

## Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos

**José Lugo-Hubp<sup>1,\*</sup>, José Juan Zamorano-Orozco<sup>1</sup>, Lucia Capra<sup>1</sup>,  
Moshe Inbar<sup>2</sup>, Irasema Alcántara-Ayala<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F, México

<sup>2</sup> Department of Geography and Environmental Studies, University of Haifa, 31905 Haifa, Israel

\* lugoh@servidor.unam.mx

### RESUMEN

*Una zona montañosa de la Sierra Madre Oriental, de aproximadamente 5,000 km<sup>2</sup>, fue afectada en el transcurso de dos días en octubre de 1999 por unos miles de procesos gravitacionales de caída, deslizamiento, flujo y combinación de éstos, con volúmenes de unos metros cúbicos a cientos de miles de m<sup>3</sup> que dejaron cicatrices del orden de 10 a 100 m de longitud, en pocos casos de centenas de metros. El detonador fue una lluvia de cuatro días, que representó en algunas localidades el 50–60% del total anual.*

*Como parte inicial del estudio se clasificó el relieve en unidades morfológicas de tres órdenes de dimensión, donde las mayores corresponden a porciones de las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Planicie Costera del Golfo de México. La primera de éstas fue la más afectada (la ladera superior, a más de 900 metros sobre el nivel del mar) y creció a costa de la segunda por erosión remontante, mientras que en la tercera se produjo el mayor escurrimiento fluvial e inundaciones.*

*Con el relieve se asocian seis unidades geológicas principales que agrupan varias formaciones con edades del Paleozoico al Cuaternario. El fenómeno se produjo especialmente en rocas sedimentarias triásicas y jurásicas, y en la capa superior de suelos volcánicos y materiales intemperizados. En el relieve ocurrieron cambios, como la formación de un lago a causa de un deslizamiento, el afloramiento de una caverna un año después, el cambio en el régimen de los principales ríos montañosos al desplazarse el cauce hacia la ribera opuesta y aumentar el grosor del aluvión incluso en más de 3 metros, el surgimiento de nuevos barrancos y el crecimiento de otros laderas arriba incluso en más de 20 m. La influencia del hombre es también notable, ya que muchos fenómenos de remoción en masa se presentaron en laderas deforestadas y en carreteras (con promedio de incluso 2 procesos por km). Se elaboró un mapa de frecuencia de cabeceras fluviales para una superficie de 4,000 km<sup>2</sup>, donde se contabilizaron 19,000 de ellas, con un valor medio de 5 cabeceras por km<sup>2</sup> y un máximo de 13 por km<sup>2</sup>, siendo esto un reflejo de la relación entre procesos de erosión remontante y procesos gravitacionales en el Holoceno.*

*Palabras clave: remoción en masa, evento catastrófico por lluvias, Sierra Madre Oriental, Puebla.*

### ABSTRACT

*A mountainous zone of approximately 5,000 km<sup>2</sup> was affected during October 1999 by thousands of mass movement processes mainly of rock falls, slides, flows, and combined types. These processes involved earth volumes from few to hundreds of thousands cubic meters and the formation of landslides scars with longitudes ranging from 10 to 100 m, and in quite a few cases of hundreds of meters. The mass movements were triggered by a four day long rainfall event, equaling 50–60% of the total annual rainfall in some localities.*

*As a first approximation to the understanding of these hazards, the involved relief was classified in*

*morphological units of three orders associated to six geologic units which encompass several Paleozoic to Quaternary formations. The phenomenon affected especially the upper slopes of the Sierra Madre Oriental, mainly the Triassic–Jurassic sedimentary rocks and the upper layer of volcanic rocks and weathered materials. Different landforms and processes were produced by this event, among them a new lake formed, which remains after five years; more than three meters of alluvium were accumulated in many mountain rivers; new gullies formed and others were sourced more than 20 m. The human influence was significant given the fact that many of these slope movements occurred on deforested hillslopes and roads (with averages of even two processes per km). A map of head of gullies frequency was developed. The total measured number of head of gullies was about 19,000 for an area of 4,000 km<sup>2</sup>. Mean values are in the order of 5 head gullies heads per km<sup>2</sup>, with a maximum of 13 stream heads per km<sup>2</sup>. This indicates a strong relationship between mass movement processes and headward erosion in Holocen times.*

*Key words: mass movements, catastrophic rainfall event, Sierra Madre Oriental, Puebla.*

## INTRODUCCIÓN

A principios de octubre de 1999 se presentaron lluvias voluminosas de la depresión tropical número 11 en la Sierra Norte de Puebla, la cuales dieron lugar los días 4 y 5 de octubre a algunos miles de procesos de remoción en masa, un fenómeno excepcional concentrado en una superficie de más de 4,000 km<sup>2</sup>. El suceso fue un desastre por las víctimas y los daños económicos causados. Desde otro punto de vista, fue un fenómeno natural que interactuó con la actividad humana y dejó enseñanzas en cuanto a conceptos sobre la evolución del relieve montañoso en un clima húmedo y en relación con la vulnerabilidad y los riesgos. Un caso semejante ocurrió en la misma región en 1944, una época en que la zona estaba poco poblada y con escasas comunicaciones, pero no se conocen estudios que abunden en el tema.

Los procesos gravitacionales o de remoción en masa cobraron mayor importancia en el mundo en las tres últimas décadas del siglo XX debido al considerable incremento en los daños y desastres relacionado con el avance de los asentamientos humanos hacia zonas peligrosas. Los conceptos teóricos que explican los procesos de remoción en masa han sido tratados por varios autores, estando entre los principales Sharpe (1938), Varnes (1958, 1978), Záruba y Mencl (1969), Crozier (1986) y Dikau *et al.* (1996), quienes consideran entre los factores principales la influencia del agua superficial y subterránea, la litología, la estructura geológica y el relieve, además de la sismicidad y la actividad humana. Es fundamental la obra coordinada por Dikau *et al.* (1996), en la cual numerosos autores sintetizan el conocimiento global sobre el tema y definen con detalle cada uno de los tipos de procesos de remoción en masa y sus subdivisiones, además intentan uniformar una terminología anárquica, proponiendo nombre en varios idiomas, incluso el español, a cerca de 25 tipos y subtipos de procesos. Para la zona estudiada se aplican los términos de tres grupos principales (7 en la clasificación mencionada): caída, deslizamiento y flujo; así como los tipos de material removido: roca, derrubios y suelos. Una reseña de desastres naturales en América Latina,

en general, y de los producidos por remoción en masa, en particular, se debe a Lugo e Inbar (2002).

Un caso de procesos múltiples de remoción en masa en la región de la Bahía de San Francisco, donde se produjo una precipitación de más de 625 mm en 32 horas, fue estudiado por Brown (1984). Algunas publicaciones sobre el fenómeno de 1999 en la Sierra Norte de Puebla se deben a Bitrán (2000), Lugo *et al.* (2001), Vázquez-Conde *et al.* (2001), Capra *et al.* (2003a), Capra *et al.* (2003b), Alcántara-Ayala (2004), Flores-Lorenzo y Alcántara-Ayala (2002), y tesis de Hernández-Mena (2002), Flores-Lorenzo (2002), Borja-Baeza (2003), Dávila-Hernández (2003), López-Mendoza (2003), Marcos-López (2003), Ochoa-Tejeda (2004) y Cuanalo-Campos (2004). El periodo de retorno fue calculado para la población de Teziutlán en 30 años y 40 años para Zacapoaxtla (Vázquez-Conde *et al.* 2001)

En este estudio se analiza el fenómeno de procesos gravitacionales en la Sierra Norte de Puebla, generado por lluvias voluminosas, y la transformación del relieve resultante. La remoción de material rocoso en una superficie amplia es un tema de interés por el significado que tiene en la comprensión de la evolución de un relieve montañoso en determinadas condiciones geológicas y climáticas, tanto en México como en el plano global. Por otra parte, el tema es importante por su relación con la vulnerabilidad y el riesgo.

Se trata de un evento de miles de procesos de caída, deslizamiento y flujo, singular y no conocido en la historia geomorfológica de México en el siglo XX, y probablemente de magnitud global. No hay referencias en la literatura científica de un evento semejante producido por intensas lluvias de tres días que haya causado el fenómeno de remoción en masa en una zona geográfica determinada.

El relieve de la zona estudiada es un claro ejemplo de la relación entre procesos creadores del mismo (tectónica y volcanismo) y los niveladores de la erosión y la acumulación. La actividad volcánica cuaternaria se manifiesta en el crecimiento en sentido horizontal y vertical de la provincia del Eje Neovolcánico, además de posibles movimientos de levantamiento de la provincia contigua de la Sierra Madre

Oriental. El fenómeno de octubre de 1999 es un ejemplo de una poderosa erosión por procesos gravitacionales y fluviales en un lapso breve, el tipo característico de destrucción de las montañas con una recurrencia no bien definida

## MÉTODO DE ESTUDIO

Considerando las dimensiones de la zona en estudio (más de 4,000 km<sup>2</sup>), se procedió a realizar un análisis del relieve enfocado a determinar el tipo de procesos gravitacionales ocurridos y su relación con diversos factores. Para esto se elaboró un mapa geomorfológico en escala 1:250,000, reducido para su publicación, donde se conjugan altitud, formas del relieve y geología, elementos que permiten definir zonas con características semejantes y una determinada vulnerabilidad a este tipo de procesos. El mapa se realizó a partir del análisis de cuatro mapas topográficos 1:50,000 (INEGI, 1984a), los fragmentos de otras cuatro cartas topográficas y geológicas 1:250,000 (INEGI, 1983, 1984b, 1984c), y otras del mismo tema de López-Ramos (1979b), López-Reyes *et al.* (1997), e INEGI (2000).

El trabajo de campo se hizo por medio de recorridos de las carreteras de la zona afectada, y en vuelos de helicóptero en colaboración con la Dirección de Protección Civil del Estado de Puebla. Se estudiaron varios casos de procesos gravitacionales, en especial los que causaron daños en poblaciones. A lo anterior se agrega la aplicación de un método geomorfométrico enfocado a procesos gravitacionales en una superficie amplia, consistente en la cuantificación de cabeceras fluviales.

## MARCO REGIONAL

La Sierra Norte de Puebla representa el extremo meridional de la provincia geológica y geomorfológica de la Sierra Madre Oriental (Figura 1). En planta se aprecia como una franja estrecha con orientación al nor-noroeste de 50 km de anchura y 100 km de largo, localizada en el territorio poblano y que continúa a través del Estado de Hidalgo. Es una de las varias subprovincias de la Sierra Madre Oriental definida por el dominio en la superficie de rocas sedimentarias jurásicas, su clima húmedo tropical y su orientación al NW.

Limita con dos grandes provincias geológico-geomorfológicas: el Eje Neovolcánico y la Planicie Costera del Golfo de México (Figura 1). La primera de éstas se encuentra al occidente y sur, sepultando las rocas mesozoicas con potentes depósitos volcánicos del Neógeno–Cuaternario. Hacia el oriente, la ladera montañosa alta y de fuerte inclinación se extiende hacia la costa del Golfo de México y pasa bruscamente a un relieve de lomeríos de premontaña formado por rocas del Cretácico Superior y el Paleógeno en estructura monoclinial. Gradualmente desciende y se transforma en una planicie estructural ondulada y de acumulación fluvial y marina.

La unión entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Norte de Puebla es precisa, entre una meseta volcánica de 2,200–2,800 msnm y un relieve de montañas plegadas. Las rocas volcánicas se presentan también sobre las rocas mesozoicas como una extensión irregular de la meseta o cuerpos aislados, observándose esto mismo en la provincia de la Planicie Costera. Al sur del paralelo 20°, la Sierra Madre

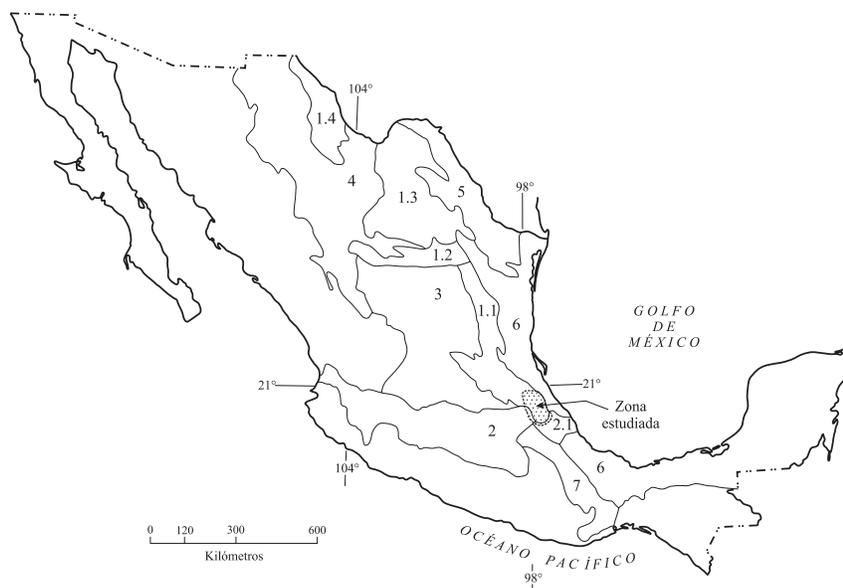


Figura 1. Localización de la Sierra Norte de Puebla en el plano nacional. Subprovincias de la Sierra Madre Oriental: 1.1: Sierra Alta; 1.2: Sierras Transversales; 1.3: Sierras y Bolsones menores de Coahuila; 1.4: Sierras Paralelas de Chihuahua; 2: Provincia del Eje Neovolcánico; 2.1: subprovincia de la Margen oriental de piedemonte; 3: Mesa Central; 4: Sierras y Valles; 5: Planicie del Noreste; 6: Planicie Costera del Golfo de México; 7: Subprovincia de la Sierra Madre del Sur, Sierras Orientales de Oaxaca (con base en Raisz, 1961; Quiñones, 1987; y Lugo y Córdova, 1995).

Oriental queda totalmente sepultada y las montañas de rocas sedimentarias cretácicas emergen algunas decenas de kilómetros al sur, en dirección al Estado de Oaxaca; desde el punto de vista geológico se trata del mismo sistema montañoso, pero se le considera parte de la Sierra Madre del Sur, de acuerdo con Raisz (1961) y otros autores (Figura 1).

La zona en estudio se clasificó con un criterio geomorfológico en unidades del relieve de primero a tercer orden, lo cual se sintetiza en la Tabla 1.

### Eje Neovolcánico Mexicano

La altitud y geología de la meseta permiten una diferenciación de la misma en tres unidades de segundo orden:

a) Tlaxco–Tulancingo. Con altitud de 2,200 a 2,400 msnm, donde predominan rocas volcánicas precuaternarias, lavas y piroclastos de composición ácida e intermedia, muy resistentes a la erosión. Los barrancos en su erosión remontante crecen hacia el suroccidente.

b) Libres. La diferencia principal con respecto a la anterior es que manifiesta una poderosa erosión remontante dirigida al sur, que está exhumando rocas mesozoicas sedimentarias plegadas.

c) Los Humeros. Se localiza hacia el extremo sudoriental de la zona estudiada. Sus rasgos principales son una cobertura volcánica cuaternaria, principalmente sin consolidación, proveniente de la caldera del mismo nombre (Ferriz y Mahood, 1984). Al mismo tiempo hay una erosión vertical y remontante que se manifiesta en numerosos barrancos estrechos y someros (menos de 100 m), pero con longitudes del orden de 10–20 km, que aparentemente son una reactivación de los cauces sepultados con avance de sus cabeceras al sur.

El Eje Neovolcánico tiene una estrecha relación con

la Sierra Madre Oriental en la zona estudiada, porque las rocas sedimentarias plegadas están en parte cubiertas por depósitos piroclásticos jóvenes poco consolidados, donde ocurrieron numerosos procesos de deslizamiento y caída. Además, cada una de las zonas mencionadas se reduce gradualmente con distinta intensidad debido a la erosión remontante hacia el interior de la meseta.

### Planicie Costera del Golfo de México

Las laderas altas de la sierra pasan al oriente a elevaciones menores, lomeríos constituidos por rocas del Cretácico Superior que gradualmente son cubiertas de manera secuencial por rocas paleocénicas. Es la premontaña, unidad subordinada a la Sierra Madre Oriental.

En dirección al Golfo de México, el relieve se suaviza y consiste en lomeríos bajos u ondulaciones que constituyen parte del piedemonte y corresponden a una estructura tipo monoclinial, formada por rocas sedimentarias del Paleógeno–Neógeno, localmente conjugadas con rocas volcánicas cuaternarias.

La importancia de considerar esta zona radica en que en ella se concentra el mayor volumen de agua de escurrimiento proveniente de la Sierra Madre Oriental, a lo largo de valles de fondo ancho y laderas de baja altura, de lo que resultan más inundaciones y menos procesos de remoción en masa.

### Sierra Madre Oriental

La zona de interés primordial consiste en una vertiente que desciende al noreste de los 3,000–2,000 msnm a cerca de los 400 msnm. Muestra dos niveles altitudinales principales que se diferencian por la disección de su relieve y están controlados por la geología.

Tabla 1. Clasificación general del relieve de la Sierra Norte de Puebla y zonas contiguas.

Unidades Geomorfológicas Principales			
Primer Orden	Segundo Orden	Tercer Orden	Altitud (m)*
Sierra Norte de Puebla (Sierra Madre Oriental)	Ladera superior	Meridional Central Septentrional	2,000–1,000
	Ladera inferior		1,000–400
	Premontaña		400–200
Planicie Costera del Golfo de México	Piedemonte		<400
Meseta Oriental (Eje Neovolcánico)	Zona de Tlaxco–Tulancingo		2,000–2,400
	Zona de Libres		2,000–2,500
	Zona de Los Humeros		2,000–2,800

\* Se indican los valores aproximados de altitud mínima y máxima.

**Ladera superior**

Queda bien delimitada entre cerca de los 1,000 msnm y el contacto con la meseta volcánica a 2,000–2,600 msnm. Se subdividió en tres unidades de tercer orden: laderas meridional, central y septentrional, cuyas diferencias son el tipo de rocas expuestas, la disección del relieve en cuanto a densidad y profundidad, y la dinámica actual (Figuras 2, 3a, 3b).

**Ladera meridional.** Está constituida por rocas sedimentarias plegadas jurásicas y cretácicas; en su borde superior hace contacto con las rocas volcánicas en altos escarpes de circos de erosión. Presenta la mayor densidad de cauces fluviales y los cortes de disección más profundos, que alcanzan 300–800 metros. Estas características se explican por la mayor altitud, factor que genera una mayor energía de la erosión fluvial, sobre todo remontante hacia el sur. Es posible que la actividad volcánica cuaternaria haya influido en movimientos verticales de ascenso y mayor fractura, lo que pudo reactivar la erosión.

**Ladera central.** Se diferencia de la anterior por una cobertura de rocas volcánicas del Neógeno–Cuaternario que reduce la velocidad de la erosión, y se manifiesta en una densidad y profundidad considerablemente menor de valles montañosos, donde son comunes los trazos en semicírculo que reflejan la estructura geológica. El borde superior se reconoce entre las poblaciones de Zacatlán y Huauchinango, entre los 2,000–1,800 msnm.

**Ladera septentrional.** Representa una extensión de la Sierra Norte de Puebla hacia el Estado de Hidalgo, al NW de Huauchinango. Corresponde con la estructura geológica Anticlinorio de Huayacocotla (Erben, 1956), donde tienen amplia expresión en el relieve las rocas jurásicas. A diferencia de la ladera central, la densidad de cauces y la profundidad de disección es considerablemente mayor, en lo que influye la estructura de pliegues y el alto grado de fractura en el flanco oriental. Todo el borde superior de la zona central y septentrional es de erosión remontante pero menos vigorosa que la correspondiente a la zona meridional.

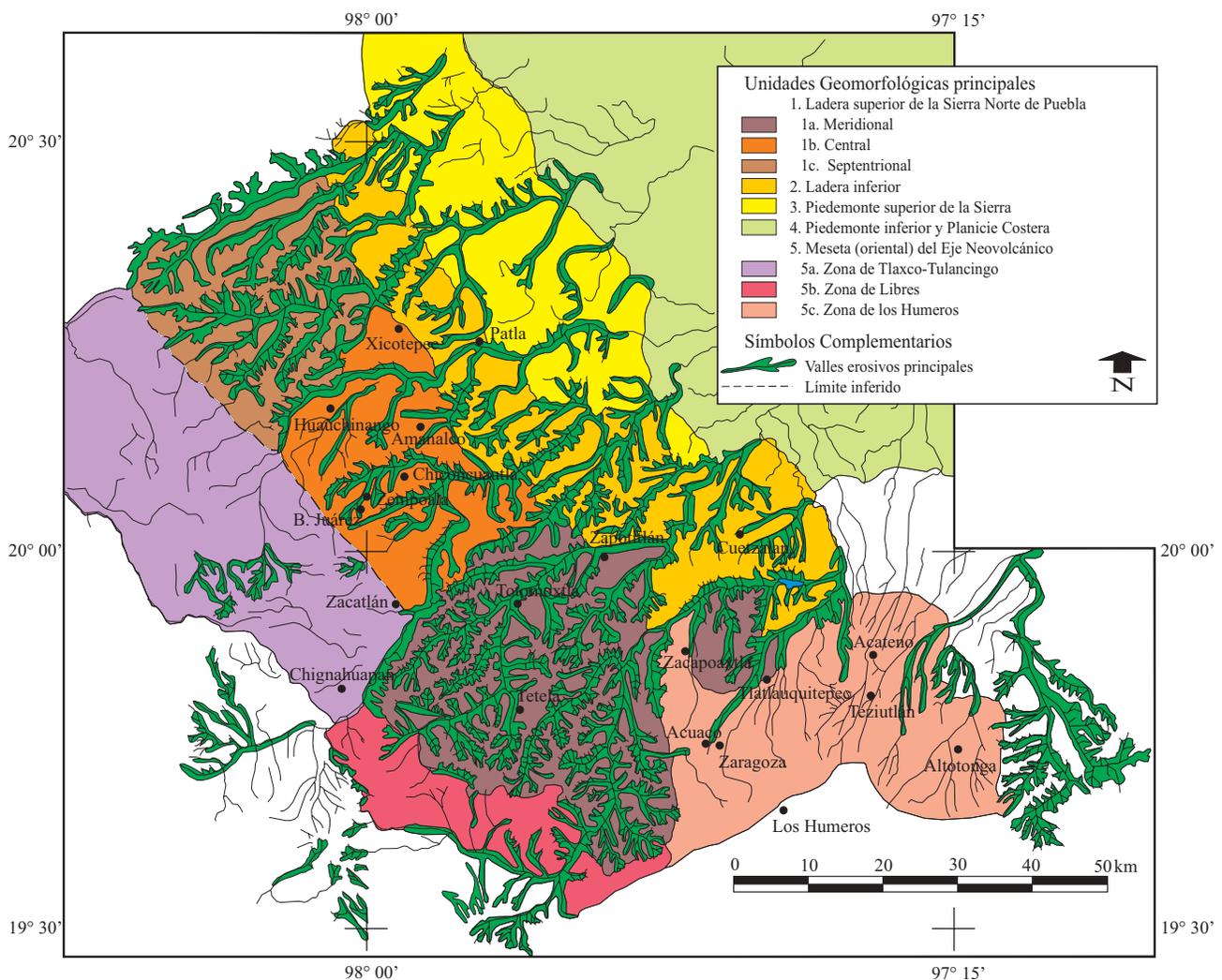


Figura 2. Clasificación del relieve en unidades de distintos órdenes.

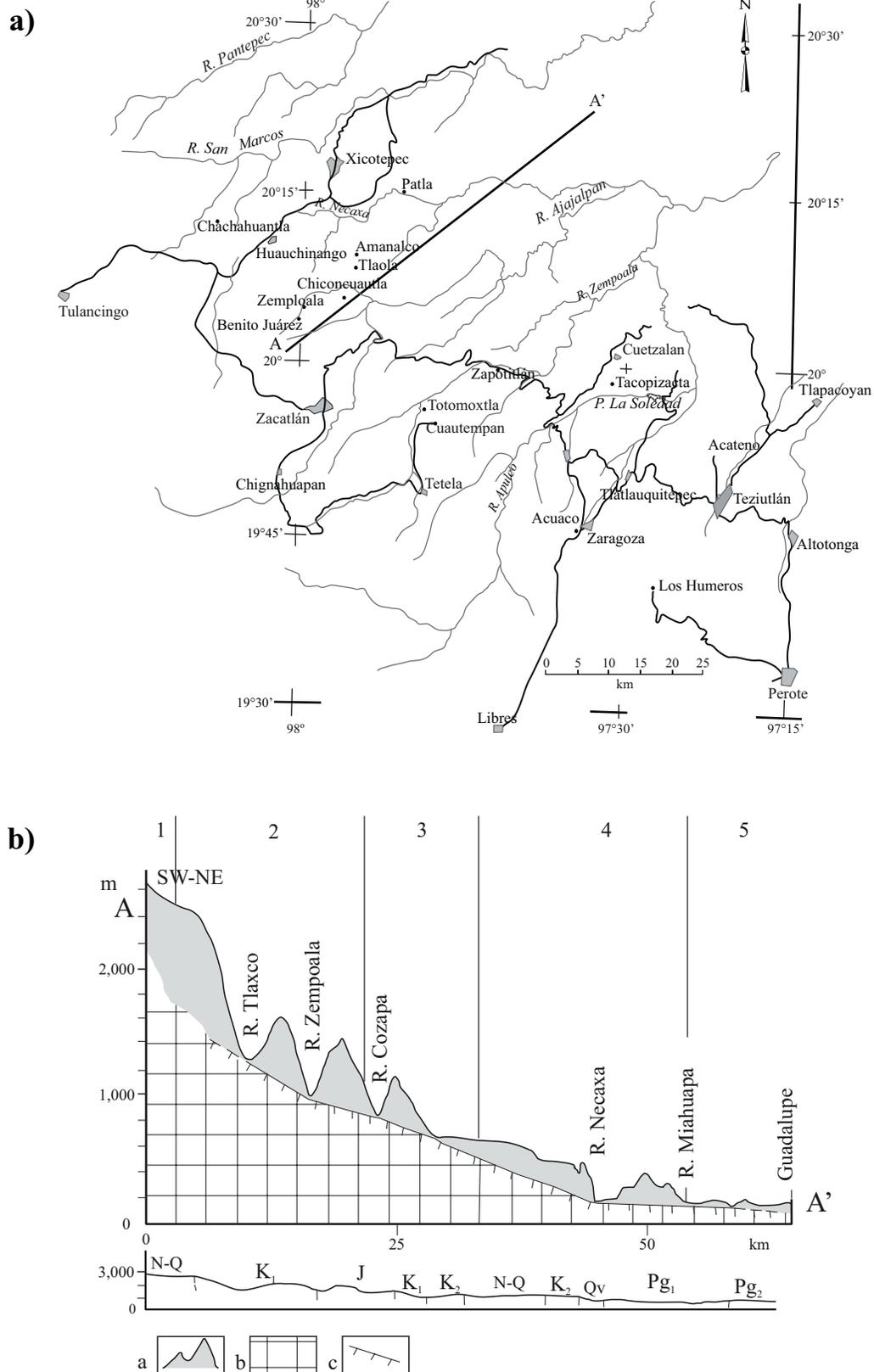


Figura 3. a) Se representan con líneas negras las carreteras principales y con líneas grises los principales ríos en la zona estudiada. La línea A-A' corresponde al perfil de la Figura 3b mostrado abajo. b) Perfil transversal geomorfológico-geológico de la vertiente de la Sierra Madre Oriental en Puebla-Veracruz. 1: Meseta del Eje Neovolcánico; 2: Ladera superior de la Sierra Madre Oriental; 3: Ladera inferior; 4: Premontaña-piedemonte superior; 5: Piedemonte. a: Estructura modificada por la diseción del relieve; b: Estructura conservada; c: Nivel base de erosión. J: Jurásico; K: Cretácico; N: Neógeno; Pg<sub>1</sub>: Paleoceno; Pg<sub>2</sub>: Eoceno; Q: Cuaternario; Qv: Cuaternario volcánico.

La red fluvial es de valles montañosos profundos, de incluso 600–800 m, con orientación al SE, fondo estrecho y laderas de más de 30 grados de inclinación que cortan transversalmente la estructura y siguen líneas de debilidad. En comparación con las otras zonas muestra una menor influencia del volcanismo cuaternario y una actividad erosiva continua en el tiempo. Las cabeceras anchas de los valles montañosos se encuentran alineadas al noroccidente (Figura 2).

### **Ladera inferior**

La ladera inferior de la Sierra Norte de Puebla se extiende paralelamente a las otras anteriores, aproximadamente entre los 1,000 y los 400 msnm. El límite superior se reconoce fácilmente por un cambio de morfología, donde los valles fluviales disminuyen en número y profundidad, reflejo de un régimen más estable en el tiempo que se explica por su aproximación al nivel de base. La erosión remontante es considerablemente menor, a diferencia de la ladera alta.

La clasificación del relieve en tres órdenes tiene como fin principal el relacionar la morfología–geología con la ocurrencia de procesos gravitacionales en octubre de 1999, no solamente como un hecho histórico, sino que es una expresión de la evolución del relieve en el pasado y la recurrencia a corto plazo.

## **CUANTIFICACIÓN DE CABECERAS FLUVIALES**

Como complemento al estudio geológico–morfológico se aplicó el método geomorfométrico de cuantificación de cabeceras fluviales expuesto por Spiridonov (1985), para considerar los procesos erosivos del pasado y la actualidad. Este método consiste en determinar en un mapa topográfico el número de cabeceras, cada una de las cuales corresponde a una localidad de erosión remontante reciente, incluso con formas nacientes como cárcavas y barrancos (Figura 4). En principio, toda cabecera fluvial tiene su origen en un proceso gravitacional y su nacimiento puede deberse a la remoción por caída o deslizamiento de material rocoso con volumen de un metro cúbico a miles de m<sup>3</sup>. Una vez formada la cabecera, el proceso de crecimiento laderas arriba, y en anchura y profundidad, es continuo. Por esta razón, la cuantificación realizada expresa el desarrollo de estos procesos, principalmente en un tiempo breve del orden de hasta algunos miles de años (en el Holoceno), ya que se trata de los cauces fluviales de primer orden (métodos de Horton, 1945 y Strahler, 1952), de escasa longitud y corte vertical somero por erosión.

Después de los procesos gravitacionales de octubre de 1999 se pudo observar que muchas de las cicatrices se transformaron en formas lineales de erosión muy activas. En general, las cabeceras existentes se reactivaron avanzando laderas arriba, de algunos centímetros a 3–4 metros, aunque se observan casos excepcionales de formación de barrancos con avance de cabeceras de más de 30 m de longitud.

El mapa correspondiente se elaboró con base en cuatro

hojas topográficas escala 1:50,000 que cubren casi la totalidad de la Sierra Norte de Puebla. En cada una se trazó la red fluvial total y se dividió en una cuadrícula de 48 figuras geométricas iguales, de aproximadamente 20 km<sup>2</sup> cada una. El número de cabeceras se dividió entre la superficie, de lo que resulta un valor medio de 5 cabeceras/km<sup>2</sup>, y un máximo de 13/km<sup>2</sup>, en una escala 1:50,000. El total de cabeceras es de aproximadamente 19,000, contadas en cuatro mapas, mismas que cubren una superficie aproximada de 4,000 km<sup>2</sup>, menor que la representada en el mapa de unidades geomorfológicas (Figura 2). Los resultados son proporcionales a la escala aplicada, de tal manera que en una muy grande, por ejemplo 1:10,000, los valores serían más altos, y en una escala media del orden de 1:250,000, más bajos.

En la cresta montañosa del extremo noroccidental de la Sierra Norte de Puebla, constituida fundamentalmente por rocas plegadas triásicas y jurásicas, se presentan de manera continua valores superiores a 6 y hasta 13 cabeceras por km<sup>2</sup>, que corresponden con la zona donde los procesos gravitacionales fueron abundantes y de mayor volumen. En las márgenes de la cresta, donde predominan las calizas del Cretácico, los valores disminuyen a 4–5, aunque localmente alcanzan valores de 6–10 en la zona de contacto entre las calizas cretácicas y las rocas volcánicas, siendo esto notable desde la ciudad de Zacatlán y hacia el sur de la misma.

Otra zona con valores elevados, de hasta 10 cabeceras por km<sup>2</sup>, se localiza al oriente de Cuetzalan, donde se conjugan rocas calizas cretácicas y volcánicas. Los valores menores que 4 corresponden principalmente a la premontaña de la Sierra Madre Oriental (NE del mapa) de lomeríos y planicies amplias, lo mismo que a una porción del Eje Neovolcánico.

En el relieve volcánico de la ciudad de Teziutlán y alrededores, bajos valores de frecuencia de cabeceras (<4) se presentan en una de las zonas más afectadas por movimientos gravitacionales en octubre de 1999. Esto se explica por el relieve de valles erosivos paralelos y extensos, formados en depósitos volcánicos inestables donde domina la erosión lateral de los ríos, de lo que resultan cabeceras y cauces fluviales esporádicos de corta extensión, en general de decenas de metros, que no son cartografiables en la escala 1:50,000.

## **EL FENÓMENO DE OCTUBRE DE 1999**

La depresión tropical causante del desastre se formó el 4 de octubre y se mantuvo semiestacionaria durante dos días, frenada por el frente frío número 5 proveniente del noreste del país y por la influencia de humedad aportada por el Pacífico y el Golfo de México. Durante el mes anterior hubo lluvias constantes, especialmente durante la última semana, por lo que había un grado considerable de saturación en el suelo.

Entre los antecedentes de lluvias semejantes están las de septiembre de 1944, ocasionadas por una perturbación

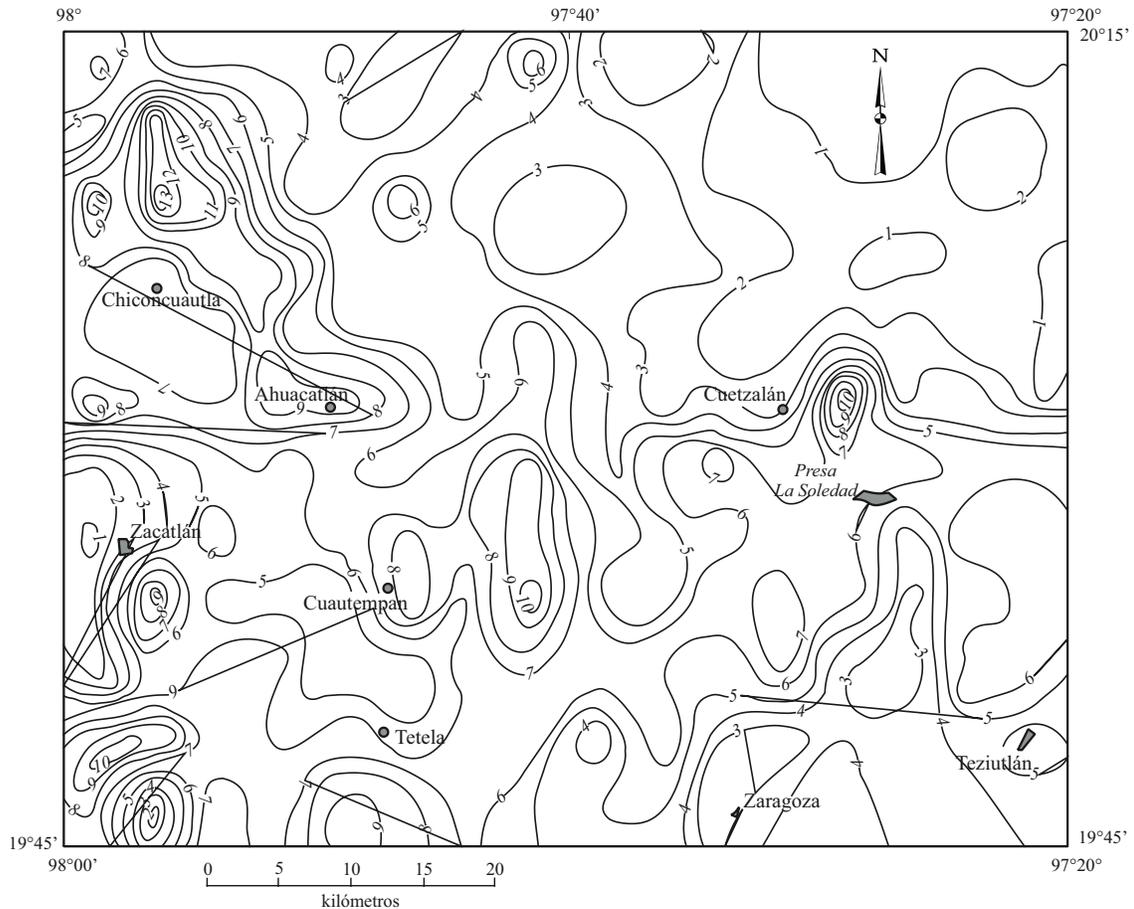


Figura 4. Mapa de frecuencia de cabeceras fluviales (cantidad por km<sup>2</sup>). Representa la zona más afectada por procesos gravitacionales, con un área de aproximadamente 4,000 km<sup>2</sup>.

tropical, que excedieron en más del 50% del volumen de precipitación media por día en la región. Otras se debieron a huracanes como Hilda en 1955, uno de los más destructivos en México en el siglo XX (Carrillo y Ruíz-González, 2002), Beulah en 1967, Fifi en 1974, Diana en 1990 y Gert en 1993 (Bitrán, 2000).

La distribución espacial de la lluvia en relación con los valores medios anuales de las diferentes estaciones meteorológicas tuvo un patrón heterogéneo. Datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional indican que la cantidad de lluvia durante los primeros días de octubre sobrepasó considerablemente valores medios mensuales (Alcántara-Ayala, 2004; Tabla 2). En Zacapoaxtla, la precipitación acumulada sumó 844 mm del 3 al 6 de octubre, donde la media anual es de 1,421.2 mm, es decir, en tan sólo 4 días se tuvo una precipitación equivalente al 60% de lo que llueve en un año. De manera similar, en Teziutlán se registraron 743 mm durante el mismo periodo, lo que corresponde aproximadamente al 50% del total anual. En Huauchinango, sin embargo, la precipitación alcanzó 554.5 mm, cantidad que equivale al 25% de la media anual. Si se analiza la precipitación máxima ocurrida en 24 horas en re-

lación con los valores medios mensuales del mismo mes, es factible entender la importancia de dicha precipitación como factor desencadenante de inestabilidad de laderas (Tabla 2). En los tres casos, la lluvia registrada el 5 de octubre excedió el valor de la media mensual de dichas estaciones; por ejemplo en Teziutlán y Huauchinango correspondió al 133% de la lluvia de octubre, y en Zacapoaxtla al 150% (Alcántara-Ayala, 2004).

Por otro lado, al tratar de establecer una relación entre la inestabilidad de laderas y la cantidad de precipitación, es importante considerar no sólo la lluvia del evento, sino también la humedad antecedente derivada de la precipitación acumulada. Para el caso de la Sierra Norte, de acuerdo con Alcántara-Ayala (2004), esta idea se ilustra a través de los datos de tres estaciones meteorológicas (Figura 5), los cuales muestran un incremento abrupto el 4 de octubre, así como un punto crítico al día siguiente, aunque es posible también apreciar que no se puede determinar un umbral de precipitación absoluto.

En las montañas, el agua fue encauzada por los valles hacia el Golfo de México, arrastrando derrubios y suelos en abundancia. Los decesos y la destrucción de viviendas

Tabla 2. Datos de precipitación de algunas estaciones meteorológicas de la Sierra Norte de Puebla (elaborada con información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, en Alcántara-Ayala, 2004).

Estación meteorológica	Precipitación media anual (mm)	Precipitación 3–6 octubre, 1999 (mm)	Precipitación acumulada, 15 días precedentes (mm)	Máxima precipitación, 24 h (mm)	Precipitación media mensual (mm)
Teziutlán	1593	743	1041	360	270
Zacapoaxtla	1421.5	844	885.5	343	219.7
Huauchinango	2277.1	554.5	586	285	214.9

ocurrieron por remoción de poco volumen de material, generalmente flujos lodosos que sepultaron casas habitación aisladas o conjuntos. La zona afectada está poco poblada por las condiciones desfavorables del relieve, sin embargo, la actividad humana está presente en casi toda su superficie, la cual se utiliza para explotación de madera y cultivos. Por esto, los daños más importantes desde el punto de vista económico fueron a la agricultura y a las carreteras. Varias poblaciones estuvieron incomunicadas por días o semanas.

Las corrientes fluviales subieron su nivel incluso en más de cuatro metros. En el Estado de Puebla, los problemas por desborde de ríos y arroyos no fueron graves en comparación con lo que ocurrió en el Estado de Veracruz, a partir de la base de la Sierra Madre Oriental, donde aumenta el escurrimiento y se ensanchan los cauces.

### Efectos en el relieve

Las modificaciones más notables en el relieve fueron en los siguientes:

1) Generación de algunos miles de procesos de caída, deslizamiento y flujo que formaron cicatrices o huellas (Figura 6a), en general de forma alargada y estrecha a lo largo de las laderas, excepto algunos deslizamientos que son más anchos que largos. En longitud varían de unos 10 a cientos de metros, aunque la gran mayoría no supera los 100 metros. Su superficie es de decenas a algunos miles de metros cuadrados. Pueden ser nuevos o reactivados, lo cual no siempre es fácil de establecer porque en muchos casos la cicatriz queda oculta en poco tiempo por el rápido crecimiento de la vegetación. Los depósitos en la base de la ladera, con frecuencia en un cauce fluvial, también son removidos.

La población de Totomoxtla se vio afectada por primera vez por un deslizamiento que se originó en la ladera vecina (al norte), mismo que se convirtió en un flujo lodoso lento que atravesó la población hacia el río Zempoala, causando serios daños materiales.

2) Depósitos por caída, deslizamiento y flujo. Los cambios notables en el relieve se debieron a la remoción y acumulación de rocas en procesos de deslizamiento y flujo con volúmenes del orden de cientos de miles de metros cúbicos. Los dos principales ocurrieron en la cuenca del Río

Zempoala, uno en la población de Zapotitlán de Méndez y otro cercano a la comunidad de Benito Juárez, en laderas altas y empinadas de más de 300 metros de altura formadas por rocas plegadas sedimentarias jurásicas (Figura 6b). Ambos cubrieron el cauce, provocando su represamiento. En Zapotitlán de Méndez el cierre del cauce duró algunas horas y la fuerza del agua se encargó de su reapertura. En Benito Juárez se formó un lago debido a un depósito de rocas y lodo que cubrió el cauce en una distancia transversal al mismo de más de 300 metros y una altura de hasta 60 metros. El nuevo lago tiene una longitud de 500 m y 250 m de anchura y permaneció en 2004, aunque se construyó una obra de ingeniería (drenes) para su control y evitar un daño por la posible ruptura. En un estudio sobre 73 lagos o diques formados por deslizamientos se comprobó que en el 85% de los casos se produjo ruptura durante el primer año de la formación del dique o lago (Costa y Schuster, 1988).

Los desprendimientos y deslizamientos de suelos y derrubios formaron escarpes de varios metros de altura, lo mismo que auténticos barrancos de incluso 15–20 m de longitud. El retroceso de escarpes y cabeceras de circos de erosión fue en muchos casos del orden de 1–5 metros, pero alcanzaron incluso 20 metros y en un caso excepcional, más de 100 m.

3) Nacimiento y crecimiento de barrancos. Muchas de las cicatrices de procesos gravitacionales de nueva formación representan el surgimiento de barrancos en las laderas montañosas (Figura 6c). En algunos casos, en laderas altas de cientos de metros, la remoción de material a partir de la porción más elevada formó un canal poco profundo por los fragmentos rocosos en movimiento, mismos que en gran parte quedan depositados en forma lineal, en lo que se denomina proceso de flujo o corriente de derrubios, o *debris flow* en la terminología internacional (Corominas et al., 1996; Alcántara-Ayala, 2000)

4) Inundaciones. La crecida del Río Necaxa, que alcanzó más de tres metros de altura, generó principalmente acumulación en las partes más anchas del cauce. Una de las pocas poblaciones asentadas en la margen de este río (izquierda) es Patla, con unos 5,000 habitantes. El poblado ha crecido en dirección al río, ocupando una terraza de 1.5 m de altura con respecto al nivel del agua. El cauce tiene unos 200 m de anchura y, considerando la llanura de inundación y terrazas, hay otros 200 m hacia la izquierda. El cauce se encontraba en la margen derecha antes de las

lluvias de fines de septiembre y principios de octubre de 1999 y, como resultado de las mismas, el cauce se desplazó al lado izquierdo y la terraza que ocupaba el nivel más bajo se convirtió en planicie de inundación (Figuras 6d y 6e). El depósito aluvial generado consistió en cantos de roca caliza y volcánica. En la zona cercana a Patla predominan las laderas de roca caliza en capas masivas, y las volcánicas provienen de más de 10 km de distancia. Esto refleja una crecida extraordinaria que tuvo la capacidad de transportar algunos millones de toneladas de material sólido. Los pobladores nos informaron que la última gran crecida ocurrió en 1944, pero fue menor a la de 1999. Los daños en Patla fueron considerables, e incluyen 150 casas con daño total y otras 10 con daños menores, así como la situación de mucho mayor vulnerabilidad en que quedó la población.

5) Desarrollo de formas cársticas. En la Sierra Norte hay un gran desarrollo de cavernas, principalmente en las calizas masivas del Jurásico Superior y Cretácico Inferior. Hay estudios inéditos sobre cavidades subterráneas para algunas localidades, lo que permite suponer que se presentan en el subsuelo de prácticamente toda la Sierra Norte de Puebla. No se cuenta con información de los procesos ocurridos en el subsuelo, pero evidencia del debilitamiento fue un colapso en una pequeña comunidad de la Sierra Norte ocurrido aproximadamente un año después de las lluvias torrenciales. El 7 de septiembre de 2000 apareció en la comunidad de Amanalco, Tlaola, Pue., un pozo vertical de forma cilíndrica, con 22 m de profundidad y 3.5 m de diámetro (Figura 6f). El 3 de octubre de 2000 tenía 7.80 m de diámetro, una típica forma cárstica en calizas cretácicas, que debe comunicar con un sistema subterráneo de cavernas. Es de suponerse que la oquedad ya existía y quedó expuesta en la superficie al colapsarse la porción superior de la misma.

## FACTORES DETERMINANTES DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

### La estructura geológica

La geología de la Sierra Norte de Puebla está expuesta en mapas escala 1:250,000 y 1:500,000 de López-Ramos (1979b), INEGI (1983, 1984b, 1984c, 2000) y López-Reyes *et al.* (1997), y tiene antecedentes en estudios geológicos realizados por Imlay *et al.* (1948), Kuegelgen (1958) y Carrillo-Bravo (1965), entre los principales. Otras publicaciones posteriores se deben a López-Ramos (1979a), Suter (1990), Ochoa-Camarillo (1997), Eguluz-de Antuñano *et al.* (2000), Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez (2002). En este trabajo se presenta un resumen de la información disponible (Figura 7). El conjunto de formaciones geológicas que integran la columna estratigráfica se puede clasificar en unas cuantas unidades, de acuerdo con su estructura.

1) Esquistos paleozoicos. Forman elevaciones menores, del orden de 100–350 metros y favorecen los procesos de deslizamiento y flujo de corta extensión por la consistencia de la roca plegada, con fuerte inclinación, fracturada, y con desarrollo de una corteza de intemperismo con grosor de 3–5 metros, permeable, que puede desestabilizarse fácilmente. La conservación de esta corteza en condiciones montañosas se debe a que está protegida por una densa vegetación de bosque tropical, que al mismo tiempo contribuye a su desarrollo. La desestabilización se debe a deforestación para cultivos o a la construcción de carreteras que rompen el equilibrio del talud natural. En esta unidad ocurrieron principalmente procesos de deslizamiento del suelo, de uno a seis metros de grosor, que incluye la costra de intemperismo así como de la porción superior del sustrato rocoso.

2) Rocas sedimentarias plegadas triásicas y jurásicas.

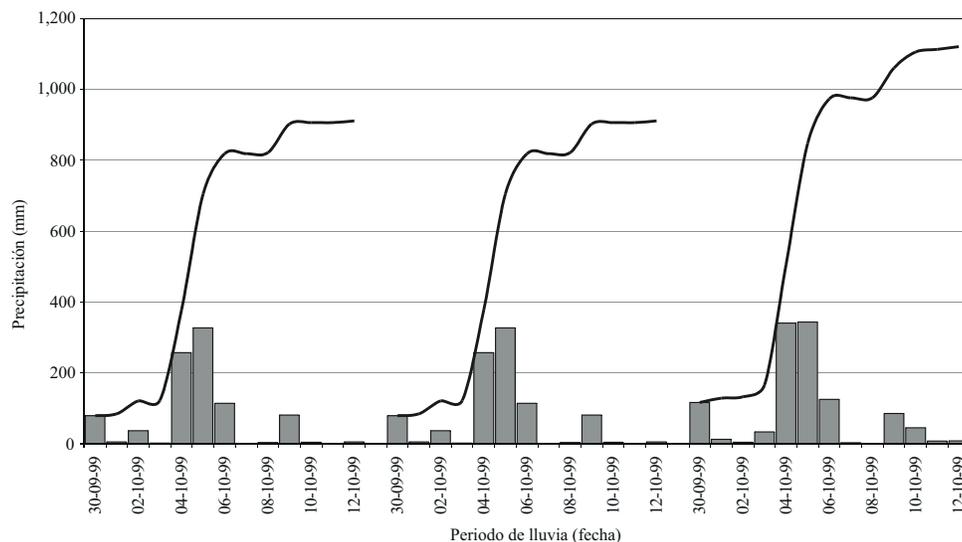


Figura 5. Precipitación diaria y acumulada (30 de septiembre al 12 de octubre de 1999) de algunas estaciones meteorológicas de Puebla (modificado de Alcántara-Ayala, 2004).



Figura 6. a) En un circo de erosión se reconocen más de 20 cicatrices de deslizamientos y flujos de suelos volcánicos de escaso grosor; b) Uno de los deslizamientos mayores en Zapotitlán de Méndez, de tipo rotacional–flujo de derrubios, en la ladera izquierda del Río Zempoala constituida por rocas plegadas jurásicas; c) Barranco formado el 4 y 5 de octubre de 1999, de algunos cientos de metros de longitud, 25 m de anchura y 2–3 m de profundidad; d) y e) Dos vistas de la población de Patla, en la ribera izquierda del Río Necaxa. Se aprecia la superficie de aluvión depositado por la crecida (d), misma que dejó una parte del pueblo en la llanura de inundación (e); f) Boca de una caverna en Tlaola, Amanalco.

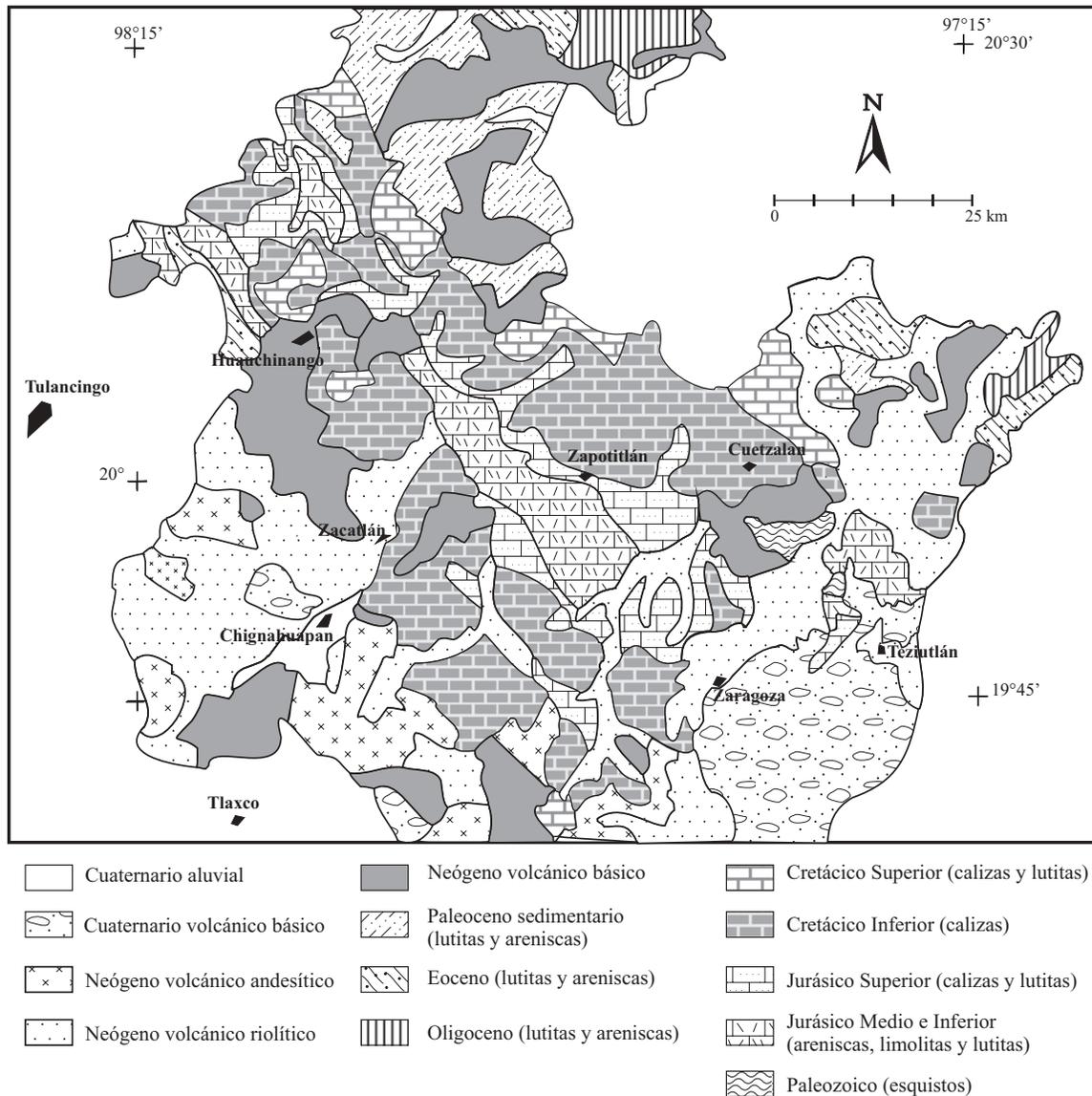


Figura 7. Unidades geológicas de la Sierra Norte de Puebla.

Esta unidad incluye numerosas formaciones geológicas del Triásico, expuesto en pequeñas localidades, y del Jurásico Inferior, que constituyen parte del cuerpo principal de la sierra, con orientación al NW y con altitud de 1,000–2,500 m. Está constituida por lutitas, limolitas y areniscas, en estratos de grosor delgado a medio, que en su conjunto presentan poca resistencia al intemperismo y a la erosión, a lo que contribuyen los factores estructurales, como la inclinación de las capas en ángulo de más de 15°, las diaclasas y fracturas, y el contacto entre estratos de diferente competencia por los cuales se infiltra el agua. Estas rocas reúnen condiciones favorable para el desarrollo de procesos de caída y deslizamiento, principalmente. A las condiciones geológicas se agrega el relieve de vertientes altas y empinadas, en cortes erosivos de cientos de metros en sentido vertical. Por la superficie que representa, en esta unidad se

produjeron un mayor número de procesos gravitacionales, y también los de mayor volumen, con profundidades de 1–2 m a más de 10 m, en caída, deslizamiento, flujo y combinaciones de éstos.

3) Calizas, margas y lutitas del Jurásico Superior y Cretácico. Se presentan en estratos delgados a gruesos y son poco resistentes debido a su estructura; es común observarlas en laderas altas de cientos de metros y pendiente superior a los 20°. En estas rocas ocurrieron procesos de caída, deslizamiento y flujo (*debris flow*).

4) Calizas masivas cretácicas de la Formación Tamaulipas Superior. Se presentan en un relieve de mesas con desarrollo cárstico, con numerosas dolinas y fracturas verticales y horizontales de anchura considerable, en algunos casos del orden de un metro. El relieve de mesas termina en cortes verticales profundos, del orden incluso de más de

300 metros. Se aprecian restos de dolinas colapsadas que acompañan el retroceso de los escarpes por caída de rocas, generalmente bloques de más de un metro de diámetro. En comparación con el resto de las rocas sedimentarias, el proceso es menos frecuente por la alta resistencia de la roca a la erosión. En la zona de Cuetzalan es común encontrarla cubierta por un suelo rojo de más de 6 m de grosor, del tipo *terra rossa* (Figura 8), el cual tiene importancia porque muchos deslizamientos de pequeña magnitud a los lados de las carreteras ocurrieron de estos suelos.

5) Lutitas del Cretácico Superior. Son rocas que no ofrecen resistencia a la erosión, en las cuales el proceso más común, casi permanente aunque en pequeña magnitud, es el desprendimiento. En el relieve generalmente forman lomeríos de poca altura, de decenas a 100–200 metros, resultado de una prolongada erosión. En los casos en que las lutitas se encuentran formando parte de la columna estratigráfica en condiciones de alta energía del relieve, en laderas montañosas o valles erosivos, resultan muy favorables para los procesos gravitacionales, por sus propiedades y por su contacto con otras rocas.

6) Rocas volcánicas del Neógeno-Cuaternario. Tienen una distribución heterogénea en sentido horizontal y vertical, con grosor de unos pocos metros a cientos de metros, que al estar presentes constituyen un sello sobre las rocas sedimentarias mesozoicas. Numerosos procesos de remoción en masa ocurrieron en estas condiciones, notables en poblaciones como Zacatlán y Zapotitlán de Méndez (Capra et al., 2003b). Otra unidad consiste en un depósito de flujo piroclástico proveniente de la caldera de Los Humeros (Ferriz y Mahood, 1984), sin consolidación y con un grosor de incluso más de 30 metros, notable en poblaciones como Teziutlán y las situadas a lo largo de la carretera que lleva a Acateno, Tlatlauquitepec, así como Acuaco-Zacapoaxtla (Figura 9). Hay que considerar también la zona limítrofe entre depósitos volcánicos y rocas sedimentarias, donde el contacto geológico, la inclinación de las capas y la pendiente del terreno son factores de inestabilidad.

Esta unidad es el ejemplo del crecimiento en el Pleistoceno Medio del Eje Neovolcánico, sepultando una porción de la Sierra Madre Oriental, que en la actualidad se encuentra en proceso de dismantelamiento rápido debido a la escasa consolidación de los piroclastos, a la pendiente fuerte de las laderas cubiertas y al clima.

### Influencia del relieve

El relieve muestra algunos miles de rasgos que son testigos de antiguos procesos gravitacionales. Se reconocen en cambios bruscos en el perfil de las laderas en circos de erosión que pueden ser elementales, con 50–100 m de diámetro, o producto de la unión de varios circos alcanzando diámetros de algunos kilómetros. También se reconocen escarpes con alturas que alcanzan en algunos casos cientos de metros; laderas de morfología irregular donde se conjugan



Figura 8. *Terra rossa* sobre calizas cretácicas en Cuetzalan del Progreso.

la geometría cóncava, convexa y recta; y el perfil en “V” de los valles montañosos, entre otros rasgos. La influencia del relieve en los procesos actuales radica principalmente en la altura de las laderas y su gradiente, mismos que al conjugarse con el factor geología (litología y estructura), condicionan los procesos en cuanto a su tipo y magnitud.

### Influencia del agua

Las condiciones climáticas permiten la presencia de agua en abundancia en esta región, cuyos valores de precipitación se encuentran entre los más altos del país. El agua ha favorecido el desarrollo de suelos y de una densa vegetación de bosque tropical, misma que protege el suelo al asimilar el agua de lluvia y reducir la infiltración. El escurrimiento superficial, o la infiltración somera o profunda del agua, son condicionados de manera importante por la geología. En esto juegan un papel importante los contactos entre rocas distintas, el grosor de las capas, su inclinación y otros elementos. Las capas de sedimentos volcánicos de diferente porosidad influyen en los procesos gravitacionales, porque aquéllas que son permeables se



Figura 9. Vista de Teziutlán, población edificada sobre depósitos piroclásticos provenientes principalmente de la Caldera de Los Humeros.

saturan al ocurrir lluvias voluminosas, mientras que las impermeables ocasionan la concentración del agua en la capa contigua (Capra *et al.*, 2003a, 2003b).

En la zona en estudio, el escurrimiento medio anual en la meseta volcánica es del orden de 100 mm, y alcanza más de 500 mm en la Sierra Norte de Puebla. El escurrimiento máximo medio mensual es de 50 a más de 100 mm y tiene lugar en septiembre y octubre (Jiménez, 1990; Jiménez y Maderey, 1990). El volumen medio anual de sedimentos en suspensión por remoción fluvial es de 250–500 ton/km<sup>2</sup> (Maderey, 1990).

### La influencia del hombre

La actividad humana en los últimos 30 años del siglo XX causó cambios notables en las laderas de las montañas. El más significativo es la deforestación que dejó desnuda a gran parte de la Sierra Norte antes cubierta por densos bosques, los cuales han sido transformados en tierras de cultivo que no permanecen mucho tiempo, ya que se erosionan por el proceso común de desarrollo de cárcavas y deslizamientos. Muchos de los procesos ocurrieron en laderas deforestadas, en la capa de suelo y la roca subyacente. Por otra parte, las carreteras que atraviesan la región, como las de Acuaco–Cuetzalan, Cuetzalan–Zacatlán, Zaragoza–Teziutlán, Tlatlauquitepec–Mazatepec y otras menores, favorecieron los procesos gravitacionales.

También hay que considerar los problemas sociales, como el hecho de que se ha ido abandonando el cultivo de café, arbusto que crece a la sombra de otros árboles. El descenso en el precio mundial del café en la década de 1990 ha vuelto incosteable su cultivo, y es común que los productores prefieran usar el suelo para el cultivo de maíz, lo cual implica deforestación (Enciso, 2001).

Las construcciones urbanas en laderas empinadas de cerros y valles montañosos no sólo representan un riesgo, sino que contribuyen al desarrollo de la remoción en masa. Es el caso de Teziutlán y Zaragoza, dos de las poblaciones más grandes de la región y con un crecimiento explosivo en los últimos 30 años, especialmente en la primera mencionada. Estas poblaciones fueron originalmente construidas a lo largo de superficies amplias o estrechas de parteaguas, delimitadas por barrancos que en sus bordes y cabeceras presentan una erosión remontante muy activa, precisamente hacia donde crece actualmente la urbanización. Las construcciones que se sitúan en zonas peligrosas favorecen o aceleran los procesos gravitacionales por la deforestación, el peso de las construcciones, el drenaje, la modificación del perfil de las laderas y del régimen hidrológico (Figura 9).

### Número aproximado de procesos gravitacionales

La cuantificación de los procesos gravitacionales en áreas determinadas permitió inferir su ocurrencia en cerca

de 3,000. Se consideran incluso los de pequeña magnitud, de 1–10 m<sup>3</sup>, y otros que se presentaron en forma paralela con escasa separación que podrían confundirse con uno solo.

En la carretera Acuaco–Cuetzalan se observaron 36 casos de remoción en masa (no se incluyen los menores a 3 m<sup>3</sup>) a lo largo de 43 km, con un promedio de uno cada 1.2 km. En trece de ellos se precipitó material sobre la carretera, en 22 ocurrió la ruptura de esta, y en uno más se combinaron los dos anteriores. Otros 28 procesos se presentaron en las proximidades de la carretera, pero ajenos a la misma. Un cálculo de los volúmenes se muestra en la Tabla 3.

En otra carretera, entre Tlatlauquitepec y la presa La Soledad ocurrió en promedio uno cada 0.5 km a lo largo de 20 km. Cifras semejantes se obtuvieron en otras vías, como Zaragoza–Teziutlán y Zapotitlán de Méndez–Zacatlán. En la zona de la misma presa, Ochoa-Tejeda (2004) menciona 98 procesos de remoción en masa en una superficie de 135 km<sup>2</sup> (uno por cada 1.4 km<sup>2</sup>), sin embargo, la cifra debe ser superior, ya que no es un registro absoluto.

En las laderas de los valles fluviales mayores, así como en los circos de erosión, los procesos gravitacionales fueron abundantes, algo normal si se considera que ambas formas del relieve evolucionan a causa de estos fenómenos. La longitud de los valles erosivos principales, en conjunto, es superior a los 1,000 km, de lo que se infiere la ocurrencia de un mínimo de 500 casos. Si consideramos también más de 600 circos de erosión mayores que se aprecian en un mapa escala 1:500,000, en los cuales ocurrió por lo menos un proceso de remoción en masa, se tiene otra cifra elevada.

La zona más vulnerable es la ladera superior de la Sierra Madre Oriental (Figura 2), de unos 2,700 km<sup>2</sup>, constituida por rocas triásicas y jurásicas, donde se presentó por lo menos 1 proceso cada 2 km<sup>2</sup> en laderas de montaña, de valles y de circos de erosión. En la zona con cobertura volcánica (ladera superior meridional), con una superficie de unos 600 km<sup>2</sup>, ocurrieron 1–2 procesos de remoción en masa por km<sup>2</sup>.

El mapa de frecuencia de cabeceras fluviales (Figura 4) registra 19,000 de éstas. El proceso natural de escurrimiento debe haber removido suelos y rocas en prácticamente todas ellas, además de dar lugar a la formación de nuevas cabeceras, aunque los auténticos procesos gravitacionales

Tabla 3. Procesos gravitacionales ocurridos a lo largo de 43 km, con un promedio de uno cada 700 metros.

Volumen (m <sup>3</sup> )	Número de procesos
20 – 100	15
>100 – 500	14
>500 – 2500	17
>2500 – 5000	9
>5000 – 20,000	4
>20,000 – 40,000	2
>40,000 – 100,000	2
>100,000 – 250,000	1

de separación de material a partir de un plano de ruptura ocurren en menor cantidad. Si consideramos que esto fue notable en un 10–20%, tenemos una cifra mínima aproximada a 2,000.

### Efectos socioeconómicos

En 81 municipios del Estado de Puebla se presentaron daños a causa de las lluvias ocurridas en la primera semana de octubre de 1999. Estos daños se calculan en más de 2,300 millones de pesos, murieron 263 personas y hubo unas 45 desaparecidas. De una población en el Estado de Puebla aproximada a los cinco millones, cerca de 1,476,000 personas fueron afectadas (Bitrán, 2000). En 41 municipios los daños fueron mayores, en un total de 28 fueron menores, y 12 presentaron sólo afectación a la agricultura (Bitrán, 2000). En total fueron afectadas 16,511 viviendas, 199 escuelas, 50 inmuebles del patrimonio cultural, 59 edificios públicos federales, ocho centros de salud, y se produjeron enormes daños en carreteras.

Se calcula que para la reconstrucción material se requiere de un total de 1,836 millones de pesos (Bitrán, 2000). Ésta se llevó a cabo en el transcurso de dos años, pero posteriormente ha sido necesario invertir en obras de protección en carreteras y poblaciones. Para inicios de 2001 prácticamente habían concluido las reparaciones, aunque todavía en 2003 se realizan obras de reforzamiento en algunas localidades donde los daños fueron graves y las obras son complejas.

Por otra parte, este evento hizo patente la carencia, en muchos casos, de obras de drenaje, así como de reglamentos de construcción, lo cual ha conducido a un crecimiento anárquico de la zona urbana y a la urbanización de terrenos vulnerables, como llanuras de inundación y laderas inestables.

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El evento de octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, con un antecedente semejante 55 años atrás, no es un hecho aislado sino continuo en el tiempo, que seguramente fue magnificado por una población considerablemente mayor, la cual ejerce un fuerte impacto en el paisaje por medio del aumento en las construcciones urbanas, las vías de comunicación, la deforestación y la transformación de bosques en campos de cultivo.

El relieve es testigo de una historia prolongada de procesos gravitacionales que han modelado el relieve a lo largo del Cuaternario. La erosión de las montañas ha ocurrido en conjugación con movimientos de levantamiento, posiblemente asociados al volcanismo cuaternario. El efecto de las lluvias en cuestión fue desencadenar algunos miles de procesos de remoción en masa, con volúmenes desde un metro cúbico a cerca del millón de metros cúbicos, que en

su conjunto produjeron cambios sustanciales en el relieve. Estos cambios no ocurrieron de manera lenta y gradual, sino en una breve etapa de unos días de duración, durante la cual se removieron millones de metros cúbicos de material rocoso en una superficie de unos 4,000 km<sup>2</sup>.

Los procesos de remoción en masa afectaron principalmente a los suelos de la costra de intemperismo y a depósitos volcánicos cuaternarios, en ambos casos con volúmenes de un metro cúbico a 2,000–3,000 m<sup>3</sup>. Estos procesos se presentaron principalmente en laderas de valles fluviales y en circos de erosión, donde ocurrieron incluso 15 deslizamientos en una longitud de un kilómetro. Los procesos de mayor magnitud fueron aquéllos que incluyeron al sustrato rocoso, favorecidos por la presencia de rocas sedimentarias plegadas, particularmente las del conjunto del Triásico–Jurásico, así como por los contactos entre rocas volcánicas y rocas sedimentarias plegadas.

La acumulación de sedimentos en el cauce de los ríos fue del orden de 3 m y más de grosor en las corrientes de orden mayor (la cuenca media alta). Sin embargo no son depósitos definitivos, sino que otro evento semejante puede remover más del 50% del material depositado, hasta incluso volver al nivel de base anterior.

Además de las variadas cicatrices que dejaron los miles de movimientos de masas de roca, derrubios y suelos, los procesos de octubre originaron nuevas formas del relieve como el abanico aluvial o cono de eyecciones de Totomoxtla, algunos barrancos con incluso más de 20 metros de longitud y 1–3 m de profundidad, así como un lago temporal en el Río Zempoala. Calculamos que en un lapso menor a una semana se formaron cerca de 3,000 cicatrices en un área de 4,000 km<sup>2</sup>, lo que hace al fenómeno excepcional en el mundo.

Debido a que el agua fue el detonador, la mayoría de los procesos fueron de caída o deslizamiento que se convirtieron en flujos lodosos. Muchos son la repetición en una misma localidad de procesos semejantes ocurridos con anterioridad durante los últimos miles de años, mientras un gran número de ellos ocurren por primera vez, como es el caso de varias corrientes de derrubios (*debris flow*).

Considerando la magnitud del fenómeno, las víctimas fueron pocas y en su mayoría ocurrieron en Teziutlán, ciudad que creció de manera vigorosa en los últimos 30 años. Por su topografía, las montañas están poco pobladas y, con más del millar de movimientos de remoción en masa ocurridos, menos de 10 las poblaciones tuvieron daños serios. Sin embargo, muchas de estas poblaciones tienen un rápido crecimiento y las construcciones avanzan hacia las zonas peligrosas.

Es natural que en el futuro, a corto o largo plazo, estos fenómenos se volverán a presentar. En el pasado, tan sólo hace 40 años, la situación era otra, ya que las poblaciones eran más pequeñas, la deforestación no alcanzaba los niveles actuales, y era menor la modificación al relieve por la construcción de vías de comunicación, cultivos en laderas empinadas y pastoreo. La erosión de las montañas

es un fenómeno natural inevitable que ha ocurrido desde antes de que fueran habitadas, pero la actividad humana ha contribuido a magnificarlo.

El desastre ocurrido en la Sierra Norte de Puebla en octubre de 1999 deja como enseñanza la necesidad de definir regiones donde está en peligro un número determinado de personas, siempre creciente, lo mismo en comunidades pequeñas de unas cuantas familias que ciudades de decenas de miles, como Teziutlán y Zacapoaxtla. Es necesario realizar un estudio posterior al desastre, tanto en el plano regional como en cada una de las poblaciones amenazadas, tomando en cuenta que prácticamente todas las poblaciones continúan creciendo a un ritmo acelerado y que los asentamientos humanos avanzan hacia zonas desfavorables, como laderas interiores de barrancos. Una política fundamental es continuar con la educación de la población en la protección civil, lo mismo en las ciudades que en pequeñas poblaciones, creando los comités respectivos de ciudadanos y con la asesoría y apoyo de dependencias gubernamentales e instituciones de educación superior. Otro tema es la recuperación de las zonas afectadas, respecto al cual hemos observado que, en el transcurso de 4 años, una gran parte de las cicatrices se han regenerado con el crecimiento de vegetación, favorecido por el clima.

Las zonas más vulnerables a los procesos de remoción en masa son las porciones central y meridional de la ladera superior de la Sierra Norte de Puebla. La primera de montañas constituidas por rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, y la segunda con una cobertura de más de 30 m de rocas volcánicas con poca o nula consolidación y en proceso de desmantelamiento.

El fenómeno de algunos miles de procesos gravitacionales en la Sierra Norte de Puebla fue causado por lluvias excepcionales los primeros días de octubre de 1999, aunque se habían presentado desde la última semana de septiembre. El tipo de proceso y su intensidad estuvieron determinados por diversos factores, principalmente por (1) la estructura geológica de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas y rocas volcánicas del Neógeno-Cuaternario asociadas; (2) el relieve de laderas de fuerte inclinación con disección profunda; y (3) la actividad humana que magnificó el fenómeno. El último fenómeno semejante ocurrió en 1999, aunque hubo otros tres de menores proporciones también dañinos. El crecimiento continuo de la población hace a la región cada vez más vulnerable, por lo que se requiere una vigilancia permanente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Gerardo Bocco Verdinelli y a un segundo árbitro anónimo por sus comentarios críticos al texto original; al director de Protección Civil del Estado de Puebla, Guillermo Melgarejo Palafox y todos sus colaboradores, en especial Rubén Acebo Zárate, por su apoyo; lo mismo al ex director del Centro Nacional

de Prevención de Desastres (CENAPRED) Roberto Meli Piralla y al actual, Roberto Quaas Weppen.

## REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I., 2000, "Landslides": ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología: Investigaciones Geográficas, 41, 7-25.
- Alcántara-Ayala, I., 2004, Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico: Geomorphology, 61 (1-2), 19-40.
- Ángeles-Moreno, E., Sánchez-Martínez, S., 2002, Geología, geoquímica y geología estructural de las rocas del basamento del macizo de Teziutlán, Estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura, 105 p.
- Bitrán, D., 2000, Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana, durante 1999: México, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cuadernos de Investigación, 50, 194 p.
- Borja-Baeza, R., 2003, Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 154 p.
- Brown, W.M., 1984, Debris flows, landslides, and floods in the San Francisco Bay Region, January 1982; Overview and summary of a conference held at Stanford University, August 23-26, 1982: Springfield, Va., National Academic Press, p. 1-66.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., Borselli, L., 2003a, Mass movements in tropical volcanic terrains; the case of Teziutlán (México): Engineering Geology, 69, 359-379.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., Dávila-Hernández, N., 2003b, Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla; relación entre litología y tipo de movimiento: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 20(2), 95-106.
- Carrillo-Bravo, J., 1965, Estudio geológico de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 17(5-6), 1-23.
- Carrillo, M.M., Ruiz-González, J., 2002, El huracán *Hilda* y la inundación de 1955 en Pánuco y Tampico, noreste de México, en Lugo-Hubp, J., Inbar, M. (eds.), Desastres Naturales en América Latina: México, Fondo de Cultura Económica, 301-314.
- Corominas J., Remondo, J., Fariás, P., Estevao, M., Zézere, J., Díaz-de Terán, J., Dikau, R., Schrott, L., Moya, J., González, A., 1996, Debris flow, en Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Visen, M.L. (eds.), Landslide recognition: Chichester, John Wiley and Sons, 161-180.
- Costa, J.E., Schuster, R.L., 1988, The formation and failure of natural dams: Bulletin of the Geological Society of America, 100, 1054-106.
- Crozier, M.J., 1986, Landslides; Cause, Consequences and Environment: Londres, Croom Helm, 252 p.
- Cuanalo-Campos, O.A., 2004, Metodología para la selección de procesos constructivos empleados en estabilizar deslizamientos de laderas: Las Villas, Cuba, Universidad Central "Marta Abreu", tesis doctoral, 162 p.
- Dávila-Hernández, N., 2003, Zonificación del peligro por procesos de remoción en masa con base en la aplicación de un análisis estadístico multivariado condicional; la barranca El Calvario, Teziutlán, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 116 p.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrot, L., Ibsen, M.L. (eds.), 1996, Landslide recognition: Chichester, John Wiley and Sons, 251 p.
- Eguiluz-de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marret, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53(1), 1-26.
- Enciso, A., 2001, El Inmecafé, gran ausente de la caficultura nacional: México, *La Jornada*, 16 de enero, p. 39.
- Erben, H.K., 1956, El Jurásico medio y el Calloviano de México, en XX Congreso Geológico Internacional: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 140 p.

- Ferriz, H., Mahood, G.A., 1984, Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, México: *Journal of Geophysical Research*, B89, 8511-8524.
- Flores-Lorenzo, P., 2002, Inestabilidad de las laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 120 p.
- Flores-Lorenzo, P., Alcántara-Ayala, I., 2002, Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla: *Investigaciones Geográficas*, 41, 7-25.
- Hernández-Mena, Z., 2002, Estudio geológico y geotécnico del deslizamiento de Zapotitlán de Méndez, ubicado en la Sierra Norte del Estado de Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura, 97 p.
- Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology: *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Imlay, R.W., Cepeda, E., Álvarez, M., Díaz, T., 1948, Stratigraphic relations of certain Jurassic Formations in Eastern México: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 32(9), 1750-1761.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1983, Carta geológica Pachuca, F14-11, escala 1:250,000: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1984a, Cartas topográfica Zacatlán F14D85, Cuetzalán F14D86, Teziutlán E14B15, Altotonga E14B16, escala 1:250,000: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1984b, Carta geológica Poza Rica, F14-12, escala 1:250,000: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1984c, Carta geológica Veracruz, E14-3, escala 1:250,000: México, Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000, Síntesis Geográfica del Estado de Puebla: México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 124 p. + mapas escala 1:500,000.
- Jiménez, A., 1990, Escurrimientos máximos y mínimos, *en* García-Silberman (ed.), Atlas Nacional de México, Tomo II, Cap. IV., 6.5: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Jiménez, A., Maderey, E., 1990, Escurrimiento medio anual, *en* García-Silberman (ed.): Atlas Nacional de México, Tomo II, Cap. IV., 6.4: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Kuegelgen, H., 1958, Der Ausbau der Zentralen Sierra Madre Oriental, Mexico: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 110, 117-142.
- López-Mendoza, M., 2003, Diseño de un programa de prevención y mitigación de desastres asociados a inundaciones y procesos de remoción en masa en Zapotitlán de Méndez, Pue.: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 244 p.
- López-Ramos, E., 1979a, Geología de México: México, edición privada, 3 tomos.
- López-Ramos, E., 1979b, Carta geológica de los estados de Puebla y Tlaxcala, 1:500,000: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, serie Cartas Geológicas Estatales.
- López-Reyes, J.J., de los Santos, S., Cacho, S. Sánchez-Bermeo, G., 1997, Carta geológico minera Pachuca, F14-11, escala 1:250,000: Pachuca, México, Consejo de Recursos Minerales.
- Lugo, H.J., Córdova C., 1995, Regionalización geomorfológica de la República Mexicana: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Investigaciones Geográficas, 25, 25-63.
- Lugo-Hubp J., Vázquez C., T., Melgarejo P.G., García, F.J., Matías, G., 2001, Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla: *Ciencia y Desarrollo*, 157, 25-33.
- Lugo H.J., Inbar, M. (eds), 2002, Desastres Naturales en América Latina: México, Fondo de Cultura Económica, 501 p.
- Maderey, L., 1990, Volumen medio anual de sedimentos en suspensión, *en* García Silberman (ed.), Atlas Nacional de México, Tomo II, Cap. IV., 6.4: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Marcos-López, J., 2003, Distribución espacial de los procesos de remoción en masa y riesgos asociados en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de licenciatura, 151 p.
- Ochoa-Camarillo, H., 1997, Geología del anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, Hgo., México, *en* Gómez-Caballero, A., Alcayde-Orraca, M. (eds.), Libro-Guía de las excursiones geológicas, II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados, Pachuca, Hgo.: Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Hidalgo, Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, p. 1-17.
- Ochoa-Tejeda, V., 2004, Propuesta metodológica para el estudio de inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis de maestría, 213 p.
- Quiñones, H., 1987, El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía: México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Historia (INEGI), *Revista de Geografía*, 1(2), 13-20.
- Raisz, E., 1961, Landforms of Mexico, mapa escala 1:3,000,000: Cambridge, Mass.
- Sharpe, C.F.S., 1938, Landslides and Related Phenomena: New York, Columbia University Press, 137 p.
- Spiridonov, A.I., 1985, Gueomorfoloquichesko kartirovanie (cartografía geomorfológica): Moscú, Niedra.
- Strahler, A.N., 1952, Dynamic basis of geomorphology: *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, 923-938.
- Suter, M., 1990, Hoja Tamazunchale, 14Qe5, Carta Geológica de México, serie 1:100,000, núm. 22: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, mapa y texto, 55 p.
- Varnes, D.J., 1958, Landslide types and processes, *en* Eckel, E.B. (ed.), Landslides and Engineering Practice: Washington D.C., National Research Council, Highway Research Board, Special Report, 29, 20-47.
- Varnes, D.J., 1978, Slope movement and processes, *en* Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.), Landslides Analysis and Control: Washington D.C., National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, 11-13.
- Vázquez-Conde, M.T., Lugo, H.J., Matías, L.G., 2001, Heavy rainfall effects in Mexico during early October 1999, *en* Grunfest, E., Handmer, J. (eds.), Coping with Flash Floods: Países Bajos, Kluwer Academic Pub., 289-299.
- Záruba, Q., Mencl, V., 1969, Landslides and their Control: Nueva York, Elsevier y Academia de Ciencia de Checoslovaquia, 205 p.

Manuscrito recibido: Marzo 15, 2004

Manuscrito corregido recibido: Enero 10, 2005

Manuscrito aceptado: Enero 11, 2005