente por la composición de los materiales y su relación con el ángulo de reposo.

En el mapa morfogenético se integró información acerca de los procesos de remoción en masa registrados por la Secretaría de Protección Civil de Puebla durante los eventos de octubre de 1999. Se observa que la mayoría de los eventos se registraron en materiales volcánicos (flujos piroclásticos del Plioceno y Cuaternario), fácilmente deleznable y con alta permeabilidad; éstos se localizan en morfologías de rampa y taludes. La alternancia de materiales ignimbíticos y paleosuelos influye, de manera considerable, en la ocurrencia de este tipo de procesos, debido a la diferente composición granulométrica de los materiales.

Cabe destacar que en los principales valles erosivos se concentraron la mayor parte de los procesos de remoción en masa, lo cual significa que en las laderas hay una mayor desestabilización, como consecuencia de una mayor erosión lateral.

En el caso de la rampa constituida por flujos piroclásticos, se observa que los procesos de ladera ocurrieron en lugares habitados que se asientan dentro de esta zona. Uno de los municipios en donde se concentró la mayor cantidad de eventos fue Teziutlán. En este caso, el proceso de urbanización fue uno de los principales detonadores para la ocurrencia de procesos de ladera, mientras que en la parte norte de la carta, estos eventos ocurrieron principalmente en las carreteras, sitios donde la construcción de este tipo de vías de comunicación es un factor desestabilizador en este tipo de materiales.

La elaboración del mapa morfogenético pone de manifiesto que este tipo de estudios, de índole regional, son base fundamental para la identificación de zonas que requieren investigaciones más detalladas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo financiero brindado a través del proyecto de investigación J33428-T, al Dr. Zoltan de Cserna y a los árbitros anónimos por sus invaluables sugerencias.

REFERENCIAS

- Alcántara Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.
- Bitrán, D. (2000), "Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999", *Cuadernos de Investigación*, 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

- Capra, L., J. Lugo Hubp y L. Borselli (2002), "Mass movements in tropical volcanic terrains: the studied case of Teziutlán, México" (en revisión).
- Demant, A. y C. Robin (1975), "Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico". *Rev. del Inst. Geol.*, núm. 1, UNAM, México, pp. 70-83.
- Ferriz, H. (1985), "Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Húmeros, Puebla, México", *Geofísica Internacional*, México, vol. 24., pp. 97-157.
- García, E. (1981), *Modificaciones al sistema de clasificación de Kóppen*, México.
- INEGI (2000), "Carta topográfica", Teziutlán, E14B14, escala 1:50 000.
- INEGI (1987), "Carta geológica", Veracruz, E14-2, escala 1:250 000.
- Instituto de Geografía (1984), *Datos de precipitación de Puebla*, vol. 21.
- Lugo Hubp, J. (1989), *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo Hubp, J. (1991), *Elementos de Geomorfología aplicada (Métodos cartográficos)*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Mendoza, M. J., I. Noriega y L. Domínguez (2000), *Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999*, SEGOB, CENAPRED, México.
- Motte, J. (2000), "XI Una visión sobre el desastre", en Olarzo, J. (ed.), *Teziutlán: historia y tragedia*, Ducere, pp. 179-182.
- Viniegra Osorio, F. (1965), "Geología del macizo de Teziutlán y la cuenca Cenozoica de Veracruz", *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros*, 17, pp. 100-135.
- Yáñez García, C. y S. García Durán (1982), *Exploración de la región geotérmica Los Húmeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, CFE, México.
- Yáñez García, C., S. García Durán y J. Cacique Vásquez (1979), *Geothermal exploration in the Húmeros-Derrumbadas area*, Geothermal Resources Council, Trans. V. 3., USA.