

Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-*Creep*-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México

Jorge Alejandro Ávila-Olivera¹ y Víctor Hugo Garduño-Monroy²

¹Instituto de Geofísica, UNAM. E-mail: jao_79@hotmail.com

²Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. E-mail: vgmonroy@zeus.umich.mx

Resumen

Desde 1983 han venido ocurriendo en la ciudad de Morelia, Michoacán, problemas de hundimientos diferenciales relacionados con Procesos de Subsistencia-*Creep*-Falla (PSCF), que se deben a la conjunción de los siguientes elementos: la subsistencia ocasionada por la sobreexplotación de los acuíferos, el *creep* de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres que coronan el basamento rocoso, y la presencia de fallas geológicas antiguas que controlaron el depósito de esos sedimentos. Se midieron los espesores de los sedimentos susceptibles de deformarse y se analizó el abatimiento de los niveles freáticos, para determinar el asentamiento ya ocurrido, mediante el modelo teórico que relaciona el hundimiento potencial con la compresibilidad del suelo. El hundimiento diferencial ocurrido así calculado, permitió obtener el salto teórico entre ambos bloques de los principales fallamientos identificados en la ciudad, el cual se comparó con el salto real medido, observándose una buena correlación. Con esta base se calculó el hundimiento total probable en cada uno de bloques de esos fallamientos, de continuar la sobreexplotación de los acuíferos, y se determinó así el probable hundimiento futuro que podría ocurrir en cada uno.

Palabras clave: Subsistencia, asentamientos, sedimentos, hundimiento diferencial, *creep*, fallas.

Sinking due to Subsidence-*Creep*-Fault (SCF) in the City of Morelia, Michoacan, Mexico

Abstract

Since 1983, the City of Morelia, State of Michoacán, Mexico, has undergone problems from Subsidence-*Creep*-Fault (PSCF), caused by a combination of the following factors: overexploitation of the aquifers, creeping of the lacustrine and fluvio-lacustrine sediments on the rock basement, and the presence of old geologic faults driving the deposit of such sediments. The thickness of sediments susceptible to deformation was measured, as was the abatement of the phreatic levels, comparing the sinking that had already occurred with a theoretical model relating potential sinking to soil compressibility. The existing differential sinking obtained by the model allowed us to know the theoretical displacement between the blocks of the main faulting-assemblages identified in the city. When this was compared with the actual measured displacement, a good correlation was found. Next the probable total sinking was calculated for each block of the faulting-assemblages with the same model. Finally, we calculated the further probable sinking for each block if the aquifer overexploitation continues.

Keywords: Subsidence, settling, sediments, differential sinking, *creep*, faults.

1. Introducción

A partir de 1983 comenzaron a apreciarse en la ciudad de Morelia, Mich., daños en las casas-habitación, edificios, pavimentos, líneas de alcantarillado y agua potable, etc. De acuerdo con estudios realizados por un grupo de investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y del Instituto Politécnico Nacional (IPN), los daños eran ocasionados por asentamientos de tipo diferencial, pero que tenían la singular característica de que se presentaban siguiendo trazos lineales claramente identificables (Trujillo-Candelaria, 1985; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Lermo-Samaniego *et al.*, 1996). Posteriormente se descubrió que dichos trazos lineales eran paralelos al sistema de fallas regionales de dirección ENE-WSW (Garduño-Monroy *et al.*, 1999) (Fig. 1). Suter *et al.* (1995) consideraron que esas discontinuidades del basamento forman parte de la zona de falla Tula-Chapala y/o Acambay-Morelia.

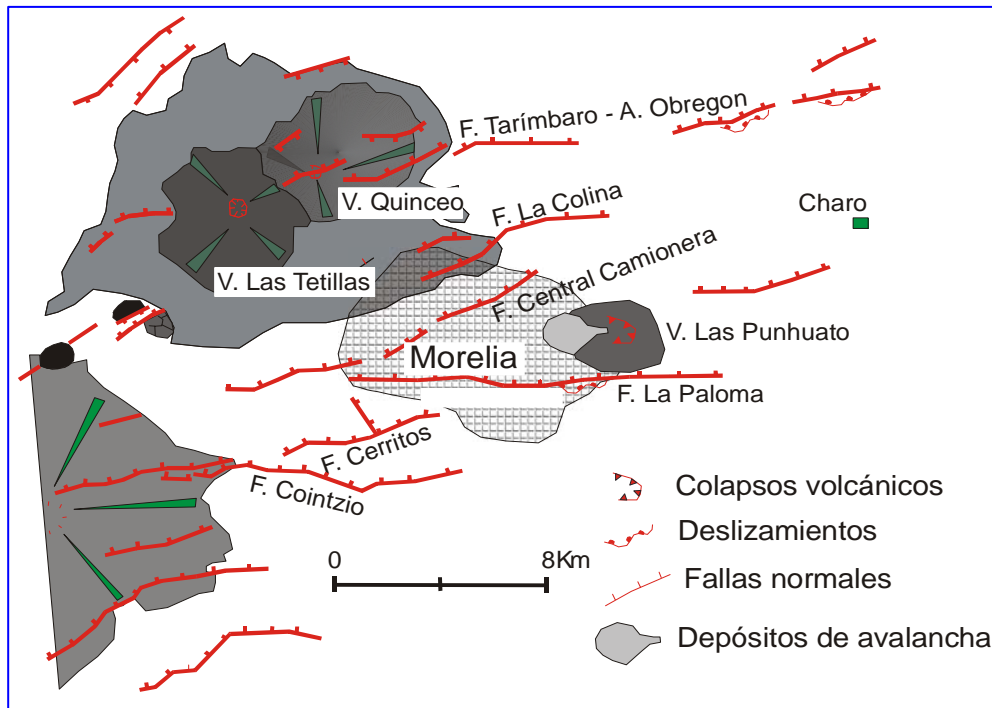


Fig. 1. Localización de la Ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Originalmente las áreas más afectadas eran la zona denominada La Colina-Tres Puentes, así como la Avenida Héroes de Nocupétaro, las cuales presentaban daños ocasionados por los fallamientos denominados “La Colina” y “Central Camionera”, respectivamente. En 1988 se notó la presencia de un fallamiento más, el cual recibió el nombre de “Chapultepec” ya que se presentaba en la colonia del mismo nombre. Para 1993 el número de fallamientos se había incrementado a seis, cuando se sumaron los llamados “Torremolinos”, “El Realito” y “La Soledad”. Finalmente, también en ese año se identificaron dos fracturas que se denominaron “Cautla” y “Ventura Puente” (Fig. 2).

2. Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF)

El tipo de fallamiento mencionado no es exclusivo de la ciudad de Morelia. Ocurren también en varias ciudades del centro del país, localizadas en la zona norte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), como son Aguascalientes, Celaya, Irapuato, Querétaro, y Salamanca. Todas estas ciudades tienen como característica común haber sido levantadas en antiguas cuencas lacustres configuradas por un fallamiento regional.

La mecánica que da lugar a esos fallamientos implica la conjunción de una serie de elementos, entre ellos la presencia de *fallas* geológicas previas que controlaron el depósito de sedimentos lacustres y fluviolacustres, así como la ocurrencia de *subsistencia* debida generalmente a sobreexplotación de los sistemas acuíferos, lo

que da lugar a una deformación lenta, continua y asísmica (*creep*). Estos elementos interactúan entre sí ocasionando lo que se denomina un Proceso de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF).

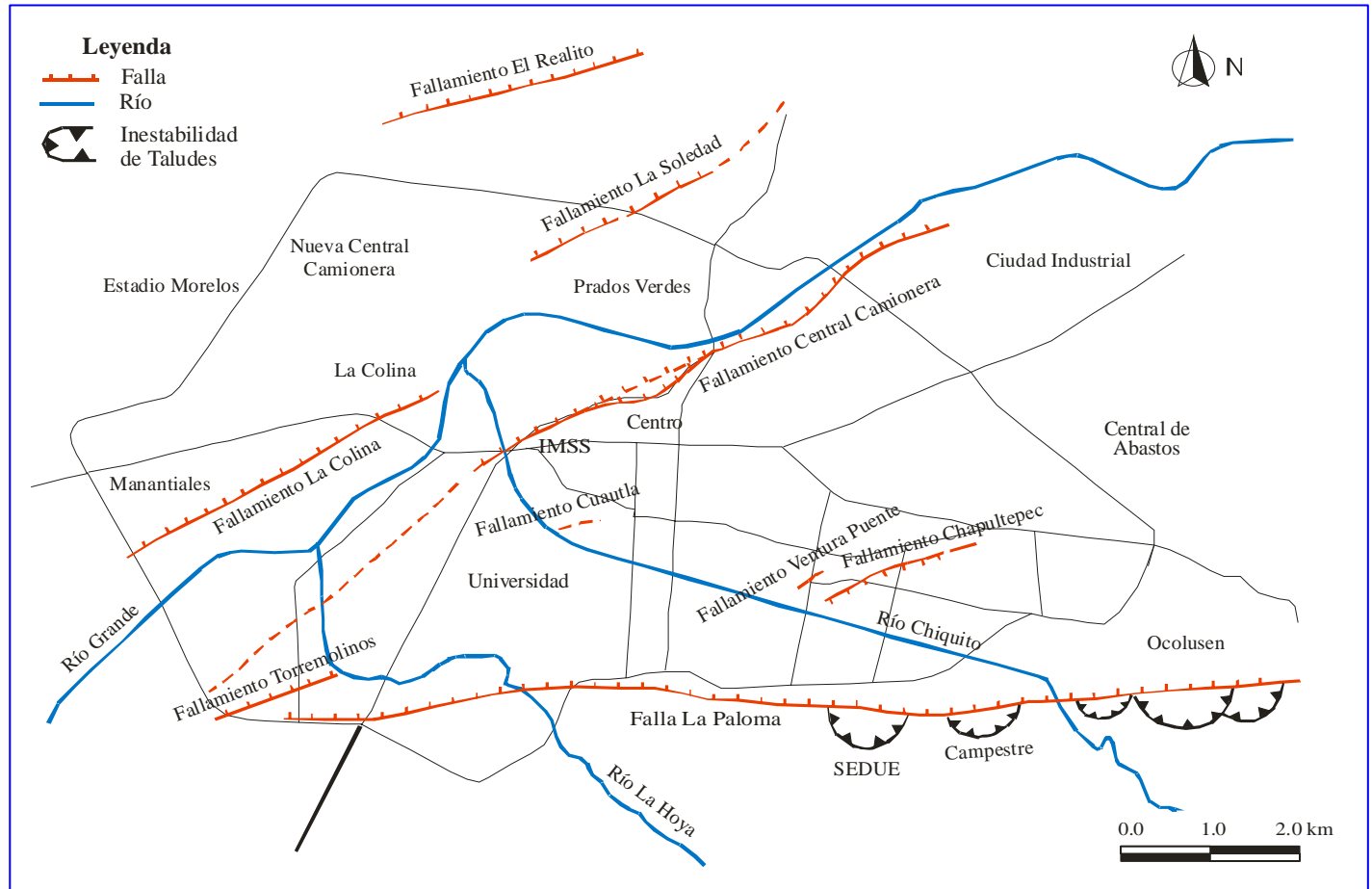


Fig. 2. Fallamientos identificados en la Ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001).

Los PSCF suelen presentar las siguientes tres etapas o fases:

a) La primera etapa consiste en un hundimiento de la superficie, el cual es conocido como subsidencia, que se debe usualmente a la sobreexplotación de los acuíferos. Esta sobreexplotación abate los niveles freáticos, lo que causa una reducción de la presión del agua de poro que es transferida a la fase sólida de los sedimentos lacustres y fluviolacustres del acuífero, ocasionando a su vez una reducción del volumen de espacios vacíos de los sedimentos y por consiguiente una reducción de su espesor, el cual tiende a consolidarse (Garduño-Monroy *et al.*, 2001). Esto es lo que se denomina consolidación primaria (Fig. 3).

b) Al hundimiento generado por la subsidencia, en la segunda etapa se suma otro, que es lento, continuo a través del tiempo y asísmico que se denomina *creep*, y que es resultado de la consolidación secundaria de los sedimentos. Esta consolidación secundaria suele ser menos significativa que la primaria. En esta segunda etapa se forma también una o más grietas de tensión a lo largo de la prolongación dentro de los sedimentos de los planos de las fallas geológicas preexistentes en el basamento rocoso.

c) En la última etapa puede ocurrir un hundimiento diferencial en ambos lados de la grieta de tensión formada en la segunda etapa, de tal manera que uno de los lados se hunde más que el otro dando lugar a una geometría de falla normal que tiende a reproducir la geometría del basamento rocoso que la subyace. Puede

formarse así un bloque alto y un bloque bajo a ambos lados de la grieta. Este hundimiento diferencial es el principal responsable de los daños observados en las construcciones de Morelia.

Ninguno de esos hundimientos afecta al basamento rocoso subyacente, y resulta difícil diferenciarlos entre sí en la observación de campo.

3. Determinación de los hundimientos

Para determinar el probable hundimiento o asentamiento causado por una determinada extracción de agua de los acuíferos, es necesario llevar a cabo un análisis del abatimiento de los niveles freáticos, así como del espesor de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres capaces de deformarse, en ambos bloques de cada uno de los fallamientos presentes.

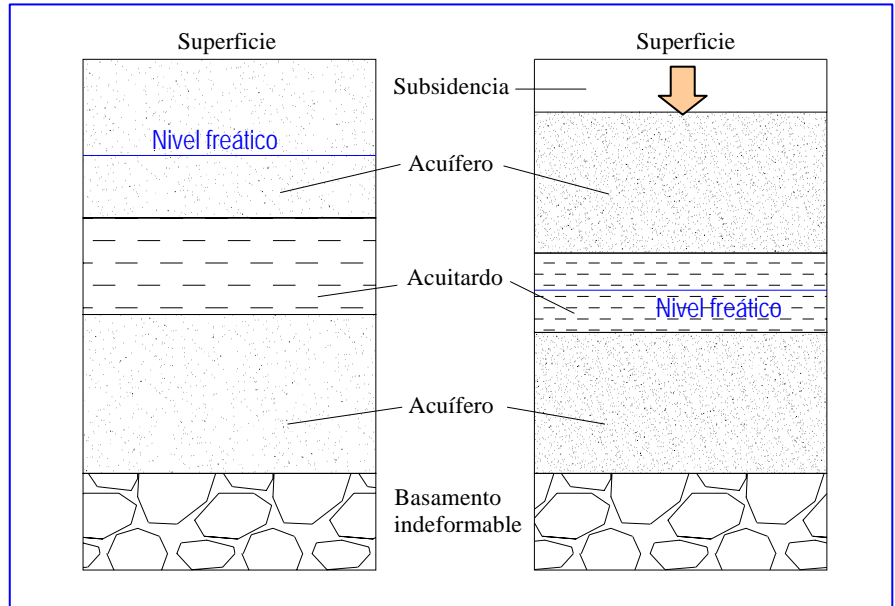


Fig. 3. Diagrama que muestra cómo se produce la subsidencia en un sistema acuífero por la extracción del agua del subsuelo.

3.1 Espesor de sedimentos

Para conocer los espesores subterráneos de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres en la ciudad de Morelia, se utilizó la columna litológica de algunos de los pozos profundos que se emplean para extraer el agua del subsuelo. Con esta información se elaboró el modelo digital que aparece en la Figura 4, en el que se aprecia la distribución de espesores dentro de la mancha urbana. Una vez que se conoció esa distribución de espesores de sedimentos en diferentes puntos de la ciudad, se procedió a relacionarlos con ambos bloques de cada uno de los fallamientos, para obtener de esta manera un espesor promedio en cada uno de los bloques (Tabla 1, segunda y tercera columna).

Fallamiento	Espesor de sedimentos (m)		Abatimiento del nivel freático (m)		Factibilidad de deformación	
	Bloque bajo	Bloque alto	Bloque bajo	Bloque alto	Bloque bajo	Bloque alto
1. Central Camionera	120.00	29.00	37.66	?	Sí	No
2. La Colina	112.00	69.00	80.00	40.94	Sí	Sí
3. Torremolinos	90.00	79.50	34.00	29.87	Sí	Sí
4. Chapultepec	78.00	72.00	80.80	?	No	No
5. El Realito	15.00	4.00	10.00	?	Sí	No
6. La Soledad	45.00	34.00	40.00	92.45	Si	No

Tabla 1. Abatimiento del nivel freático, espesor de sedimentos y factibilidad de deformación de ambos bloques de cada uno de los fallamientos identificados en la ciudad de Morelia.

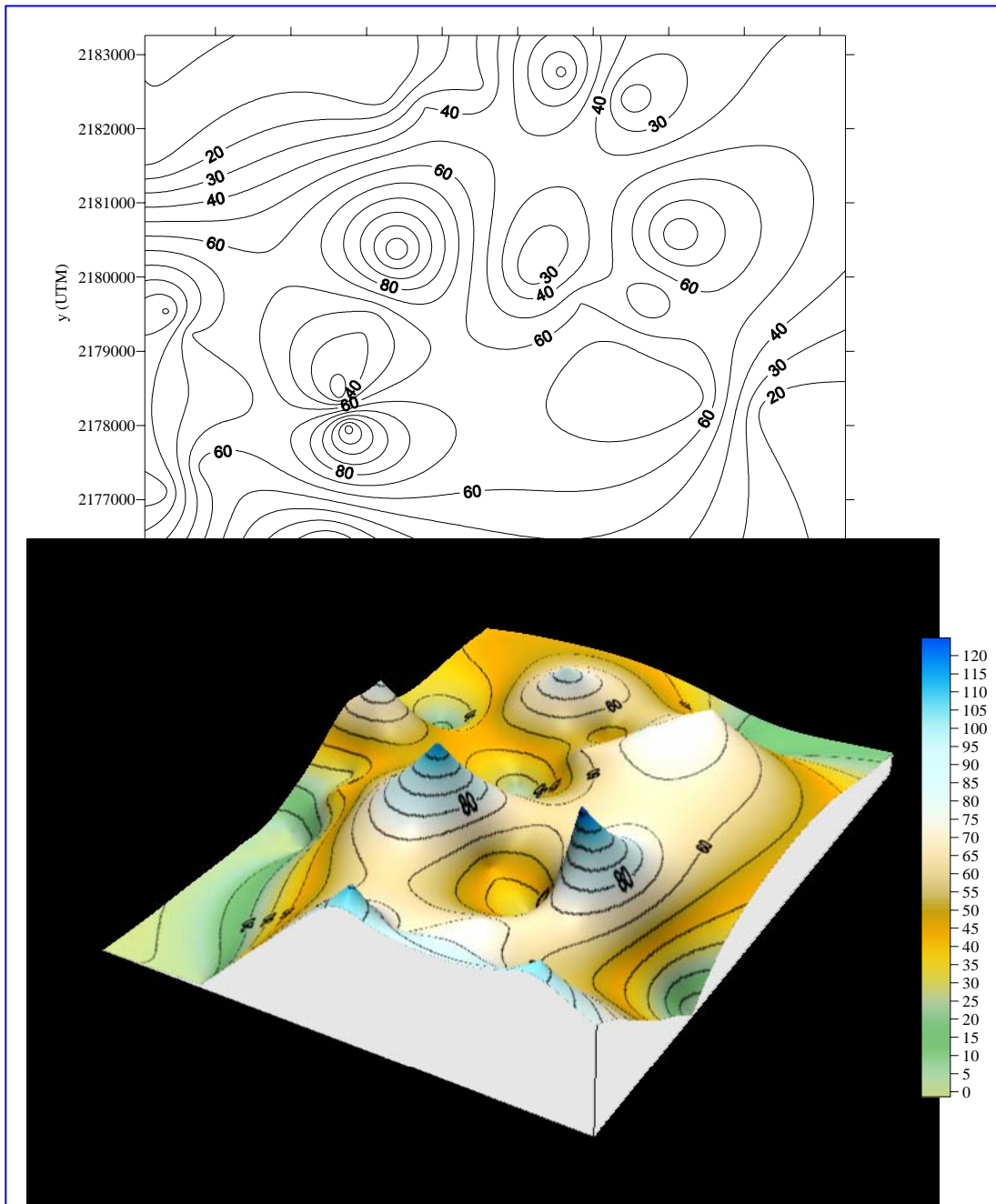


Fig. 4. Modelo de espesor de sedimentos lacustres y fluvio-lacustres de la Ciudad de Morelia.

3.2 Abatimiento de los niveles freáticos

Para conocer el abatimiento que sufren los niveles freáticos de la ciudad, se empleó también la información de los pozos profundos utilizados para abastecimiento de agua en Morelia. Asumiendo que el ritmo de bombeo se mantuvo constante para los periodos en los que no se tuvo información suficiente, se construyó el modelo que se presenta en la Figura 5.

Conocido el abatimiento de los niveles freáticos, se relacionaron con ambos bloques de cada uno de los fallamientos (Tabla 1, columnas cuarta y quinta), utilizando el dato de los pozos aledaños a cada bloque de los fallamientos señalados.

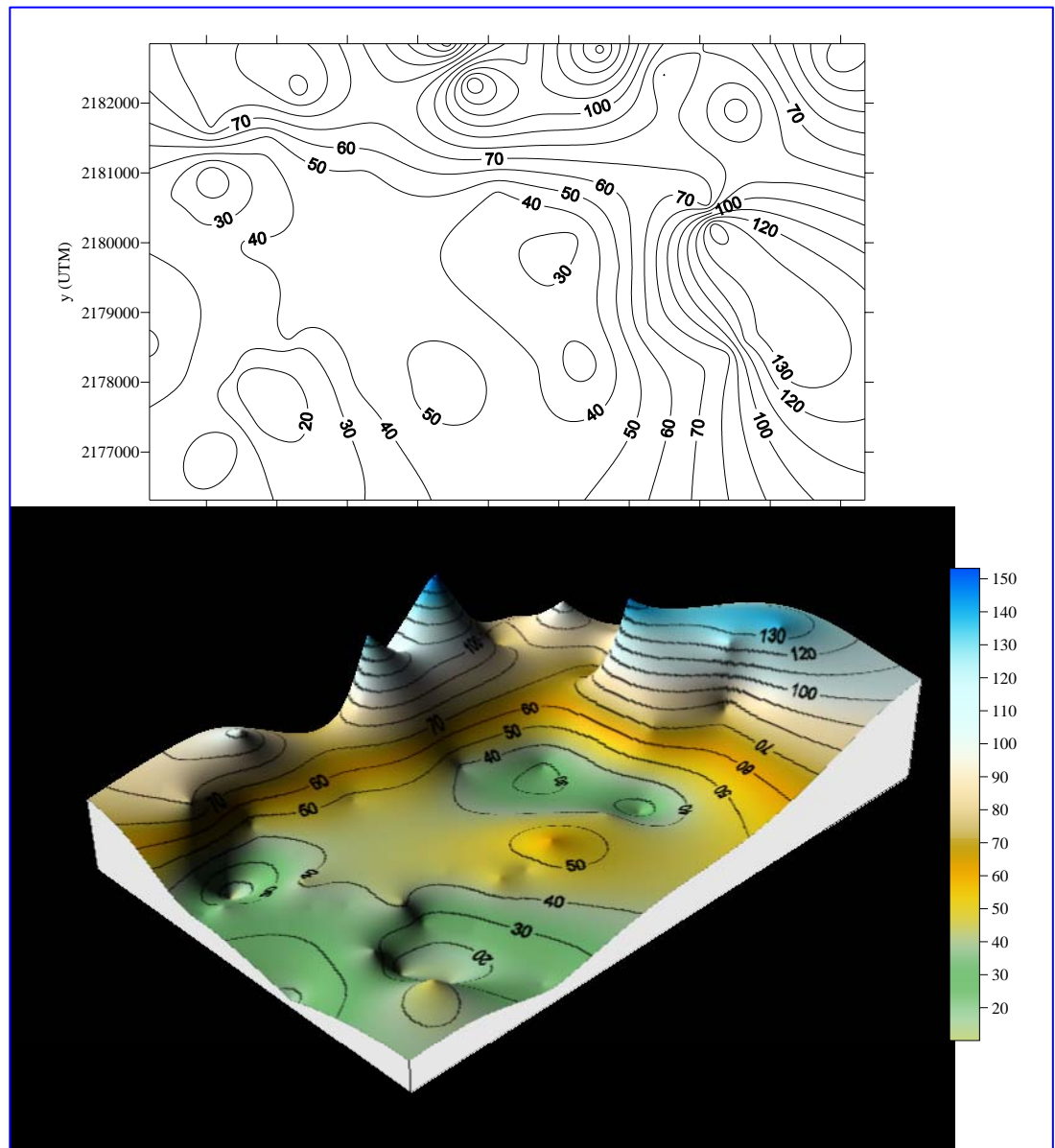


Fig. 5. Modelo de abatimiento de niveles freáticos en la Ciudad de Morelia.

3.3 Factibilidad de deformación

Una vez que se conoce tanto el espesor de sedimentos como el abatimiento del nivel freático en el bloque alto y bajo de cada uno de los fallamientos identificados en la ciudad, es posible determinar la factibilidad de que dichos bloques continúen deformándose. Esto puede hacerse comparando el espesor de sedimentos en el bloque con su respectivo abatimiento del nivel freático. Si el primero es mayor que el segundo, significa que los sedimentos todavía pueden presentar más deformación. En cambio, si el espesor de los sedimentos es menor que el abatimiento, es muy probable que los sedimentos ya hayan sufrido toda la deformación posible en cuanto a consolidación primaria se refiere. Desde luego, siempre es posible que sufran todavía alguna deformación por consolidación secundaria, pero esta es generalmente insignificante comparada con la deformación ocurrida por la consolidación primera, razón por la cual no se toma en cuenta en este trabajo.

Puede verse en la Tabla 1 que en el bloque alto de los fallamientos Central Camionera, Chapultepec y El Realito no se tuvo información sobre el abatimiento de los niveles freáticos. A pesar de ello fue posible

determinar su factibilidad de deformación, tomando en cuenta las siguientes dos premisas empíricas que resultaron de los estudios realizados en este trabajo:

- El espesor de sedimentos en los bloques bajos de los fallamientos es mayor que el de los bloques altos (de ser igual no se presentaría un salto en la superficie).
- Generalmente el abatimiento del nivel freático en los bloques bajos de los fallamientos es mayor que el de los bloques altos, salvo casos especiales.

3.4 Hundimientos ocurridos

Para determinar el hundimiento actual que ya ha ocurrido en ambos bloques de cada uno de los fallamientos, se empleó el modelo teórico que relaciona el hundimiento potencial con la compresibilidad del suelo (Rojas-González *et al.*, 2002), cuya ecuación es $v = c_f h$, donde:

v : Hundimiento del suelo.

c_f : Factor de compresión del suelo.

h : Espesor de la masa de suelo.

El factor de compresión del suelo (c_f) se determina a partir del índice de compresibilidad (c_c), de la relación de vacíos inicial (e_i) y del peso específico (γ_m) del suelo. Estos datos se pueden obtener a partir de un ensaye de consolidación unidimensional, pero para el modelado de sedimentos lacustres y fluviolacustres en las ciudades de Querétaro y Morelia se ha empleado como factor de compresión c_f un valor de 0.08 (Rojas-González *et al.*, 2002; Ávila-Olivera, 2004).

Con ese factor de compresión de los sedimentos lacustres y fluviolacustres (c_f), y utilizando el espesor de los sedimentos medido en los bloques de los fallamientos, se aplicó la ecuación para calcular el hundimiento teórico que ya habría ocurrido en cada bloque. También se calculó el salto teórico que habría ocurrido entre los bloques, que resulta ser la diferencia entre el hundimiento de cada uno.

Los resultados se presentan en la Tabla 2, en la que también se incluyen los saltos realmente medidos a fines de 2003, para comparar y verificar el método y los parámetros empleados (ver también Fig. 6). Puede observarse que hay buena coincidencia entre el salto teórico calculado con la ecuación y el salto real medido en cada fallamiento en esa fecha.

Fallamiento	Bloque bajo			Bloque alto			Salto calculado (m)	Salto medido (m)
	c_f	h (m)	v (m)	c_f	h (m)	v (m)		
1. Central Camionera	0.08	37.66	3.01	0.08	29.00	2.32	0.69	0.60 – 0.80
2. La Colina	0.08	80.00	6.40	0.08	40.94	3.28	3.12	3.00 – 4.40
3. Torremolinos	0.08	34.00	2.72	0.08	29.87	2.39	0.33	0.20 – 0.40
4. Chapultepec	0.08	78.00	6.24	0.08	72.00	5.76	0.48	0.50
5. El Realito	0.08	10.00	0.80	0.08	4.00	0.32	0.48	0.50
6. La Soledad	0.08	40.00	3.20	0.08	34.00	2.72	0.48	0.50

Tabla 2. Hundimientos, saltos calculados y saltos medidos actuales, en los fallamientos de la ciudad de Morelia (c_f : Factor de compresión, h : Espesor de los sedimentos, v : hundimiento).

3.5 Hundimiento total probable

Empleando el mismo método y ecuación que se utilizaron para calcular los hundimientos teóricos ya ocurridos, se determinó el máximo hundimiento total probable que podría presentarse en cada bloque de los fallamientos, en caso de que los niveles freáticos continuaran bajando hasta que el abatimiento llegara a rebasar el espesor de los sedimentos en aquellos bloques donde éste es aún mayor que aquél.

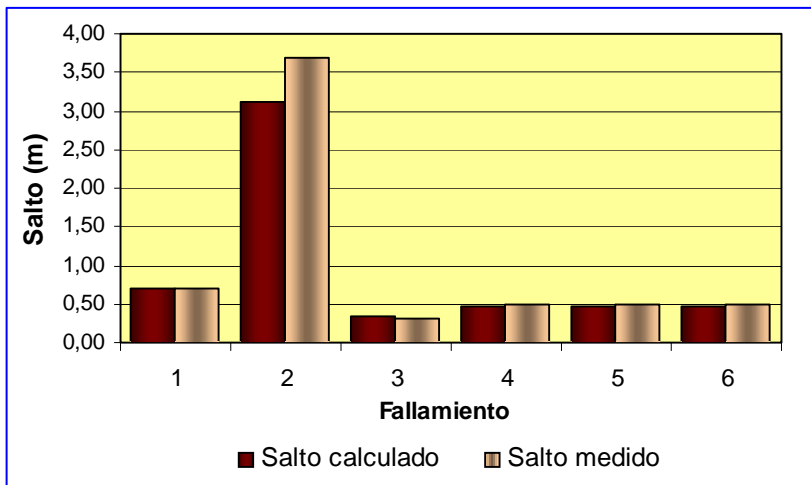


Fig. 6. Comparación entre el salto medido y calculado de los fallamientos de Morelia (1. Central Camionera, 2. La Colina, 3. Torremolinos, 4. Chapultepec, 5. El Realito, 6. La Soledad)

Una vez conocido el hundimiento total probable en cada bloque, sólo hay que restarle el hundimiento actual, ya ocurrido, para obtener el hundimiento restante probable. Es igualmente posible obtener el máximo salto restante probable en cada fallamiento, el cual resulta de la diferencia entre los hundimientos restantes probables de cada bloque.

Esos datos se presentan en la Tabla 3, lo que permite estimar el escenario que podría ocurrir en cada fallamiento si continúa la explotación de los acuíferos al mismo ritmo y el nivel freático sigue abatiéndose (ver también Fig. 7).

Fallamiento	Hundimiento (Bloque bajo)			Hundimiento (Bloque alto)			Salto restante (m)
	Total	Actual	Restante	Total	Actual	Restante	
1. Central Camionera	9.60	3.01	6.59	2.32	2.32	0.00	6.59
2. La Colina	8.96	6.40	2.56	5.52	3.28	2.24	0.32
3. Torremolinos	7.20	2.72	4.48	6.36	2.39	3.97	0.51
4. Chapultepec	6.24	6.24	0.00	5.76	5.76	0.00	0.00
5. El Realito	1.20	0.80	0.40	0.32	0.32	0.00	0.40
6. La Soledad	3.60	3.20	0.40	2.72	2.72	0.00	0.40

Tabla 3. Hundimientos totales, actuales y restantes, así como saltos restantes de los fallamientos de la ciudad de Morelia.

4. Discusión y conclusiones

Con base en el análisis de espesor de sedimentos, se puede decir que los bloques bajos de los fallamientos de la ciudad de Morelia están conformados por un espesor mayor de sedimentos lacustres y fluvio-lacustres que aquellos de los bloques altos. Lo anterior se debe a la presencia de fallas geológicas normales que controlaron la geometría de dichos sedimentos y que además labraron la morfología de las actuales cuencas.

Del análisis del abatimiento de los niveles freáticos en los pozos profundos empleados para la extracción del agua del subsuelo, se observó que en los bloques altos de los fallamientos estudiados el nivel freático se localiza a mayor profundidad que en los bloques bajos, lo que confirma que en estos últimos el espesor de sedimentos lacustres y fluvio-lacustres es mayor, lo que a su vez corrobora la existencia de fallas geológicas sepultadas.

De acuerdo con este trabajo, puede decirse que el comportamiento probable de los fallamientos identificados es el siguiente:

Fallamiento Central Camionera.

Este es el que presenta el mayor salto restante potencial, con casi 7 metros, por lo que los hundimientos futuros podrían ser muy heterogéneos. Sin embargo, el bloque alto del fallamiento probablemente no presentará más hundimientos, ya que parece haberse deformado en toda su capacidad en lo que se refiere a su consolidación primaria. Podría haber aún cierto asentamiento por consolidación secundaria debida al *creep*, pero puede concluirse que las edificaciones ubicadas en el bloque alto prácticamente no corren riesgos mayores, mientras que las que se localizan en el bloque bajo corren el mayor riesgo potencial.

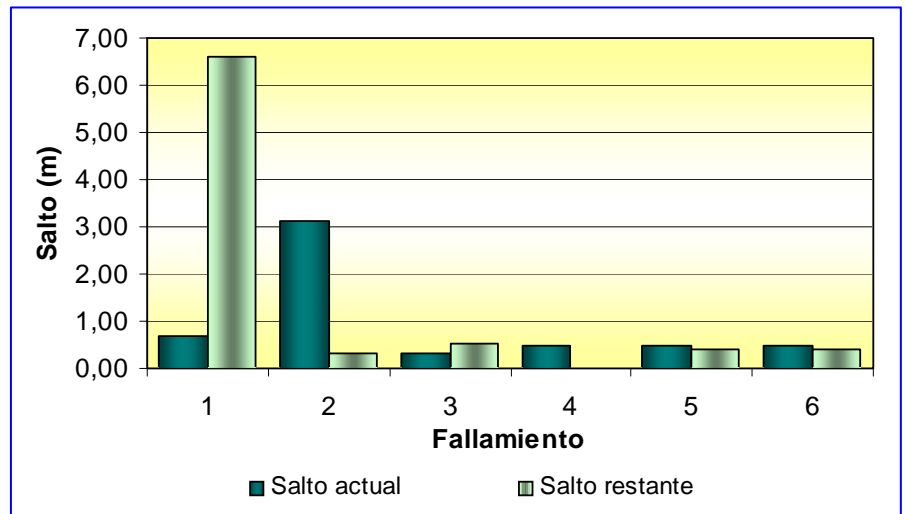


Fig. 7. Comparación entre el salto actual y restante de los fallamientos de la ciudad de Morelia (1. Central Camionera, 2. La Colina, 3. Torremolinos, 4. Chapultepec, 5. El Realito, 6. La Soledad)

Fallamiento La Colina. Este fallamiento puede sufrir hundimientos potenciales adicionales de poco más de dos metros en ambos bloques, aunque en todo caso serán hundimientos bastante homogéneos ya que el salto restante potencial entre sus bloques alto y bajo es de apenas 30 centímetros. El riesgo de las edificaciones y obras civiles en ese fallamiento es relativamente bajo.

Fallamiento Torremolinos. Aquí pueden ocurrir hundimientos importantes, de entre 4 y 4.5 metros. No serán tan homogéneos como en el fallamiento La Colina, pero tampoco tan diferenciados como en la Central Camionera, ya que el salto restante probable es de medio metro. Puede concluirse que las edificaciones presentan un riesgo bajo a medio.

Fallamiento Chapultepec. Este es el único fallamiento que no parece presentar riesgo de mayor hundimiento, ya que ambos bloques han alcanzado su consolidación primaria. Podría haber consolidación secundaria por *creep*, pero en todo caso resultaría poco significativa.

Fallamientos El Realito y La Soledad. Los pronósticos son similares para ambos. No es probable que ocurran más hundimientos en sus bloques altos, y el hundimiento adicional probable en sus respectivos bloques bajos es menor de medio metro, igual al salto restante probable. El riesgo aquí también parece ser de bajo a medio.

Referencias

Ávila-Olivera, J.A. (2004). Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con procesos de subsidencia-*creep*-falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, 234 p. Inédito.

- Garduño-Monroy, V.H., G.M. Rodríguez-Torres, I. Israde-Alcántara I. E. Arreygue-Rocha, P. Canuti y S. Chiesa (1999). Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia. *Geos, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, Vol. 9, No. 2, pp. 84-93.
- Garduño-Monroy, V.H., E. Arreygue-Rocha, I. Israde-Alcántara y G.M. Rodríguez-Torres (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-54.
- Lermo-Samaniego, J., J. Nieto Obregón and M. Zermeño (1996). Fault and fractures in the valley of Aguascalientes, Preliminary microzonification. *Paper 1651 in the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Amsterdam.
- Martínez-Reyes, J., y A.F. Nieto-Samaniego (1990). Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México, México D.F. *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*, Vol. 9, No. 1, pp. 33-50.
- Rojas-González, E., J. Arzate-Flores y M. Arroyo-Contreras (2002). Predicción de las zonas de agrietamientos debido a la extracción de agua. *Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Tomo 1, pp. 173-181.
- Suter M., O. Quintero-Legorreta, M. López-Martínez, G. Aguirre-Díaz and E. Farrar (1995). The Acambay graben: active intraarc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Tectonics*, Vol. 14, No. 5., pp. 1245-1262.
- Trujillo-Candelaria, J.A. (1985). Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto. *Memorias de la Reunión sobre Asentamientos Regionales*, México, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos y Asociación Geohidrológica Mexicana, pp. 1-2.