

Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México

Víctor Hugo Garduño-Monroy*, Eleazar Arreygue-Rocha, Isabel Israde-Alcántara y Gerardo M. Rodríguez-Torres

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Instituto de Investigaciones Metalúrgicas-Departamento de Geología y Mineralogía, Edif. "U", Ciudad Universitaria, Morelia, Mich., México,

**vgmonroy@zeus.ccu.umich.mx*

RESUMEN

En las últimas dos décadas muchas zonas urbanas en el centro de México han sido afectadas por hundimientos diferenciales del suelo. Generalmente estos procesos se han ligado solamente a la sobreexplotación de acuíferos. En este trabajo presentamos los aspectos generales del fallamiento en zonas urbanas y una descripción de las fallas geológicas de Morelia, Michoacán. En Morelia este tipo de fenómeno inició en 1983, primero como grietas con desplazamientos casi imperceptibles, que poco a poco evolucionaron hasta alcanzar una geometría de fallas de tipo normal con movimientos diferenciales acumulados hasta de 100 cm. Sus direcciones varían de N30°E a N80°E y coinciden con las del fallamiento tectónico regional. Los movimientos verticales en las fallas debidas a sobreexplotación son de 4 a 6 cm anuales. Las zonas de influencia de las fallas, definida por el área en donde se observan daños a las obras civiles, puede ser en algunos lugares hasta de 5 m, dependiendo de la geometría de las estructuras. Desde 1983 estas fallas han afectado a un gran número de construcciones, algunas de las cuales se han tenido que demoler. También han dañado obras de infraestructura como calles, tuberías de drenaje y de agua potable.

Entre las fallas de Morelia, dos son tectónicas y potencialmente sísmicas; ellas forman parte del sistema de Morelia-Acambay en donde se han registrado eventos sísmicos en tiempos históricos. Asociadas al escarpe de una de ellas existen zonas de inestabilidad en donde suceden movimientos en masa. Las fallas geológicas de la ciudad de Morelia, como en otras ciudades de México (Celaya, Querétaro, Salamanca, Irapuato, Aguascalientes, etc.), afectan a sectores de distintos estratos sociales, a zonas industriales, hospitales, colonias de escasos recursos y zonas de tipo residencial.

Palabras clave: fallas normales, fluencia, sismicidad, peligros geológicos, Morelia.

ABSTRACT

During the last two decades differential ground subsidence has affected many urban centers in Mexico. This process has been commonly related only to over-exploitation of subsurface water resources. In this work we discuss general problems of geological faulting in urban centers and we present the description of faults in Morelia, Michoacán state. In Morelia, differential ground subsidence started in 1983 when ground gashes with very small displacement started to form. Subsequently these gashes evolved to form a network of normal faults that accumulated up to 100 m displacement. These faults trend between N30°E and N80°E and coincide with the orientation of regional tectonic faulting affecting the basin basement. The vertical displacement of these faults is 4 to 6 cm per year. The deformation zone affected by a single fault, estimated by the damage caused to man-made structures, depends on the geometry of the fault and can be as wide as 5 m. Since 1983 faults affected a significant number of buildings, some of them to such an extent, that they had to be demolished. Other man-made structures such as streets, drainage and water pipes were also damaged. Two of the faults recognized in Morelia are of clear tectonic origin and we consider them po-

tentially seismic. They belong to the Morelia-Acambay fault system, which experienced historic earthquakes. Constant landslides are associated with one of them. Fault displacements in Morelia and other cities in Mexico (Celaya, Queretaro, Salamanca, Irapuato, Aguascalientes etc.) have a strong impact on the society, as they affect industrial parks, hospitals, underdeveloped districts and residential zones.

Keywords: normal fault, creep, geological hazard, seismicity, Morelia.

INTRODUCCIÓN

La parte norte del estado de Michoacán se caracteriza por una alta actividad sísmica y volcánica. En esta región, que pertenece al Cinturón Volcánico Mexicano (CVM, Figura 1), han ocurrido algunos de los sismos históricos más violentos en el Centro de México (Garduño-Monroy *et al.*, 1998) y existen más de 1,000 volcanes monogenéticos en lo que se ha llamado el campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985). Algunos de estos centros representan el vulcanismo más reciente en el CVM, que se manifestó históricamente en 1759 con la formación del volcán Jorullo y en 1943 con el nacimiento del volcán Parícutín (Luhr and Simkin, 1993, Silva-Mora, 1995).

Desde 1983, en la capital del estado de Michoacán, Morelia, y en otras ciudades del norte y centro de México, se empezaron a apreciar problemas de hundimientos diferenciales a lo largo de trazas lineales, ocasionando daños importantes en obras civiles (Martínez-Reyes y Nieto Samaniego, 1990; Trujillo-Candelaria, 1985; Garduño-Monroy *et al.*, 1999 y Lermo-Samaniego *et al.*, 1996). Dichos hundimientos definen trazas rectas en la superficie con direcciones paralelas a sistemas de fallas regionales. En la ciudad de Morelia las zonas dañadas son preferencialmente de dirección NE-SO, pero también se observan fallas con dirección E-O que están generando problemas de inestabilidad de taludes (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, Arreygue-Rocha, 1999). Suter *et al.* (1995) consideran que estas estructuras forman parte de la zona de falla Chapala-Tula con movimientos históricos, como los ocurridos en las depresiones de Chapala, Cuitzeo y Acambay en 1568 y 1912.

Desde 1984 investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y del Instituto Politécnico Nacional iniciaron el estudio de una

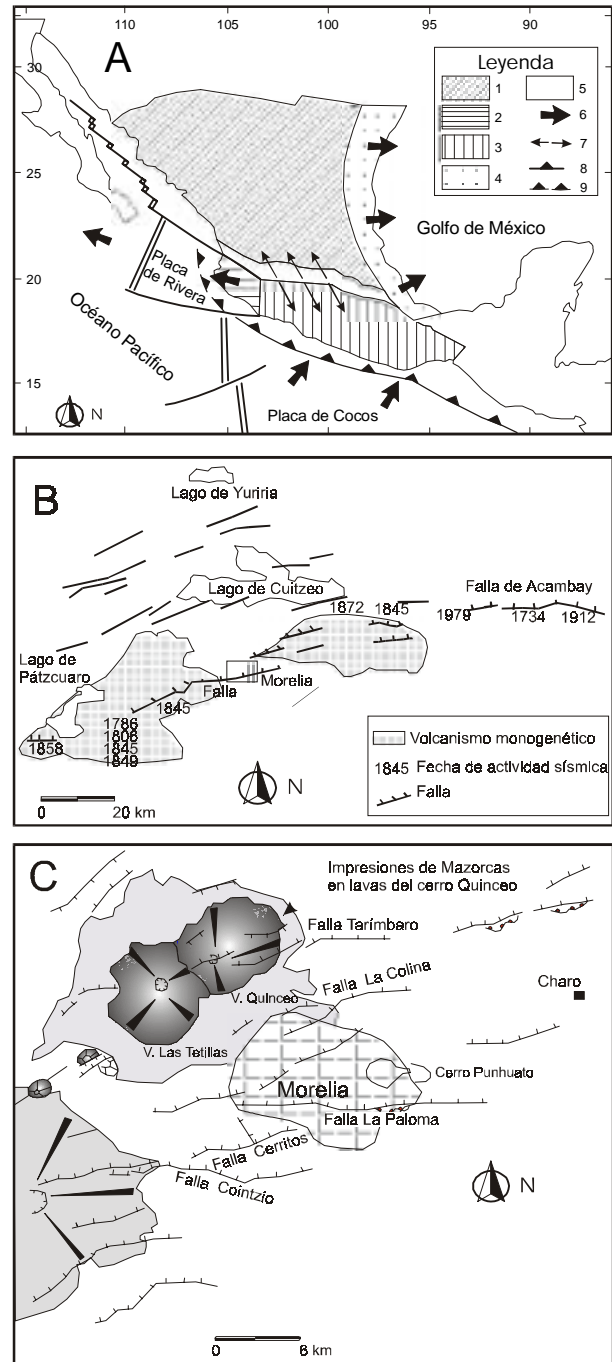


Figura 1. Localización de la zona de estudio. A. Contexto geodinámico de México de acuerdo con el campo de esfuerzos que se registran con el movimiento de placas; 1. Placa de Norteamérica; 2. Bloque Jalisco; 3. Terrenos estratotectónicos de arcos volcánicos del sur de México; 4. Planicie Costera del Golfo; 5. Cinturón Volcánico Mexicano (CVM); 6. Movimiento relativo de placas; 7. Distensión en el CVM; 8. Zona de subducción; 9. Subducción en la Placa Rivera. B y C. Planos de localización de la zona de Morelia-Cuitzeo, donde se puede apreciar la importancia de las fallas geológicas NE-SW. En esta figura también se ha localizado el sitio donde se encontraron las impresiones de mazorcas en la falda oriental del volcán Quinceo, el cual se encuentra fallado por las estructuras de Tarimbaro.

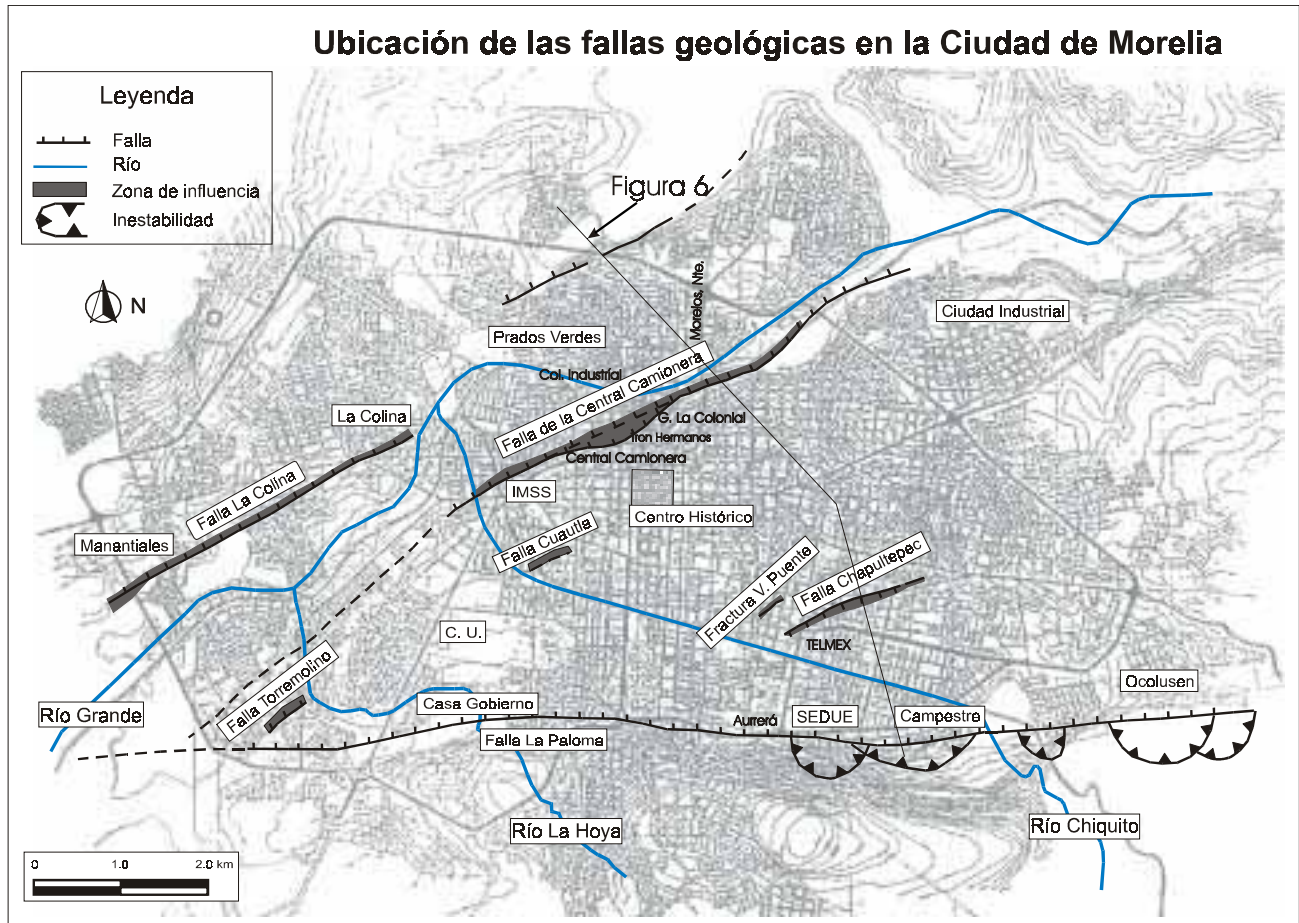


Figura 2. Plano de Morelia con las fallas geológicas ligadas a fenómenos de fluencia (Central Camionera, Chapultepec, Torremolino) y las potencialmente sísmicas (La Paloma y La Colina). Sobresale la estrecha relación que existe entre las direcciones de las fallas de la ciudad de Morelia y las fallas regionales. Las partes sombreadas señalan la zona de influencia de las fallas. También se observan las coronas de la inestabilidad de taludes de la falla La Paloma.

serie de fallas que afectan a las obras civiles de las poblaciones de Santa Ana Maya, Tarímbaro y de la Ciudad de Morelia (La Voz de Michoacán, 1988). En Morelia, las zonas más afectadas son las colonias Colina-Tres Puentes y Avenida Héroes de Nocupétaro. Todas estas estructuras geológicas tienen dirección NE-SO, similar a la de las fallas de la región (Figuras 2 y 3). En 1988 se habían identificado en la Ciudad de Morelia las fallas: La Colina, Central Camionera, Chapultepec y La Paloma (Figuras 2 y 3). Para 1993 el número de fallas aumentó a cinco cuando se observó desplazamiento en la falla de Torremolino. Hasta la fecha se han identificado dos fallas más: Cuautla y Ventura Puente, las cuales iniciaron su movimiento a finales de los años 90.

En este trabajo se describen los estudios realizados en las estructuras que afectan obras civiles en la ciudad de Morelia, poniendo en relación los datos geológicos de superficie y del subsuelo. De acuerdo a sus características agrupamos las fallas de Morelia en dos tipos: fallas geológicas que se han reactivado por la actividad humana y fallas tectónicas potencialmente sísmicas. Los daños a las obras civiles de Morelia parecen estar asociados a

hundimientos diferenciales por compactación o bien, por su morfología, a inestabilidad de taludes en los escarpes de las fallas tectónicas (Jara *et al.*, 1994; Suter *et al.*, 1995; Garduño-Monroy, *et al.*, 1998; Garduño-Monroy y Escamilla, 1996; Garduño-Monroy, *et al.*, 1997; Arreygüe-Rocha *et al.*, 1998) (Figuras 2 y 3). Sin embargo, se analizan también las fallas que pueden ser potencialmente sísmicas, debido a que tienen una orientación similar al sistema Morelia-Acambay con segmentos activos, y a que afectan derrames de lavas del Holoceno.

GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA

La ciudad de Morelia se localiza en la intersección de dos provincias geológicas (Figuras 2 y 3). Al sur, el vulcanismo miocénico formó la Sierra de Mil Cumbres (SMC), que forma parte de la Sierra Madre del Sur (Pasquaré *et al.*, 1991; Silva-Mora 1995). Al norte se encuentran volcanes monogenéticos y conos de lavas pertenecientes al campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985), que forma parte del

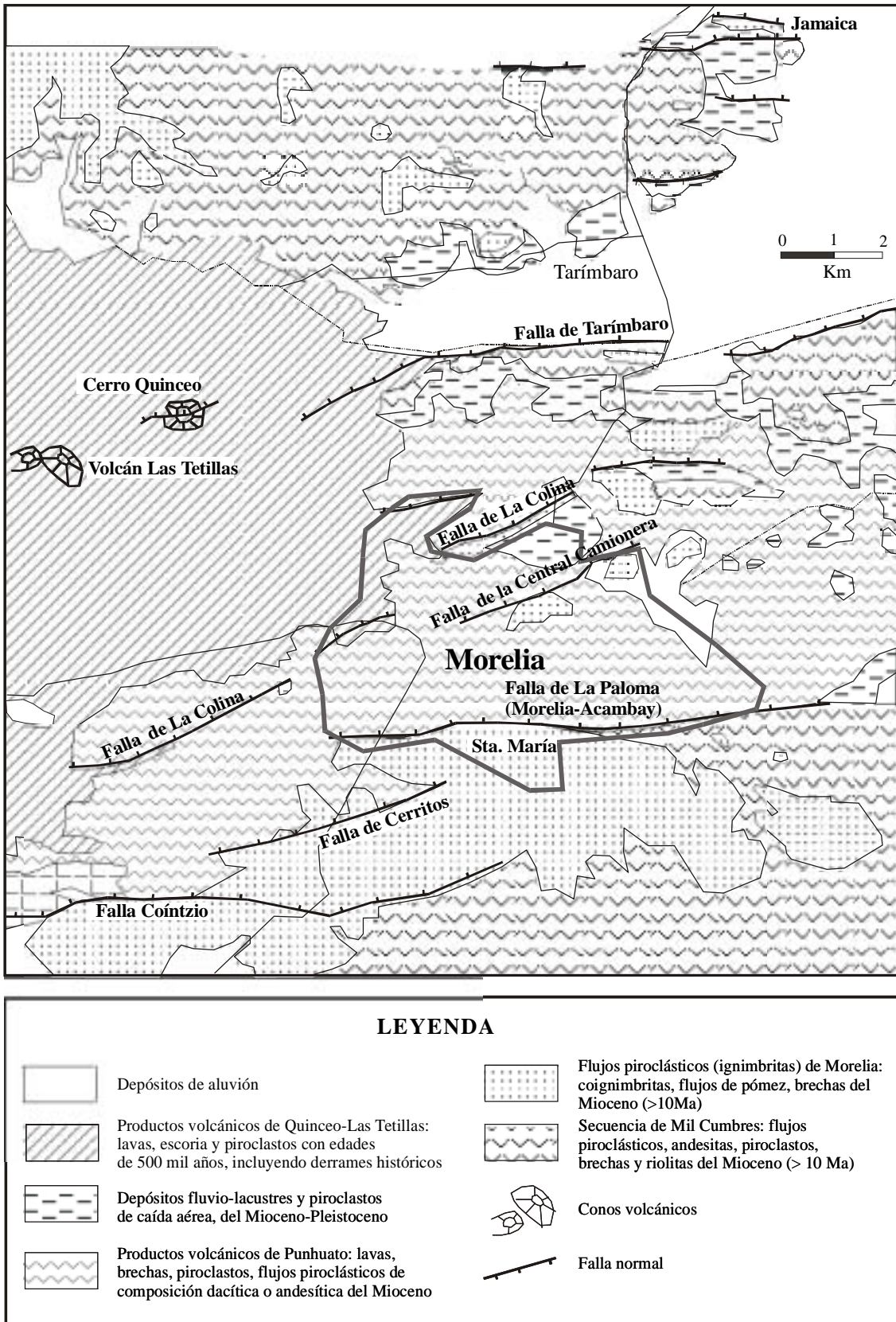


Figura 3. Mapa geológico de la zona de Morelia, donde se pueden observar las unidades correspondientes a la Sierra de Mil Cumbres y las unidades del Cintur3n Volcánico Mexicano. También sobresalen las fallas regionales NE-SW y E-W, las cuales son paralelas a las estructuras que dañan a la mancha urbana. Hay que destacar que una gran parte de Morelia se localiza en zona de antiguos lagos, ahora cubiertos por dep3sitos de aluvi3n.

CVM. Estos últimos cubren a secuencias lacustres del Mioceno-Plioceno (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 1999) emplazados en cuencas pertenecientes a un segmento del sistema de fallas Morelia-Acambay (Suter *et al.*, 1991 y 1995) (Figura 1).

La estratigrafía de la región de Morelia está constituida por las siguientes unidades, que se describen de la base hacia la cima:

Andesitas del Mioceno

Esta unidad es un paquete de lavas andesíticas de color verde intensamente alteradas y fracturadas que a menudo alternan con horizontes piroclásticos o con derrames de composición más máfica. La secuencia abarca un rango de edades de 20 a 8 Ma, correspondiente al Mioceno (Demant, 1981; Pasquaré *et al.*, 1991; Silva-Mora, 1979, 1995). Estas rocas afloran en la cañada del Río Chiquito, en el sector sureste de la Ciudad de Morelia. En el subsuelo de la ciudad se han identificado claramente en los pozos perforados en la zona de Ocolusen.

Ignimbrita de Morelia (Cantera de Morelia)

Esta unidad consiste de varios horizontes de flujos piroclásticos de composición riolítica. Del nivel superior, más soldado, se ha obtenido desde la época colonial la cantera para construir los edificios más importantes de Morelia. Cerca de su zona de emisión se compone de una brecha de rezago constituida por material juvenil y fragmentos líticos accidentales de andesita del Mioceno. Siguen unidades de flujo piroclástico de color claro con bloques o lapilli de pómez alargados. Sobre éstas se observa un flujo piroclástico con más fragmentos líticos y más deleznable que el anterior. En la cima hay una toba de flujo piroclástico soldada de color rosa, con grandes fiammes de pómez. Este nivel, más resistente a la erosión, es el que controla la morfología de la zona de Morelia. Una parte de estos flujos piroclásticos provienen, según estudios en proceso, de la caldera de Atécuaro, localizada al sur de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). El espesor de la secuencia varía desde pocos metros a más de 200 m. Su edad es Mioceno de acuerdo a la fecha de 18 ± 0.5 Ma obtenida por Pasquaré *et al.* (1991) al oeste de Morelia.

Secuencia volcánica del Cerro Punhuato

Esta secuencia de rocas está constituida por derrames de lava de composición andesítica y dacítica, asociados con domos expuestos en la zona del Cerro Punhuato, al oriente de Morelia. El complejo del Cerro Punhuato presenta una estructura en herradura y los productos piroclásticos asociados forman un abanico al oriente

de la ciudad de Morelia, lo que se interpreta como evidencia de una gran explosión lateral. Su edad no se conoce, pero se podría ubicar dentro del Mioceno ya que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior -Plioceno (Israde, 1995) (Figura 1).

Secuencia lacustre

Esta secuencia aflora en la parte sur de Morelia, donde los pozos perforados han cortado espesores hasta de 40 metros de depósitos fluviolacustres. A través del análisis microscópico detallado de los sedimentos lacustres se observaron algas constituidas por un caparazón silíceo (diatomeas). Las especies presentes sugieren ambientes lacustres con tirantes de agua muy bajos. En el sector norte de Morelia, la secuencia sobreyace a un basamento volcánico y está constituida por una alternancia de arenas, gravas y limos. Todo está coronado por un depósito piroclástico de caída aérea, denominado "Alegría", que puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Hacia el sur, la secuencia se adelgaza pero conserva su aspecto granular de tipo sacaroides. Culmina hacia arriba o lateralmente con limos de color café que están cubiertos por depósitos volcánicos de caída aérea.

La secuencia lacustre presenta su más completa exposición en la región de Charo, donde los fechamientos radiométricos en productos volcánicos indican una edad Mioceno tardío a Plioceno tardío (Garduño, *et al.*, 1997). Sin embargo, los restos de un proboscido, encontrados en las excavaciones del edificio del Instituto Mexicano del Seguro Social en la ciudad de Morelia, permiten inferir que esta secuencia lacustre puede extenderse hasta el Pleistoceno (Israde-Alcántara *et al.*, 1992; Israde-Alcántara, 1995 Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).

Secuencia volcánica holocénica

La unidad estratigráfica más reciente de la región de Morelia corresponde a productos del vulcanismo monogenético del CVM. Son lavas andesítico basálticas y basálticas que provienen de los volcanes Cerro Quinceo y Cerro Las Tetillas. Este último, por su morfología y sus relaciones estratigráficas, es el más joven. Cabe mencionar que lavas del Cerro Quinceo, en las cercanías de la hacienda de la Magdalena (al norte de Morelia), contienen impresiones de mazorcas de maíz (Martínez y Hobson, 1907), lo cual demuestra que estos edificios volcánicos tuvieron actividad histórica. Por otro lado, las evidencias del polen del maíz más antiguo (*Zea*) en estas zonas lacustres es de 3,500 años (Watts y Bradbury, 1982), por lo que las lavas que contienen las impresiones de mazorcas debieron ser producidas en los últimos miles de años. La hacienda de la Magdalena, lugar donde

fueron encontradas estas impresiones de maíz, se localiza en la misma zona donde estas lavas están cortadas por la falla de Tarímbaro de dirección E-O (Figura 1).

FALLAS GEOLÓGICAS DE LA CIUDAD DE MORELIA

Definición

En este trabajo dividimos a las estructuras activas estudiadas en la ciudad de Morelia en dos grupos:

a). Estructuras que son paralelas a los sistemas de fallas regionales NE-SO y se desplazan continuamente por *creep* o fluencia (Radbruch, *et al.*, 1966). Estas fallas solo afectan a los suelos y a las secuencia fluviolacustres del Mioceno-Pleistoceno que forman el relleno de la cuenca donde se asienta la ciudad. Debido a procesos antrópicos, se han reactivado en la zona donde las estructuras afectan a los sedimentos fluviolacustres, donde pueden existir cambios de volumen o movimientos de flujo (fluencia) por extracción de agua

b). Fallas potencialmente sísmicas, conforme a los criterios definidos por la Comisión Reguladora de Energía Atómica de Estados Unidos (Sauter, 1989), es decir aquellas donde ha ocurrido acumulación de esfuerzos y desplazamientos súbitos durante los últimos 35,000 años. En estas últimas se han encontrado evidencias morfológicas y estratigráficas de rupturas durante el Holoceno, pero no hay registro histórico o instrumental de sismicidad asociada a ellas. Estas fallas, en algunos lugares, se encuentran ligadas a inestabilidad de taludes.

Fallas geológicas ligadas a hundimientos

Son rupturas con orientación NE-SO, con movimiento diferencial entre los bloques claramente identificado (Figura 2). Pertenecen a este grupo las fallas La Colina, Central Camionera, Torremolino y Cuautla, todas con bloque hundido en el lado norte. Sin embargo, existe otra falla de este tipo cuyo bloque bajó hacia el sur (falla Chapultepec). Las dos primeras fallas ya se observaban en los mapas topográficos editados por el INEGI en 1977, por lo que tenían una expresión geomorfológica antes de que la zona urbana las cubriera. Otras no presentan relieve morfológico (Chapultepec, Torremolino y Cuautla). El desplazamiento actual de estas fallas está ligado a la sobreexplotación del acuífero somero, al comportamiento mecánico de los suelos (*creep*) y a las técnicas de extracción del agua (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). Su movimiento asísmico presenta etapas críticas de hundimiento (colapso) asociadas a periodos en los que el fenómeno El Niño ha sido especialmente intenso en humedad (Niño = colapso) y a un periodo largo de sequía (Niña = *creep* o fluencia) (1982-1983, 1997-1998) (Garduño-Monroy *et al.*, 1999) (Figura 4).

Aparentemente el movimiento de estas fallas sucede sobre la traza de fallas NE-SW preexistentes, ahora cubiertas por sedimentos recientes y suelos. En este proceso de hundimiento, el fenómeno de fluencia y la deformación diferencial son los que permiten que solamente los sedimentos fluviolacustres se deformen, dañando las viviendas y las obras civiles. La fluencia consiste en una deformación continua en el tiempo en sedimentos previamente consolidados (Radbruch *et al.*, 1966), que por extracción de agua sufren un cambio en la presión de poro y por consecuencia en su espesor, por lo cual se comprimen y se hacen más delgados. Es importante reafirmar que este tipo de movimiento es asísmico y no afecta a la unidad estratigráfica subyacente (*i.e.* ignimbrita de Morelia) (Garduño-Monroy *et al.*, 1999).

Falla de la Central Camionera

Esta estructura es la de mayor extensión en la zona urbana y la que presenta un rasgo morfoestructural más claro. Tiene una dirección N60°E, que puede seguirse por varios kilómetros (Figuras 2 y 3). Su segmento más activo se localiza entre las instalaciones del IMSS y la Av. Morelos Norte con geometría variable (Figura 2). Dentro de este segmento se encuentran sectores donde la traza de la falla es curva, lo que provoca la formación de pequeñas estructuras tipo *pull apart*. Estas estructuras se han identificado, de E a O en: la gasolinera La Colonial, la Colonia Industrial, la fábrica Tron Hermanos, la Central Camionera y en las instalaciones del IMSS (Lámina 1, a y b). Esta geometría ha producido una zona de influencia de más de 25 m en el sector NE, en tanto que en el sector SO la zona de influencia no supera los 10 m. El desplazamiento vertical de esta falla geológica fue de más de 50 m, considerando la cima de la ignimbrita de Morelia en el Centro Histórico y aquella cortada por los pozos en la zona de Héroes de Nocupétaro. A principios de los 80, se comenzó a manifestar un hundimiento progresivo con mayor evidencia en la Central Camionera, en la fábrica de aceites Tron Hermanos, en varias casas habitación y en la avenida Héroes de Nocupétaro (Lámina 1, c y d). Tomando en cuenta el monitoreo que se está realizando con testigos tanto en las calles como en las viviendas y si se considera que el hundimiento inició en 1983 y que el desnivel mínimo actual es de 80 cm, podemos suponer que su actividad es constante, con una media de hundimiento de 5 cm anuales. También en ese periodo se dañó la tubería de la estación de gasolina La Colonial, donde se realizaron trabajos de remodelación en el muro oriental y en las oficinas. Una nueva reactivación de la falla ocasionó severos daños en noviembre de 1997; durante esta crisis la zona fue afectada por la presencia de productos inflamables en la red del drenaje. Asimismo, se ha corroborado que esta estructura se encuentra debajo de las instalaciones del Seguro Social, las cuales han sufrido y continúan sufriendo daños constantes. Para construir la torre del IMSS, se hicieron algunas perforaciones con la finalidad de conocer las característi-

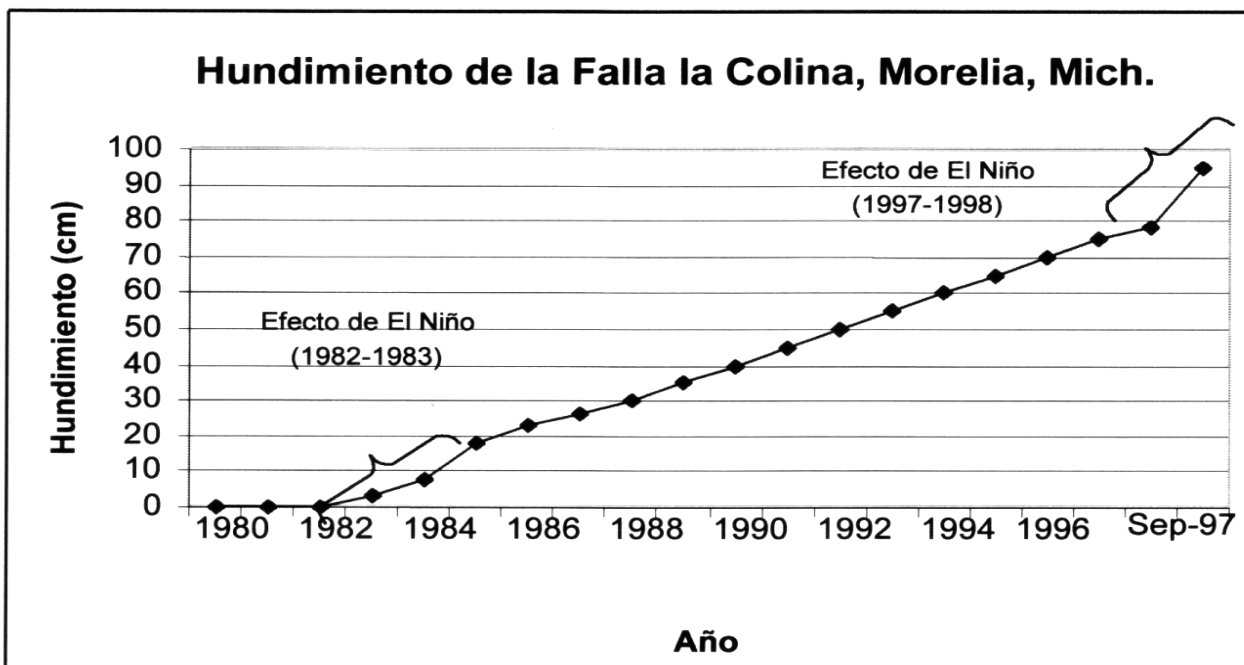


Figura 4. Comportamiento del desplazamiento vertical de las fallas en la Ciudad de Morelia, basado en nivelaciones topográficas y de testigos (Fotografía 2). Destacan dos periodos de colapsos importantes y en corto tiempo, éstos corresponden a la presencia de los dos fenómenos de El Niño-La Niña más grandes en la historia (1983-1984 y 1997-1998). Entre estos dos eventos mayores, el hundimiento está ligado principalmente a la geometría de las fallas geológicas preexistentes y al fenómeno de fluencia o *creep*

cas del subsuelo de este sector de Morelia y así diseñar la cimentación del edificio. Los sondeos reportaron un desnivel considerable del sustrato rocoso, constituido por la cantera de Morelia. El sondeo S-11, localizado al sur de las instalaciones del IMSS (Figura 5), encontró la cantera a 12.5 m de profundidad, mientras que el sondeo S-12, localizado al norte, cortó una columna de 20 m sin encontrar evidencias de la Cantera de Morelia. Estos datos prueban la existencia de un desnivel de más 10 m y sugieren la existencia de una falla tectónica normal sepultada, con el bloque hundido hacia el NO (Figuras 2 y 6). Estudios posteriores realizados por el Seguro Social ratificaron la existencia de esta falla geológica en el subsuelo.

En octubre de 1998 se produjo una nueva crisis de hundimientos, sobre todo en el segmento de falla que va de la Central Camionera al Pípila. Dicho fenómeno provocó un desplome del suelo de aproximadamente 15 cm durante el periodo de octubre a noviembre de 1998. En el segmento del Seguro Social el hundimiento es progresivo y afecta principalmente a la Torre (edificio de urgencias) y a las instalaciones de Gineco-obstetricia, las cuales continúan hundiéndose hacia el NO, con tasas de 4 a 6 cm/año.

Hasta ahora los daños materiales originados por esta estructura geológica llegan a superar los cinco millones de pesos entre daños a las viviendas, hospitales, edificios públicos, fábricas y obras hidráulicas.

Falla Chapultepec

Es una estructura que tiene escasa expresión morfológica, por lo que su existencia ha despertado controversia; hasta ahora su traza se ha seguido por aproximadamente 1,300 m. con una dirección NE-SO y con un desnivel de 50 cm hacia el SE. Desde el punto de vista geofísico, su expresión es clara tanto en los estudios geoelectrónicos, gravimétricos como de georradar.

Esta estructura afecta a más de 40 casas habitación de tipo residencial, un edificio de condominios, el Seminario Claretiano, una escuela pública, varias calles y avenidas. Inicialmente se consideró que el daño en las casas se debía a arcillas expansivas y a la extracción de agua que se lleva a cabo en el pozo del Boulevard García de León (Teléfonos de México). Sin embargo, los primeros trabajos geológicos y geofísicos han revelado que se trata de una zona lineal orientada NE-SO. En esta área existen casas que han sido reparadas hasta tres veces en el período comprendido entre 1983 y 1990; a la fecha nuevamente se encuentran fracturadas. En los últimos tres años la falla se ha propagado en dirección SO, dañando nuevas zonas urbanas.

Actualmente el extremo NE de la falla termina en la intersección con la avenida Lázaro Cárdenas y hacia el SO sobrepasa el Boulevard García de León y sigue hasta la colonia El Empleado. En resumen, esta falla afecta a una parte de las colonias Chapultepec Oriente, Chapultepec Sur y El Empleado (Figura 2).



Lámina 1. a y b. Fracturamiento del piso de una casa que muestra la formación de una zona de transferencia donde se genera un *pull apart*. Este tipo de estructura se está desarrollando en la zona de la central Camionera, donde las zonas de transferencia hacen aumentar la áreas de influencia de las fallas. En b se puede apreciar cómo es más ancha la zona de daños.
 c y d. Testigo colocado en la falla de la Central Camionera en 1983. En su inicio las dos láminas se colocaron paralelas, ahora se puede constatar un desplazamiento efectivo de más de 30 cm en la obra civil.
 e y f. Casa dañada de 1983 (e) a 1995 (f) por la falla La Colina. Se puede apreciar cómo la estructura se va hundiendo hacia el lado izquierdo (NW). Estas fotografías hacen ver el grado de hundimiento que han y están sufriendo las viviendas a lo largo de estas estructuras. Servirá para estimar si es oportuno reconstruir una nueva vivienda o dar otro uso al terreno.

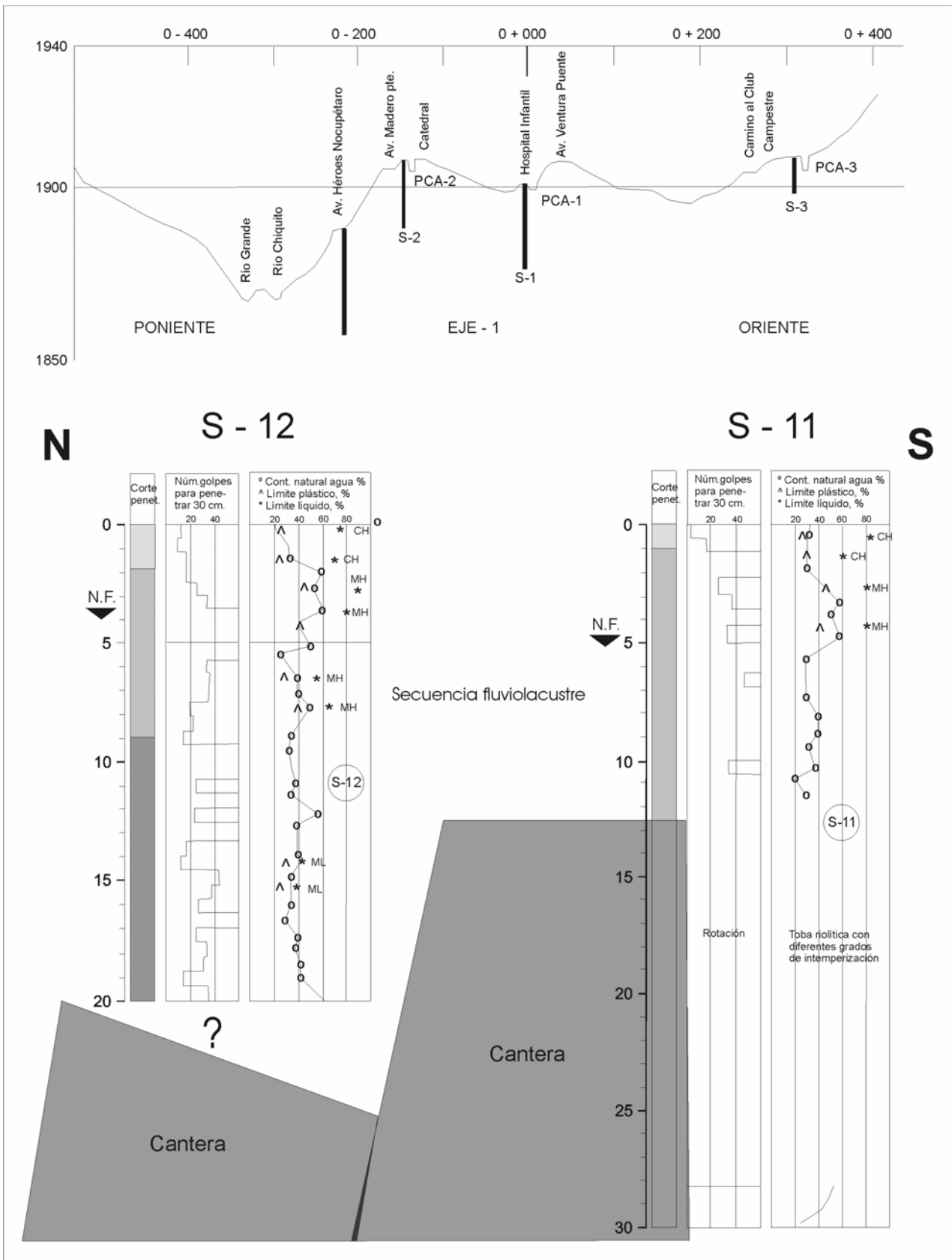


Figura 5. Sondeos realizados para las obras civiles del IMSS. En ellos se puede apreciar el desnivel de más de 10 m en la cima de la ignimbrita Morelia, lo que sugiere la presencia de una falla geológica, visible por los cambios de topografía, pero seguramente sepultada por material reciente. Esta misma estructura fue observada en las secuencias fluviolacustres de la avenida Héroes de Nocupétaro, con desplazamientos de hasta 3 m.

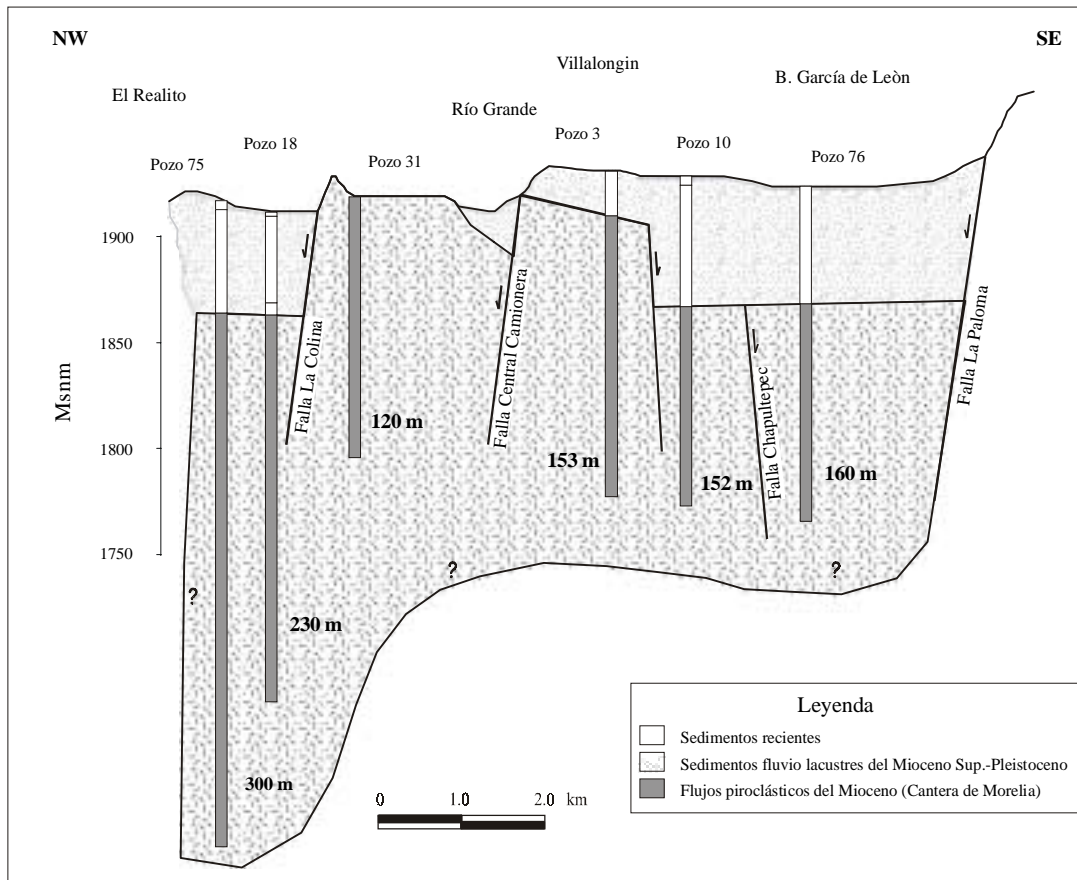


Figura 6. Perfil norte-sur de la Ciudad de Morelia, donde con la información derivada de la perforación de los pozos para agua se ha configurado el comportamiento de las ignimbras del Mioceno (Cantera de Morelia). Se observa con mucha claridad que fallas como La Paloma y Central Camionera tienen una gran expresión en el subsuelo.

Su desnivel es variable pero es más visible en la parte central, es decir entre el Boulevard García de León y el Deportivo Chapultepec. Su zona de influencia también es variable; en la zona central es de 30 m hacia ambos lados de la falla; hacia la parte del Seminario Claretiano es de 10 m en ambos lados; y, hacia el sur del Boulevard García de León, por ahora es de 5 metros hacia ambos lados de la falla. Considerando un desnivel máximo de 50 cm se podría decir que tiene una media de hundimiento de 4 a 5 cm anuales al suroeste y noreste respectivamente. Por el tipo de vivienda en la zona, se ha calculado que hasta ahora los daños materiales ascienden a 12 millones de pesos.

Falla Torremolino

Tiene una dirección NE-SO y el bloque hundido es al NO. La falla tiene su mayor expresión en la Avenida Periodismo, frente al hotel Torremolino, y continua hacia el NE afectando a 8 casas habitación y al Hotel. En los últimos dos años la falla de Torremolino comenzó a afectar a otras cinco viviendas que fueron construidas sobre la traza de esta estructura. Su traza se pierde antes de llegar a la Avenida La Huerta. Su zona de influencia es de 8 m a ambos lados de la falla y su desnivel es mayor

en el Hotel Torremolino (40 cm) en tanto que hacia su extremo NE por ahora tiene forma de grieta.

Fallas semejantes a ésta han surgido en la calle Cuautla y en la avenida Ventura Puente. La primera afecta a más de 5 casas y la segunda comienza a afectar fuertemente a 3 casas. Se ha calculado que los daños ascienden a más de dos millones de pesos.

Fallas geológicas potencialmente sísmicas

En el Estado de Michoacán existen sismos con tres orígenes distintos:

a) Los sismos interplaca, ocasionados por la subducción de la Placa de Cocos, que ha sido responsable de los sismos más violentos que ha sufrido el centro de México (1845?, 1985) (Singh *et al.*, 1996) y son también los más comunes.

b) Los que se asocian a la actividad volcánica, también conocidos como tremores. Éstos son menos violentos y generan daños locales, como los producidos por el nacimiento de los volcanes Parícutín (1943) y Jorullo (1759).

c) Los sismos intraplaca, ligados a rupturas pro-

fundas de la placa que subduce (sismo de 1858 de Morelia-Pátzcuaro, con profundidad estimada de más de 30 km) o bien ligados a fallas geológicas que se generan en la corteza de la placa superior (sismo de Maravatío de 1979 y 1999, con profundidades menores a los 30 km). Estos últimos sismos pueden ser sentidos con mayor intensidad y su recurrencia es superior a 1,000 años (Suter *et al.*, 1995). Están asociados a fallas con direcciones E-W (e.g. Pajacuarán, Cotija, Tarímbaro, La Paloma, etc.), que forman parte del sistema Chapala-Tula o Morelia-Acambay (Pasquare *et al.*, 1991; Suter *et al.*, 1992, Suter *et al.*, 1995; Johnson, 1986; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990).

En la región de Morelia, las fallas que pueden asociarse a este último tipo son “La Colina”, “Tarímbaro” y los segmentos del sistema de fallas de Acambay-Morelia como “La Paloma”, “Cerritos” y “Coíntzio”. A continuación se describen las fallas La Paloma y La Colina, por ser las que se encuentran afectando a la zona urbana de Morelia. Es importante también señalar que se han venido monitoreando estas fallas desde el inicio de 1999 y no se ha encontrado actividad microsísmica en ellas.

Falla La Paloma

Al sur de la ciudad de Morelia se encuentra la mesa de Santa María, formada por la Ignimbrita de Morelia. Entre esta mesa y la depresión de Morelia existe un desnivel de más de 200 m, provocado por una falla de dirección E-O que hemos llamado La Paloma. El escarpe de la falla La Paloma tiene una expresión sobresaliente hacia el oriente mientras que su altura va disminuyendo hacia el poniente. La falla forma parte del denominado “Sistema activo de fallas Morelia-Acambay”. Este sistema es responsable de varios sismos que han afectado principalmente a los estados de Michoacán y de México. En la zona de Acambay, las fallas del mismo nombre fueron responsables del sismo de 1912, con una magnitud de 6.9. En el segmento de Venta de Bravo (Astiz-Delgado, 1980; Suter, *et al.*, 1992; Suter, *et al.*, 1996) se han presentando recientemente una serie de eventos sísmicos que han afectado la región de El Oro y Tlalpujahu. Flores (1920), en su trabajo sobre la región de Tlal-

pujahu, escribe sobre los movimientos sísmicos que sintió en el interior de las obras mineras de esa zona. En 1979 el poblado de Maravatío fue sacudido por un sismo de 5.3 en la escala de Richter (Astiz-Delgado, 1980), el cual tuvo un impacto muy grande en la población de Maravatío y sus alrededores. Otros sismos de los que se tienen datos se presentaron entre Maravatío y Tlalpujahu en 1734, 1735 y 1853-1854 (Suter, *et al.*, 1992, 1996). En 1845 y 1872 la región de Los Azufres sufrió una serie de crisis sísmicas que provocaron que la población civil pidiera apoyo a las autoridades para este tipo de fenómenos (Urquiza 1872; Ramírez y Reyes 1873). También es importante señalar que en 1845 y 1858 la ciudad de Morelia fue afectada por dos sismos cuya magnitud fue más allá de los 7 grados de magnitud (Singh, *et al.*, 1996; Jara *et al.*, 1994).

Al sur de Morelia, en el escarpe de Santa María, las fallas E-W dan lugar a varios desniveles, que son evidentes por formar escalones de ignimbritas (Cantera de Morelia), los cuales están asociados con pequeños deslizamientos del terreno (Figura 7). En el sector suroriental de la ciudad se pueden observar anillos de deslizamientos en masa, que pueden estar relacionados con sismos y que han provocado la inestabilidad en esos taludes. El libramiento sur de Morelia está afectado por esta problemática. En observaciones recientes se encontraron a lo largo del escarpe de Santa María fracturas de más de 3 m de ancho por 3 m de profundidad, que se pueden seguir por varias decenas de metros. Dichas fracturas son paralelas a la falla E-W (Arreygue *et al.*, 1998 y Arreygue-Rocha 1999).

Al observar cualquier fotografía aérea de la zona de Morelia se puede constatar como la zona de influencia de la falla La Paloma es mucho más importante que la de los segmentos vecinos (Coíntzio, Cerritos, Águilas). Los rasgos morfológicos más espectaculares de coronas ligadas a inestabilidad se encuentran en las ignimbritas más soldadas. Cuando ellas no están presentes, las coronas y los cuerpos inestables casi no están presentes. Por los rasgos morfológicos, la estratigrafía (con niveles poco soldados en la base), por la escasa alteración de la ignimbrita, por la geometría de las fracturas y por las



Figura 7. Talud de la falla La Paloma. Se pueden apreciar con bastante claridad los bloques movidos, aparentemente asociados a eventos sísmicos.

características de la falla se ha considerado que la inestabilidad se debe a la actividad sísmica.

La mayor parte de los segmentos que han presentado actividad sísmica en los últimos dos siglos han sido aquellos localizados hacia el oriente de Morelia (Suter, *et al.*, 1992, 1996), no obstante estudios en proceso han demostrado que el segmento de Morelia tuvo un evento sísmico en tiempos históricos. En dos localidades se realizaron trincheras para observar si existen desplazamientos de suelos. En la localidad La Paloma y cerca de la sede de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), debajo de un depósito de talud se encontró un suelo que se desplazado 50 cm por una falla normal. Este suelo tiene cerámica y restos de huesos humanos que han sido fechados por ^{14}C del periodo Clásico (400 años D.C.). En el sector oriental de la falla, en la zona de Ocolusen, se excavó una trinchera donde se encontraron también suelos de un metro de espesor, cubiertos por depósitos de talud y desplazados aproximadamente 50 cm por una falla normal de dirección N 83°- N 82° y estrías con *pitch* de 87° E.

Inestabilidad asociada a la falla La Paloma

A lo largo del escarpe de la falla existen diversos tipos de movimientos, dependiendo de las características litológicas de los materiales; asimismo las dimensiones de los fenómenos son muy variables. Fenómenos de resbalamiento rototraslacional (Cruden y Varnes, 1994) se han encontrado en diferentes puntos del escarpe de la falla de La Paloma, tanto en el material andesítico como en el material de la secuencia piroclástica (Cantera de Morelia). Fenómenos de derrumbe y volteo afectan tanto a las andesitas como al material piroclástico que se encuentran en la parte alta del acantilado.

Un peligro secundario se deriva de la presencia de bloques con volumen $>10\text{ m}^3$, que se encuentran ubicados a la mitad del talud y que son sensibles a una removilización; estos bloques se encuentran sin ningún obstáculo morfológico y podrían alcanzar la zona habitada, en casos de ser movidos por un fenómeno meteorológico o sísmico. En resumen, podemos mencionar que, asociado al talud de la falla La Paloma, tenemos los siguientes tipos de peligros: a) sísmico, b) caída de bloques, c) coladas de detrito y lodo, y d) movimientos en masa rototraslacionales.

Deslizamientos

Existen principalmente tres tipos de deslizamientos (Figura 8):

a). Deslizamiento rotacional: cuando la masa se desliza en una superficie de rotura cóncava. El movimiento tiene un comportamiento que rota hacia atrás cuando su masa se desplaza.

b). Deslizamiento traslativo: la masa resbala a lo largo de una o más superficies planas y en algunas ocasiones más o menos onduladas. El deslizamiento de traslación se puede dividir en tres tipos principales, de

acuerdo a su tipología: 1). Plano: cuando se mueve sobre una superficie plana simple; 2). En cuña: cuando afecta a dos superficies de fracturas con diferentes orientaciones que se interceptan; 3). En escalón: cuando se mueven superficies diferentes en planos paralelos pero que son conexos entre ellos.

c). Deslizamiento compuesto: El movimiento se presenta sobre una superficie compuesta, donde se observan elementos planares y curvos.

En la parte central de la falda de la loma de Santa María, a la altura del Campestre y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), se encuentran dos movimientos importantes, donde aflora el material piroclástico poco soldado y poco alterado perteneciente a la ignimbrita de Morelia. Estos fenómenos parecen no afectar al material andesítico del substrato, que aflora en la parte oriental del acantilado. Los cuerpos principales son tres deslizamientos denominados: deslizamiento SEDUE, deslizamiento Campestre y los deslizamientos de Ocolusén. Además existen otros pequeños movimientos con dimensiones muy pequeñas, pero que deben de ser considerados en relación con la vulnerabilidad. El deslizamiento de SEDUE es el más espectacular, ya que tiene 500 m de largo por 400 m. de ancho (Arreygue *et al.*, 1998). En la parte alta se encuentran grandes fracturas abiertas que tienen la misma orientación del acantilado o falla. Estas estructuras corroboran la continua actividad del fenómeno, que se considera iniciado por la actividad sísmica, dejando ahora bloques inestables. El deslizamiento del Campestre es un movimiento rototraslativo con dimensiones menores que el de SEDUE. Las dimensiones del fenómeno son de 250 m de ancho por 350 m de largo aproximadamente. Este movimiento se distingue por la presencia de una amplia meseta (escalón) arriba del fraccionamiento Campestre. En el deslizamiento Ocolusén se pueden observar diversos movimientos rototraslativos. La continua actividad de estos fenómenos confirma la presencia de una superficie de rotura tanto del interior del relleno detrítico que se encuentra en las grandes fracturas como dentro de la masa en movimiento.

Derrumbes en rocas

Un fenómeno de derrumbe consiste en el movimiento de una masa (de diferentes dimensiones) que se desprende de un macizo rocoso, en general con mucha pendiente, y que se mueve por la caída libre, tendiendo al rodamiento y en ocasiones al salto (Figura 9). El desprendimiento puede ser por rompimiento, por tracción o por corte del material rocoso, o bien, más frecuentemente, puede moverse en superficies de discontinuidades ya existentes.

Para evaluar la existencia de este tipo de movimiento se hicieron estudios en cuatro zonas del escarpe, que corresponden a las instalaciones de Aurrerá, SEDUE y Campestre (asentadas en la unidad ignimbrita de Morelia) y a la localidad Ocolusén (en material andesítico).

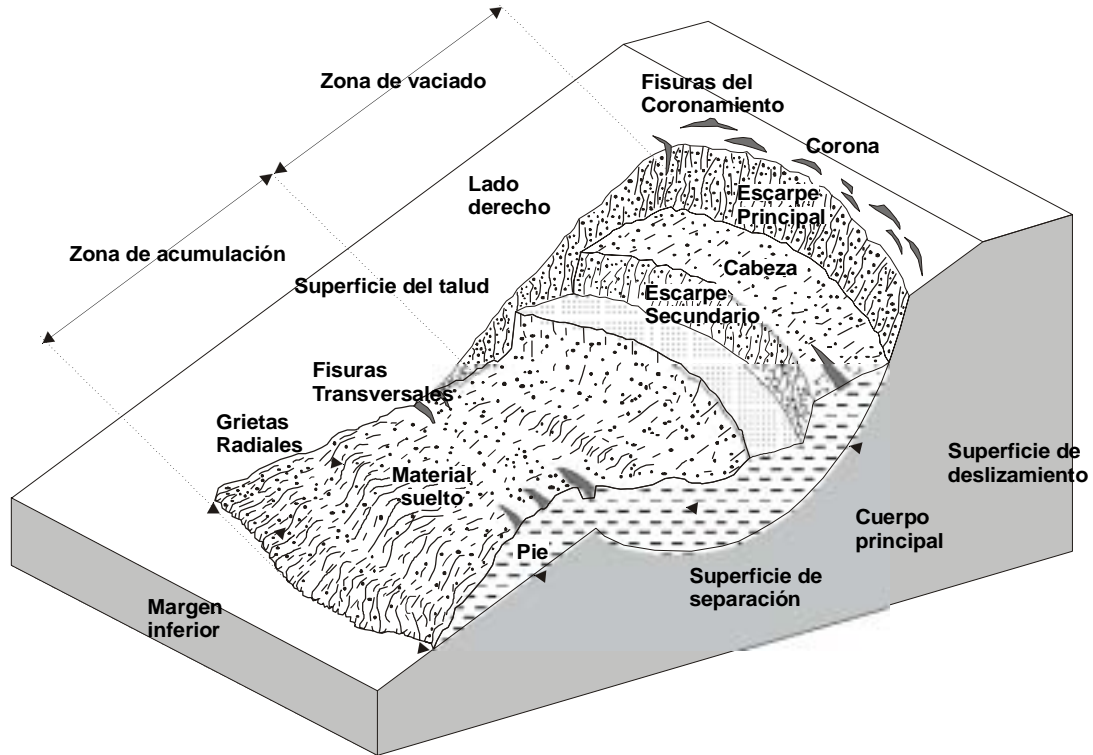


Figura 8. Geometría de un deslizamiento rototraslativo.

Este tipo de eventos sólo se presenta en la parte alta del acantilado, ya que es donde se encuentra el macizo rocoso, por lo tanto en los cuatro casos el comportamiento es similar, no influyendo el tipo de material. Los bloques tienen dimensiones variables y pueden alcanzar velocidades de 8 m/s (Arregue-Rocha, 1999), por lo cual se considera que pueden llegar fácilmente a la zona habitada, causando grandes desastres.

Debido al desarrollo urbano un tanto descontrolado, actualmente muchos edificios se están construyendo directamente en el sitio donde se inician los movimientos. En algunos casos, parte del material acumulado en la base del deslizamiento se ha cortado para la excavación de la cimentación de los edificios. Las condiciones principales de riesgo en esta área pueden ser de dos tipos: los edificios pueden ser afectados directamente por una ruptura y movimiento ocasionados por la gravedad o por un movimiento sísmico, o bien, pueden ser afectados por la removilización de los bloques que se encuentran ubicados en la parte alta y que están asociados a la inestabilidad gravitacional de la pendiente.

Falla La Colina

Es una estructura geológica de dirección NE-SW, que tiene un relieve morfológico de 4 m en su sector NE. En la carta geológica de Morelia publicada por INEGI en 1977 ya se identifica como una falla de tipo normal que

forma una contrapendiente en las lavas del Cerro Quinceo hacia el SW. En las construcciones del Infonavit Manantiales, la falla La Colina pone en contacto a sedimentos lacustres con lavas del Cerro Quinceo, que tuvo actividad holocénica (Martínez y Hobson, 1907). Los daños iniciales se manifestaron en cinco casas dúplex del Infonavit La Colina, las cuales fueron demolidas debido al fracturamiento intenso que ocasionó el hundimiento y a

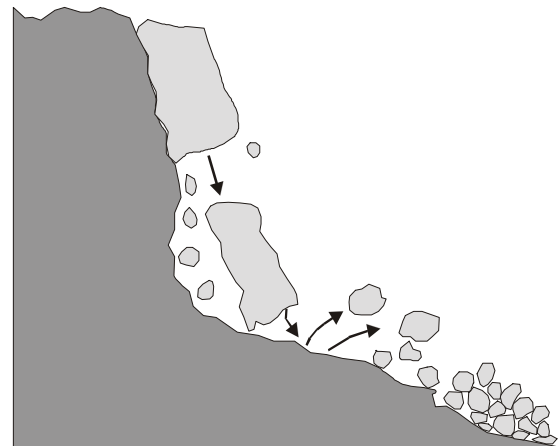


Figura 9. Derrumbe o caída de un bloque de roca.

los efectos del sismo de 1985 (Lámina 1, e y f). En 1988, investigadores de la UMSNH determinaron que si el crecimiento de la Ciudad de Morelia continuaba hacia el SO, se verían afectadas las nuevas colonias. En la actualidad ya existen daños en las colonias de López Mateos, Las Águilas, Agua Clara y Manantiales. En fotografías aéreas de los años sesenta se puede observar perfectamente la falla La Colina en el sector NE (Figura 9), por lo que en los programas de crecimiento urbano debiera haberse considerado, sobre todo en aquellas obras diseñadas para edificios públicos y unidades habitacionales. Es importante señalar que esta estructura tiene una prolongación más evidente hacia el NE en la colonia Ampliación Popular Progreso, donde su desnivel llega a ser de varios metros, pero donde actualmente no presenta fenómenos de hundimiento (fluencia). En cambio, el hundimiento ocurre hacia el NW de la traza. Se ha estimado hasta ahora un desplazamiento vertical de al menos 80 cm en el sector NE. En la actualidad el hundimiento es más lento pero progresivo. Varias casas habitación de la zona han sido reparadas en diferentes ocasiones. Su prolongación hacia el SW afecta a las colonias de Agua Clara, López Mateos, Las Águilas, y Manantiales, donde dañó a más de 43 casas habitación y a dos edificios del Infonavit Manantiales (ahora ya demolidos). En este último no existe relieve morfológico, sin embargo, al hacer estudios del subsuelo se encontraron basaltos del Cerro Quinceo a una profundidad de dos metros en contacto

horizontal con los sedimentos lacustres. Por este contraste de materiales se podría pensar que la zona de hundimiento tendría que producirse hacia los sedimentos lacustres, es decir hacia el sur. Sin embargo, los que se están hundiendo son los basaltos, que seguramente descansan sobre el material lacustre.

Se considera que esta falla es sísmicamente activa, debido a que está cortando a lavas donde se han encontrado restos de mazorcas, que evidencian su edad histórica (Figura 10).

En resumen, esta estructura presenta un hundimiento con una tasa de movimiento vertical de 4 a 6 cm anuales (*creep*). Su zona de influencia es variable, siendo en la zona de Tres Puentes-La Colina de 20 metros a ambos lados de la falla, de 15 m en Las Águilas, López Mateos y Agua Clara y de 20 m en la zona de Manantiales. Es muy importante resaltar que, en la zona de Manantiales, la zona de influencia de la falla puede ser mayor que lo hasta ahora observado hacia el sur de la traza de la falla actual, ya que se han detectado dos estructuras, una pequeña que ya comenzó a deformar el libramiento poniente y otra en la base del montículo de Ignimbrita Morelia localizado sobre el libramiento y que representa la falla geológica principal, provocando que la cantera se hunda a más de 20 m.

También es importante señalar que estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos realizados por la empresa Colinas de Buen corroboraron la existencia de esta es-



Figura 9. Fotografía aérea de los años 60 del sector de la falla La Colina. Se puede notar que la falla era bastante evidente antes de que la mancha urbana llegase a esta zona.

estructura geológica, y sugirieron al Infonavit la demolición de 43 viviendas. Hasta ahora los daños causados por esta estructura se estiman en más de 12 millones de pesos, ya que se han demolido 53 casas de Infonavit (La Colina, Manantiales). Esta estructura se prolonga hacia el NE y hacia el SW; en ambas direcciones la zona urbana sigue creciendo, por lo que debe ser considerada su traza en los nuevos planes de desarrollo urbano para evitar pérdidas de recursos.

DISCUSIÓN

Sin duda alguna el estudio de las fallas en zonas urbanas ha generado fuertes discrepancias entre los especialistas en ingeniería civil y en geología. Sin embargo, antes de cualquier discusión debemos entender que cualquiera que sea el calificativo utilizado (falla, grieta, fractura, etc.) lo más importante para enfrentar el problema es reconocer que es un fenómeno geológico acelerado por obras antrópicas, que genera grandes daños a todas las obras civiles que son afectadas por ellas.

Independientemente de las discusiones de concepto, es muy claro que en la ciudad de Morelia, así como en muchas zonas urbanas afectadas por fallas geológicas con fenómenos de falla-fluencia, los efectos son graves y deben ser considerados en los planes de desarrollo urbano y en los reglamentos de construcción.

También es importante señalar que este tipo de daños provoca un debilitamiento en las obras civiles, efecto que en caso de conjugarse con la gravedad (sobrepeso de la vivienda y torsión) o con la ocurrencia de un sismo

considerable podría conducir al derrumbe de las obras. Es decir que por sí solos los movimientos lentos pero continuos en el tiempo y ligados a las fallas geológicas y a la fluencia no representan un riesgo inmediato de colapso de las obras civiles, pero aunado a un terremoto (como los de 1845 y 1858) pueden causar colapsos catastróficos.

Es importante añadir que en las ciudades que son vulnerables a este tipo de fenómenos, las obras civiles deben de estar avaladas por estudios de geotecnia. No se considera que un estudio de mecánica de suelos sea suficiente para comprender y/o mitigar el tipo de problemática relacionada con fallas activas o *creep*. En realidad, para la apertura de colonias nuevas, complejos habitacionales u obras mayores de ingeniería civil es necesario llevar a cabo estudios de suelos, del entorno geológico, y de mecánica de rocas en el caso necesario.

En otras ciudades del centro de México, las fallas geológicas en zonas urbanas han sido relacionadas esencialmente con sobreexplotación de acuíferos (Trujillo-Candelaria, 1985 y 1991; Lermo-Samaniego, *et al.*, 1996, Aguirre-Díaz, *et al.*, 2000). Sin embargo, estudios recientes (Garduño-Monroy *et al.*, 1999) indican que este fenómeno no sólo se debe a la sobreexplotación, sino también son resultado de efectos del clima, de las técnicas de explotación (diseño del pozo) y de la respuesta del terreno en la columna de los depósitos fluviolacustres.

En relación con los sismos en la ciudad de Morelia varios autores han constatado que la ciudad está localizada dentro del sistema de fallas activas de Morelia-Acambay (Figueroa, 1974; Jara, *et al.*, 1994; González-Ramírez, 1997; Garduño-Monroy, *et al.*, 1997). Los es-



Figura 10. Impresiones de mazorcas en las lavas del flanco oriental del volcán Quinceo. Este ejemplar se localiza en el Museo del Estado de Michoacán, *sito* en Morelia..

tudios geológicos revelan que en los segmentos de fallas en la ciudad de Morelia existen evidencias suficientes para afirmar que algunas de ellas han tenido actividad histórica (La Paloma y Tarímbaro). No obstante, se requiere hacer estudios de monitoreo continuo para conocer con más detalle sus propiedades sísmicas. El monitoreo sísmico se inició en 1999 en las fallas consideradas como potencialmente sísmicas y hasta ahora no se ha detectado alguna actividad. Sin embargo, hay que considerar también que el período de tiempo considerado es muy corto y que la recurrencia común en este tipo de fallas puede ser $\geq 5,000$ años (Suter, *et al.*, 1995). En los segmentos localizados en la zona de Morelia y al oriente de ésta, donde los segmentos son más largos, no se conoce la fecha del último evento sísmico, sin embargo, por su morfología y por la edad cuaternaria de las unidades geológicas que afecta (Suter *et al.*, 1991), se podría decir que son estructuras potencialmente sísmicas.

Como se ha mencionado, en Morelia no se ha registrado actividad sísmica ligada a las fallas con fluencia. Sin embargo, en la ciudad de Aguascalientes se han registrado pequeños sismos (magnitud < 4) (Lermo-Samaniego, comunicación personal 2000), aunque no es claro si están ligados a aspectos tectónicos o bien al hundimiento de las secuencias fluviolacustres. Una hipótesis por considerarse es que la extracción de agua de las secuencias fluviolacustres provoque cambios en las unidades litológicas y que esto, a su vez, favorezca la reactivación de las estructuras geológicas preexistentes.

CONCLUSIONES

En Morelia existen dos tipos de zonas vulnerables relacionadas con fallas geológicas:

a) Zonas donde existen fallas geológicas anteriores al establecimiento de la zona urbana, pero que por obras antrópicas se han reactivado con movimientos de fluencia (*creep*) en las secuencias fluviolacustres, y con tasas de movimiento de 4 a 6 cm anuales.

b) Zonas en donde existen fallas que pueden ser consideradas como potencialmente sísmicas por tener desplazamientos durante el Holoceno y por sus características morfológicas, y que además están relacionadas con movimientos de fluencia (La Colina) o a inestabilidad de taludes (La Paloma).

De acuerdo con las normas de La Comisión Reguladora de Energía Atómica de Estados Unidos y los estudios realizados en la región de Morelia, las fallas La Paloma, La Colina y Tarímbaro pueden ser consideradas como fallas sísmicamente activas, es decir que muestran actividad de movimiento en los últimos 35,000 años. Las dos primeras estructuras se encuentran dentro de la zona urbana, lo que aumenta el factor de vulnerabilidad, debido a que afectan a viviendas, edificios públicos, redes hidráulicas, drenajes, líneas eléctricas y calles.

Es muy importante reconocer que la sobreexplota-

ción de las aguas subterráneas es uno de los factores principales que generan el hundimiento diferencial de las zonas urbanas (*creep* o fluencia), pero también son importantes las técnicas de extracción y el diseño de pozos para la explotación del acuífero contenido en los sedimentos fluviolacustres, y los cambios de clima. Con respecto a este último aspecto se ha observado que las principales crisis de hundimiento asociadas a las fallas han coincidido con los años en los que el fenómeno El Niño es más acentuado (1982-1983 y 1997-1998), y se presentan en el periodo de sequía (La Niña), debido a la mayor demanda de agua.

Los estudios de geología y geofísica llevados a cabo en la Ciudad de Morelia sugieren que todas las estructuras que actualmente afectan a la zona urbana tienen rasgos lineales superficiales o en el subsuelo que permite relacionar a los movimientos diferenciales con una falla. Estas estructuras se inician como grietas simples, pero con el tiempo el lado donde existe mayor espesor de sedimentos lacustres sufre un hundimiento por cambio de volumen (Figura 10). El fenómeno de *creep* se desarrolla en las secuencias fluviolacustres, no en la roca (Cantera de Morelia). Hasta ahora los movimientos son continuos y sin actividad sísmica perceptible por el hombre, es decir es un proceso de fluencia (*creep*).

Las fallas geológicas y la fluencia no llegarían a ocasionar derrumbes o colapso de las obras civiles. Para que ello ocurra se tendrían que conjugar con factores como un evento sísmico, el exceso de peso en la vivienda o la mala construcción.

Es muy importante continuar los trabajos de monitoreo, no solo en el aspecto de hundimiento, sino también en relación con los daños en las obras civiles y, sobre todo, para conocer más profundamente la sismicidad en la ciudad y el Estado. Históricamente sabemos que las fallas E-O han sido origen de sismos, que en las condiciones de las actuales zonas urbanas generarían grandes daños.

En la ciudad de Morelia, otro de los factores que se desprende de este estudio es la inestabilidad de la ladera asociada a la falla La Paloma. En ella se han identificado varios cuerpos inestables que han sido considerados como productos de eventos sísmicos y que se han movido en tiempos cortos (en segundos). Por ello es importante que estos peligros sean considerados en los programas de desarrollo urbano de la ciudad. Estos resultados podrían también ser la base para realizar un modelo de elementos finitos para conocer la respuesta del terreno en el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto realizado con fondos CONACYT (471100-5-28764T) y con recursos de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. También queremos agradecer infinitamente a Gerardo García, Aída López, J. L.

Macías, J. J. Aranda G., A.F. Nieto-Samaniego y Luca Ferrari por las aportaciones al texto y sus sugerencias para el mejoramiento de éste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga Dávila-Madrid, R., Pacheco-Alvarado, F.J., Guzmán-Speziale, M., y Nieto-Obregón, J., 2000, El graben de Querétaro, México—Observaciones de fallamiento activo: *Geos, Unión Geofísica Mexicana*, v. 20, núm.1, p. 2-7.
- Arreygue-Rocha, E., 1999, Le Condizioni di pericolosità idrogeologica nella città di Morelia, Michoacán (Messico): Perugia, Italia, Università degli Studi di Perugia, Tesi di dottorato XI Ciclo 1995-1998, 171 p.
- Arreygue, E., Canuti, P., Iotti, A., y Garduño-Monroy, V.H., 1998, Hydrogeological hazard in the urban area of Morelia, Mexico, *in* Association for Engineering Geology and the Environment, 8th International Congress, Proceedings, Vancouver, Canada, 21-25 September: Rotterdam, A.A. Balkema, v. 3, p. 2,245-2,250.
- Astiz-Delgado, L.M., 1980, Sismicidad en Acambay, Estado de México—el temblor del 22 de febrero de 1979: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis profesional, 130 p. (inérita).
- Barton, N.R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints: *Engineering Geology*, v. 7, p. 287-332.
- Barton, N.R., y Choubey, V., 1997, The shear strength of rock joint in theory and practice: *Rock Mechanics. Supplementum*, v. 10, núms. 1-2, p. 1-54.
- Canuti, P., y Casagli, N., 1994, Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana, *in* Fenomeni Franosi e Centri Abitati: Consiglio Nazionale di Ricerca (CNR): Gruppo Nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche (GNDCI), Memorias del congreso, Bologna, Italia, 27 Maggio 1994.
- Casagli, N., y Pini, G., 1993, Analisi cinematica della stabilità di versanti naturali e fronti di scavo in roccia, *in* Giovani Ricercatori, Geologia Applicata, 3^o Convegno Nazionale Memorias, Potenza, Italia, 28-30 Ottobre 1993.
- Cruden, D.M., y Varnes, D.J., 1996, Landslides types and processes, *in* Turner, A. K., and Schuster, R. L., eds., *Landslides—investigation and mitigation*: Washington, D.C., National Academy of Science, 673 p.
- Demant, A., 1981, L'Axe Néovolcanique Transmexicain—étude volcanologique et pétrographique; signification géodynamique: Marseille, Université du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Ph. D. Thesis, 259 p.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G. y Tibaldi, A., 1994, Volcanic and tectonic evolution of the central Mexico: Oligocene to present: *Geofísica Internacional*, v. 33, núm. 1, p. 91-105.
- Flores, T., 1920, Estudio geológico-minero del distrito de El Oro y Tlalpujahua: México, D.F., Instituto Geológico de México, Boletín, núm. 37, 87 p.
- Figueroa, J., 1974, Isosistas de macrosismos mexicanos: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, *Revista Ingeniería*, v. 33, núm. 1, p. 45-67.
- García, V., y Suárez, G., 1997, Los sismos en la historia de México. V. I: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Fondo de Cultura Económica, 718 p.
- Garduño-M., V.H., y Escamilla, T.R., 1996, Revisión histórica de la sismicidad en Michoacán, México: *Ciencia Nicolaita*, v. 11, p. 57-81.
- Garduño-Monroy, V.H., y Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1992, Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano: *Geofísica Internacional*, v. 31, núm. 4, p. 417-429.
- Garduño, V.H., Israde, I., Francalanci, L., Carranza, O., Chiesa, S., Corona, P., y Arreygue, E., 1997, Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatío and Cuitzeo, Mich., Mexico, *in* IAVCEI General Assembly, Fieldtrip guidebook, Puerto Vallarta, Jal., Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial, 15 p.
- Garduño-M., V.H., Arreygue-R., E., Chiesa, S., Israde-A., I., Rodríguez-T., G.M., y Ayala, G.M., 1998, Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio: *Ingeniería Civil*, v. 1, núm. 5 p. 3-12.
- Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez-Torres, G.M., Israde-Alcántara, I., Arreygue, E., Canuti, P., y Chiesa, S., 1999, Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia: *Geos, Unión Geofísica Mexicana*, v. 9, núm. 2, p. 84-93.
- González-Ramírez, A., 1997, Riesgo sísmico de la Ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis, profesional, 91 p.
- Holzen, T.L., 1984, Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment, *in* Holzen, T.L., ed., *Man-induced land subsidence*: Boulder, Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, v. VI, p. 67-105.
- Hasenaka, T., y Carmichael, I.S.E., 1985, The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central, Mexico—their age, volume and distribution, and magma discharge rate: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 25, núms. 1-2, p. 105-124.
- Israde, I., 1995, Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: stratigrafia et evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee: Milano, Italia, Università degli Studi di Milano, Ph. D. Thesis, 254 p.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V.H. y Ferrari, M., 1992, El origen transtensivo de la depresión del lago de Cuitzeo, México, *in* VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Actas de las sesiones científicas; Salamanca, España, v. 4, p.127-131.
- Israde-Alcántara, I., y Garduño-Monroy V.H., 1999, Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the late Neogene Cuitzeo basin system (central western Michoacán, Mexico): *Palaecogeography, Palaeclimatology, Palaecology*, v. 15, núms. 1-3, p. 209-227.
- Jara, M., Hurtado, F.; Jara, J.M., y Suárez, R., 1994, Zonificación sísmica de la Ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Escuela de Ingeniería Civil, Boletín informativo, núm. 5.
- La Voz de Michoacán, 1988, Suplemento dominical, Octubre 30. 3 p.
- Lermo-Samaniego, J., Nieto-Obregón, J., y Zermeño, M., 1996, Fault and fractures in the valley of Aguascalientes. Preliminary microzonification, *in* World Conference on Earthquake Engineering, 11th: Amsterdam, Elsevier, Paper, núm. 1651.
- Luhr, J.F., y Simkin, T., 1993, Parícutín, the volcano born in a Mexican cornfield: Phoenix, Arizona, Geoscience Press, 427 p.
- Johnson, C.A., 1986, A study of neotectonics in central Mexico from a LANDSAT Thematic Mapper imagery: Coral Gables, Florida, University of Miami, Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science, Thesis, Master of Sciences, 112 p. (inérita).
- Martínez-Reyes, J., y Nieto-Samaniego, A.F., 1990, Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, v. 9, núm. 1, p. 33-50.
- Medina-López, F.I., 1997, Cartografía geotécnica de la ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis profesional, 51 p.
- Martínez, S.M., y Hobson, B., 1907, Restos de plantas en basaltos: Sociedad Michoacana de Geología y Estadística, Boletín, v. 3, núm.15, p. 238-240.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A., y Vezzoli, L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán: Boulder, Geological Society of America, *Map and Chart series*, MCH072, 1 mapa con texto, 22 p.
- Quintero Legorreta, O., Mota-Palomino, R., y Suter, M., 1988, Esfuerzos y deformación contemporáneos en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana; y geometría, distribución y sismicidad de las fallas activas, *in* Unión Geofísica Mexicana,

- Reunión Anual, Resúmenes: Geos, Unión Geofísica Mexicana, época II, v. 8, núm., extraordinario, p. 33.
- Radbruch, D.H., Bonilla, M.G., Lennet, B.J., Blanchard, F.B., Laverty, G.L., Cluff, L.S., y Steinbrugge, K.V., 1966, Tectonic creep in the Hayward fault zone California: U.S., Geological Survey, Circular, núm. 525. 13 p.
- Ramírez, S., y Reyes, V., 1873, Informe sobre los temblores y volcanes de Agua Fría y Jariepo: Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, época 3, v. 1, p. 67-88.
- Sauter, F.F., 1989, Fundamentos de Ingeniería Sísmica—Introducción a la sismología: Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 271 p.
- Silva-Mora, L., 1979, Contribution a la connaissance de l'Axe Volcanique Transmexicain - étude géologique et pétrologique des laves du Michoacán oriental: Marseille, Université du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, These, Docteur Ingenieur, 230 p. (inédita).
- Silva-Mora, L., 1995, Hoja Morelia 14Q-g(2) con resumen de la geología de la hoja Morelia, estados de Michoacán y Guanajuato: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México, serie de 1:100.000, 1 mapa con texto, 25 p.
- Singh, S.K., Ordaz, M., y Pérez-Rocha, L., 1996, The great mexican earthquake of 19th June 1858; expected ground motion and damage in Mexico City from a similar future event: Seismological Society of America, Bulletin, v. 86, núm. 6, p. 1,655-1,666.
- Suter, M., Aguirre, G., Siebe, C., Quintero, O., y Komorowski, J.C., 1991, Volcanism and active faulting in the central part of the trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico, in Walawender, M. J., and Hanan, B.B., eds., Geological excursions in southern California and Mexico, Guidebook: Boulder, Geological Society of America, Annual Meeting, p. 224-243.
- Suter, M., Quintero, O., y Johnson, C.A., 1992, Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. 1. The Venta del Bravo fault: Journal of Geophysical Research, v. 97, núm. B8, p. 11,983-11,994.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., y Farrar, E., 1995, The Acambay graben; active intraarc extensión in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: Tectonics, v. 14, núm. 5, p. 1,245-1,262.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., y Quintero-Legorreta, O., 1996, Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: Seismological Society of America, Bulletin, v. 86, núm. 6, p. 1,952-1,963.
- Trujillo-Candelaria, J.A., 1985, Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto. En: Reunión sobre Asentamientos Regionales: México, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos, Asociación Geohidrológica Mexicana, p. 1-2.
- Trujillo-Candelaria, J.A., 1991, Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México, in XXIII Congress of the Association of International Hydrologists, Sobreexplotación de acuíferos: España, p.175-178.
- Urquiza, M., 1872, Informe del ingeniero encargado de reconocer la sierra de Ucareo para averiguar las posibilidades de una erupción volcánica: Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, época 2, v. 4, p. 586-588.
- Watts, A.W., y Bradbury, J. L., 1982, Paleocological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican plateau and at Chalco in the Basin of Mexico: Quaternary Research, v. 17, núm. 1, p. 56-70.

Manuscrito recibido: Marzo 5, 2000

Manuscrito corregido recibido: Junio 6, 2000

Manuscrito aceptado: Septiembre 14, 2000