

# Inestabilidad de laderas

## Sierras Norte y Nororiental del estado de Puebla

Oscar Andrés  
Cuanalo Campos  
Guillermo  
Melgarejo Palafox

En una visita de inspección técnica a la comunidad de Zapotitlán de Méndez, en la Sierra Norte del Estado de Puebla, conocimos los sitios donde se presentaron deslizamientos de laderas e inundaciones, ocurridos por las precipitaciones pluviales acaecidas entre los meses de septiembre y octubre de 1999.

Una parte importante del territorio poblano, ubicado en las regiones norte y nororiental, está constituido por serranías de varios cientos de metros de altura que pertenecen a la cadena montañosa de la Sierra Madre Oriental.

A partir de la ciudad de Zaragoza, donde se pasa de zona de valle a sierra, existe una gran variedad de rocas y suelos que conforman las serranías. Entre las rocas encontramos las calizas, lutitas, limolitas y areniscas, todas ellas de origen sedimentario marino, razón por la cual se pueden encontrar entre su estructura fósiles de animales marinos que existieron hace millones de años (Foto 1); también aparecen rocas magmáticas y volcánicas producto de emisiones de lava, lapillis y ceniza arrojados en diferentes eventos por los volcanes existentes en el sitio (Cofre de Perote, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, etcétera). Este último tipo de rocas incluye basalto, tanto masivo como vesicular, además de tobas, las cuales cuando aparecen consolidadas dan origen a materiales que se han utilizado comúnmente en la construcción de fachadas; son rocas suaves y fáciles de labrar. Los materiales anteriores cuando no están consolidados dan origen a suelos granulares pumíticos (arenas limosas) conocidos en la región con el nombre de hormigón o cacahuatillo. Estos materiales son utilizados como agregados en la elaboración de concreto hidráulico o en la fabricación de block.

También pudimos observar en algunos taludes propios de cortes de la sección de la carretera, rocas de origen metamórfico, como

esquistos y pizarras, que según Fries y colaboradores (1962) corresponden al basamento más antiguo de materiales existentes en el estado de Puebla, con edad estimada en más de 900 millones de años.<sup>1</sup>

En la región existen importantes corrientes de agua, como los ríos Apulco, Zempoala, San Lorenzo, etc., afluentes del Tecolutla y del Cazones que desembocan en el Golfo de México; además existen presas que han embalsado el agua de las corrientes fluviales: La Soledad, Nuevo Necaxa, etcétera.

Varios de estos ríos se originan de escurrimientos superficiales y manantiales de la zona: los manantiales de Chignautla que abastecen de agua a la ciudad de Teziutlán. Los ríos han labrado su cauce a través de los materiales volcánicos granulares no consolidados, los cuales fueron depositados en los eventos volcánicos ocurridos posteriormente a la etapa de compresión que se produjo por movimientos tectónicos y que provocaron el levantamiento y exposición de las rocas sedimentarias marinas descritas anteriormente.

En esta región existía, hasta hace algunas décadas, una gran variedad de fauna silvestre: zorro, mapache, armadillo, tigrillo, venado, búho, lechuza, tepezcuintle, jilguero, cardenal, loro, tzenzontle, quetzal, etcétera.

Una gran parte de la población que habita esas regiones pertenece a etnias (nahuas, totonacas, otomies, tepehuanes, etcétera) asentadas en zonas clasificadas como de alta marginación,<sup>2</sup> que no tienen terreno propio, habitan casas de materiales muy frágiles (cartón, madera, lámina), no tienen estudios ni sueldo fijo, y se ocupan en actividades agrícolas una parte del año y como jornaleros en otra, o emigran a centros urbanos.

COSTO DE LOS DAÑOS

Durante 1999, en esta región, se produjeron una gran cantidad de deslaves, fallas de laderas, erosión de suelos, inundaciones, represamiento de ríos que al romperse súbitamente a pocas horas de su formación enterraron bajo lodo varias poblaciones. Esto trajo consigo pérdidas económicas y humanas en más de 80 comunidades de la región norte y nororiental. Las pérdidas materiales ascendieron a más de 2,000 millones de pesos, causaron 44,000 damnificados y afectaron a muchos sectores productivos: vivienda, educación, salud, infraestructura agrohidráulica, electricidad, carreteras y puentes, agricultura, ganadería, forestal, acuícola<sup>3,4</sup> (Tabla I).



TABLA I: COSTO DE DAÑOS POR LAS LLUVIAS DE OCTUBRE DE 1999, EN LAS REGIONES NORTE Y NORORIENTAL DEL TERRITORIO POBLANO

SECTOR/CONCEPTO	DAÑOS DIRECTOS MILLONES DE PESOS	DAÑOS INDIRECTOS	TOTAL	PORCENTAJE DEL TOTAL
SECTORES SOCIALES	505.0	15.0	520.0	22.4
Vivienda	486.1		486.1	20.9
Educación	16.4	15.0	31.4	1.3
Salud	2.5		2.5	0.1
INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS	1,540.0	1.0	1,541.0	66.3
Agua y saneamiento	84.6	1.8	86.4	3.7
Energía (CFE)	481.1		481.1	20.7
Transporte y comunicaciones	974.3			
SECTORES PRODUCTIVOS	190.7	35.0	225.7	9.7
Agropecuaria, pesca y forestal	190.7	35.0	225.7	9.7
Agricultura	132.5	35.0	167.0	7.2
Ganadería	15.4		15.4	0.7
Forestal	35.0		35.0	1.5
Pesca (acuicultura)	7.8		7.8	0.3
ATENCIÓN A LA EMERGENCIA		38.6	38.6	1.6
TOTAL DE EFECTOS	2,235.7	89.6	2,325.3	100.0

NOTA: las cifras contenidas en este cuadro recogen tanto cálculos proporcionados por las entidades oficiales como cálculos propios realizados por los autores con base en diversas informaciones recabadas en el estado. FUENTE: Biltrán D. y Reyes C.<sup>3</sup>

CAUSAS NATURALES Y ANTRÓPICAS

La problemática en las regiones Norte y Nororiente de Puebla es muy compleja e incluye fenómenos como deslizamientos rotacionales y traslacionales de laderas, erosión de suelos y caídos de rocas, lo que dio origen a flujos de suelos y rocas que arrasaron todo tipo de construcciones, pérdidas de importantes superficies de terreno y destrucción de comunidades por impacto de fragmentos de rocas.

Los deslizamientos rotacionales y traslacionales se presentaron fundamentalmente en rocas frágiles y deleznales como lutitas y limolitas, cuyo intemperismo produce suelos finos arcillosos y/o limosos que forman la capa de cobertura superficial donde crecen plantas y arbustos y que, en buena parte de las fallas observadas, correspondía al material que deslizó a lo largo de un plano que delimita el contacto de suelo y del estrato rocoso que no está o está poco afectado por los efectos de intemperismo: cambios estacionales, cambios térmicos, humedad, etcétera. La erosión de suelo por escurri-



miento de agua superficial se observó fundamentalmente en materiales granulares volcánicos no consolidados como arenas pumíticas que contienen algo de limos. La caída de rocas se presentó en zonas de cierta resistencia que presentaban discontinuidades como grietas, fracturas o fisuras, incluyendo calizas de origen sedimentario, tobas ignimbríticas de origen volcánico y rocas de origen metamórfico como esquistos.

La inestabilidad y fallas que sufrieron varias laderas se debieron a una combinación de los siguientes factores naturales: la morfología y topografía de la zona, la geología y características de los suelos de cobertura vegetal, la precipitación pluvial y el escurrimiento superficial; además, los factores antrópicos que incluyen la deforestación, la construcción de obras y el cambio en el uso del suelo.

#### MORFOLOGÍA Y TOPOGRAFÍA

La zona en estudio presenta una morfología de tipo montañoso y escarpado, que incluye cerros con elevaciones de hasta 3,200 msnm (Sierra de Teziutlán y Zacapoaxtla), y algunas planicies o valles; en ambos sitios existen comunidades y poblaciones que están asentadas en laderas muy abruptas o en zonas de inundación próximas a ríos y corrientes de agua (río Zempoala, Apulco, Pantepec, San Marcos).

Debido a que los cerros presentan pendientes muy pronunciadas y alturas de varios cientos de metros, las fuerzas gravitacionales tienen marcada influencia en su estabilidad, afectando el comportamiento de las masas de roca o suelos que constituyen las laderas naturales.

#### PRECIPITACIÓN PLUVIAL Y ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

La precipitación pluvial de 1999, originada por las depresiones tropicales 11 y 14, causó serios daños e inundaciones en el Distrito Federal, Puebla, Veracruz, Tabasco, Campeche y Chiapas. En las sierras Norte y Nororiental del estado de Puebla se registraron precipitaciones del orden de 1,500 mm en tres meses,<sup>5</sup> provocando que los ríos, arroyos y corrientes tributarias aumentaran significativamente su caudal, arrastrando partículas mucho más grandes y en mayor volumen, incrementando su velocidad, su régimen de flujo que durante y después de una tormenta se vuelve turbulento, por lo que aumenta su fuerza erosiva. Esto tuvo un gran impacto en las cuencas pequeñas de

esta zona, las cuales por su fisiografía son mucho más sensibles a lluvias de alta intensidad y corta duración.<sup>6</sup>

La lluvia se infiltró y saturó los suelos que constituyen la capa superficial que cubre las formaciones rocosas de las montañas, que tienen varios metros de espesor y donde crecen plantas y árboles, aumentando su peso por unidad de volumen y provocando las fallas de taludes con superficie de deslizamiento plana o circular, debida a fuerzas gravitacionales.

#### GEOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS SUPERFICIALES

Esta región presenta una geología muy variada, que incluye rocas sedimentarias de la era mesozoica como calizas, conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas; entre estas rocas y cubriéndolas, se encuentran rocas de tipo volcánico de la era cenozoica como basaltos, andesitas, riolitas y tobas ignimbríticas. Los suelos que cubren a las montañas han sido originados por los agentes de intemperismo y desintegración, de los cuales la temperatura, la humedad y la vegetación han sido determinantes en la descomposición de los minerales que integran las rocas subyacentes, dando origen a suelos cohesivos arcillosos y limosos, y suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos.<sup>7</sup>

En una gran parte de la región, las rocas calizas presentan planos de estratificación que delimitan espesores de material variable entre 20 cm y 1 m; estas formaciones son estables cuando la inclinación de la ladera es contraria al buzamiento de los planos estratigráficos. La estabilidad de las laderas conformadas por lutitas y limolitas es precaria, ya que estos materiales presentan planos de foliación con espesores de unos cuantos centímetros, y son rocas muy deleznable y frágiles.

Los suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos, que cubren principalmente a rocas de tipo volcánico, son susceptibles de erosión provocada por escurrimientos de agua, además presentan inestabilidad cuando la inclinación del talud es mayor que su ángulo de fricción interna. Con relación a los suelos finos cohesivos limosos y arcillosos, y sus mezclas con suelos gruesos (grava y arena), su comportamiento depende de su cohesión, que a su vez es un parámetro de resistencia en función de su contenido de agua; suelos de este tipo en estado seco pueden ser resistentes como un tabique, en cambio, si poseen altos contenidos de agua pueden fluir como un líquido viscoso.



FOTO 1. Rocas sedimentarias marinas (calizas del cerro El Cabezón en Tlatlauquitepec).



FOTO 2. Falla en rocas sedimentarias.



FOTO 3. Daños por deslizamiento de laderas.

Además de las características de los suelos y rocas, la geometría del propio talud, incluyendo su altura e inclinación, tienen mucho que ver con su estabilidad.<sup>8</sup>

#### FACTORES ANTRÓPICOS

La naturaleza protegió a las rocas que integran las sierras Norte y Nororiental con una vegetación boscosa que impidió que el proceso erosivo fuera acelerado; sin embargo, las condiciones fueron cambiando paulatinamente a partir de la década de 1940 cuando la población en las partes altas de las vertientes aumentó gradualmente pero en forma sostenida. La nueva población necesitó abrir espacio en los bosques y preparar el terreno para actividades agropecuarias. Esto dio como resultado el desarrollo de una cerrada red caminera que modificó la hidrología; las veredas que se encuentran en las laderas de las cañadas, generan sitios de alta infiltración que aceleran los procesos de saturación y disparan el movimiento de grandes volúmenes de material.

La deforestación, los caminos y el cambio en el uso del suelo, entre otros factores, han provocado una modificación de la flora y la hidrología; la nueva vegetación productiva para el hombre, no necesariamente protege a las rocas con la misma eficacia que los bosques, por lo que ante eventos como el de 1999 amplifican la intensidad y la velocidad del proceso erosivo, dando origen a caídos, deslizamientos, y flujos de suelo y roca.<sup>9</sup> (Foto 2)

#### ZONIFICACIÓN POR RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS

A partir de estudios topográficos, geológicos, de mecánica de suelos e hidrológicos realizados por la Facultad de Ingeniería de la BUAP, se estableció una zonificación preliminar de riesgo por deslizamiento de laderas, fenómeno que causó el 93% de pérdida de vidas, 227 de 243 reportadas por la Secretaría de Gobernación.<sup>10</sup> La zonificación se estableció con base en las siguientes premisas:

a) Las rocas sedimentarias frágiles como lutitas, limolitas o areniscas, cuyos suelos residuales presentan superficies de falla rotacional que se originan por la reducción de su resistencia al esfuerzo cortante y variación de su consistencia (pasando de un estado sólido a plástico y finalmente a viscoso al aumentar su contenido de agua), tienen pendientes entre 15 y 25 grados, resultando muy atractivos para la construcción de viviendas sobre su talud. Estas laderas fallan súbitamente una vez que el suelo se satura y se comporta como fluido viscoso; las fallas registradas en la colonia Aurora de Teziutlán, La Legua, Mexcalcuautla, Necaxaltepetl, Tetela de Ocampo y Pahuatlán son de este tipo. Todas estas fallas se presentaron en zonas deforestadas.

b) Los materiales volcánicos granulares constituidos por arenas pumíticas, vulnerables a las corrientes de agua superficial, presentaron en general superficies de falla plana típica de suelos friccionantes. En este caso, aunque hubo pérdidas económicas, no hubo decesos, cuando se acumula una considerable cantidad de agua que fluye ladera abajo, generalmente la población busca lugares seguros en las

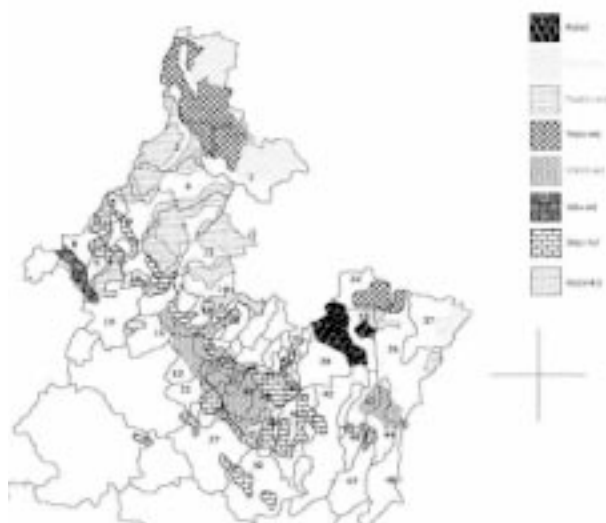


FIGURA 1. Zonificación de riesgo por deslizamiento de laderas en el estado de Puebla. Municipios: 1. Metlatlayuca, 2. Pantepec, 3. Venustiano Carranza, 4. Jalpan, 5. Tlaxco, 6. Tlacuilopec, 7. Xicotepec de Juárez, 8. Pahuatlán, 9. Naupan, 10. Huachinango, 11. Nuevo Necaxa, 12. Zihuateutla, 13. Tlaola, 14. Jopala, 15. Chiconcuautla, 16. Tlapacoya, 17. San Felipe Tepatlán, 18. Bienvenido, 19. Ahuacatlán, 20. Amixtlán, 21. Tepango de Rodríguez, 22. Tepetzintla, 23. Camocuautla, 24. Zapotitlán de Méndez, 25. Zongozotla, 26. Cuautempan, 27. Tetela de Ocampo, 28. Huitzilán de Serdán, 29. Xichitlán de Vicente Suárez, 30. Nauzontla, 31. Zoquiapan, 32. Jonotla, 33. Tuzamapan de Galeana, 34. Tenampulco, 35. Ayotoxco de Guerrero, 36. Hueytamalco, 37. Acateno, 38. Cuetzalan de Progreso, 39. Zautla, 40. Xochiapulco, 41. Zacapoaxtla, 42. Tlatlauquitepec, 43. Hueyapan, 44. Teziutlán, 45. Teteles de Ávila Castillo, 46. Atempan, 47. Chignautla, 48. Xiutetelco.

partes altas o en las planicies más seguras (Coahuixco, Tlatlauquitepec, Apulco, Nexticapan).

c) La caída de rocas, que va acompañada con fuertes corrientes de agua, produce considerable ruido, lo que permitió el desalojo de la población de Atotocoyan; en esta comunidad 50% de las casas quedaron destruidas por el impacto de piedras caídas de una ladera de más de 200 m. de altura.

En la figura 1 se presenta la zonificación mencionada anteriormente. En las áreas indicadas en la figura se encuentran laderas que presentan morfología de tipo lomerío, las cuales se pueden clasificar como sitios de alto riesgo para las familias y construcciones emplazadas en la corona, el cuerpo del talud o al pie de la misma. Las características de estas laderas son: pendientes del orden de 20 grados; deforestación; emplazamiento de viviendas en la cresta, en su parte media o en su pie; corte en alguna parte de la ladera para la construcción de un camino u obras.

#### RIESGO GEOTÉCNICO Y CONSTRUCTIVO

Esta zonificación fue realizada desde el punto de vista geotécnico y constructivo, e implica que los materiales que exis-

ten en esa zona son susceptibles de experimentar fuertes cambios en sus propiedades mecánicas (resistencia y compresibilidad), al variar su contenido de agua o al experimentar decompresión de la rocas por cortes efectuados en las laderas, situación que provoca que pasen de una condición de estabilidad a una de deterioro acelerado. Estos materiales presentarán en general buena resistencia en estado seco y se comportarán como un sólido, pero al aumentar su contenido de agua pasarán a un estado plástico y posteriormente a uno viscoso con un comportamiento similar al de un líquido, lo que los hace muy peligrosos al saturarse durante o después de la época de lluvias.

Las construcciones en las laderas de materiales sedimentarios (lutitas y limolitas), pueden sufrir daños como agrietamientos, desplome, distorsión y hundimientos (Foto 3). Varios de los deslizamientos rotacionales observados en materiales de este tipo, se originaron en la zona donde se había efectuado previamente un corte para un camino o para conformar una terraza para una vivienda. De ahí la importancia de contar con un estudio geotécnico de estabilidad que contemple el diseño de estructuras de contención. También debe recomendarse la reforestación de los sitios clasificados como de riesgo.

#### N O T A S

- <sup>1</sup> Consejo de Recursos Minerales, "Monografía Geológica-Minera del Estado de Puebla", Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1999.
- <sup>2</sup> INEGI, Censo Nacional de Población y Vivienda, 2000.
- <sup>3</sup> Beltrán, D. y Reyes, C., "Evaluación del impacto económico de las inundaciones ocurridas en octubre de 1999 en el estado de Puebla", SEPROCI-CENAPRED, 2000.
- <sup>4</sup> Morales, M., "Resultados de las acciones emprendidas con motivo de las lluvias ocurridas en octubre de 1999, Informe de la Secretaría de Gobernación, 2001.
- <sup>5</sup> CNA, "Evaluación de daños por inundaciones", reporte interno Gerencia de la Comisión Nacional del Agua, 2000.
- <sup>6</sup> Springall, R., "Hidrología primera parte", Series del Instituto de Ingeniería D-7, UNAM, 1980.
- <sup>7</sup> Bowles, J., "Physical and Geotechnical properties of soils", Chapter 2<sup>nd</sup>, Soil properties, and Chapter 13<sup>th</sup>, Shear Strength of soils, Mac Graw Hill, 1989.
- <sup>8</sup> Winterkorn and Fang, "Foundation Engineering Handbook", Chapter 11<sup>th</sup> Landslides, Van Nostrand Reinhold, 1985.
- <sup>9</sup> Cuanalo, O., "Proyecto de investigación de riesgo en taludes y laderas naturales de la Sierra Norte y Nororiental del estado de Puebla", Informe Técnico de la FI-BUAP a SEPROCI, 2001.
- <sup>10</sup> Gobierno del Estado de Puebla, "Evaluación preliminar de daños por inundaciones en el estado de Puebla", reporte, 1999.

Oscar Andrés Cuanalo Campos es profesor de la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Guillermo Melgarejo Palafox es director general del Sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Puebla. oscarcuanalo@hotmail.com.