

Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas. Caso de estudio Morelia, Mich.

*Victor Manuel Hernández Madrigal, Netzahualcoyotl Flores Lázaro,
Cecilia Irene Villaseñor Reyes y Jesús Arturo Muñiz Jáuregui*

Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. USMNH

Resumen

La subsidencia diferencial afecta severamente a la infraestructura urbana y rural, produciendo alarmantes pérdidas económicas que por mucho tiempo se determinaron de manera subjetiva, y que ahora en nuestro país comienzan a ser evaluadas de manera sistemática. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto económico producido por cinco de las trece fallas geológicas asísmicas o subsidencia diferencial que afectan a la ciudad de Morelia, Mich. Para ello se aplicó la metodología propuesta por Hernández-Madrigal et al. (2014) fundamentada en el cálculo de un factor de demérito obtenido mediante las relaciones espaciales de proximidad y pertenencia que guardan entre sí los predios y fallas geológicas que los afectan, todo ello evaluado dentro de un Sistema de

Información Geográfica. El producto del factor de demérito por el valor del predio representó el impacto económico individual, su sumatoria el impacto económico total producido por falla geológica, y la sumatoria de los impactos obtenidos en las cinco fallas el impacto económico global. Se utilizaron dos valores de predios: i) valor catastral, calculado con base en el valor de calle, permitió estimar un impacto económico global de \$28,950,343 pesos; y ii) valor de terreno y construcción, calculado con base en un valor medio de 281 USD/m² (\$4,496.00 pesos/m²), arrojó un impacto económico global de 13,424,235 USD (\$201,363,538 pesos). La falla geológica Nocupétaro produce la mayor afectación debido a su desarrollo longitudinal, mientras que en la falla Chapultepec el valor de calle la convierte en la segunda con mayor impacto económico.

Palabras clave: Subsidencia diferencial, impacto económico, Morelia

Abstract

The differential subsidence affects severely the urban and rural infrastructure, producing great economic losses that was evaluated subjectively for a long time, and now in our country begin to be evaluated systematically. This paper aims to assess the Economic Impact produced by five of thirteen geological aseismic Morelia faults. To achieve this the Hernandez-Madriral et al. (2014) methodology was applied. In this, demerit factors were obtained through a GIS, considering the spatial proximity and ownership relationships there are between the geological faults and properties damaged. The demerit factor multiplied by the property value represented the individual economic impact, their sum the total economic impact caused by a specific geological fault, and the sum of all these the overall economic impact. Two property values were used, the first one based on the cadastral value allowed an overall economic impact of \$ 28'950,343 pesos; while the second one, based on an average value of square meter of construction and land, resulting in an overall economic impact of 13'424,235 USD (\$ 201'363,538 pesos). The geological fault Nocupetaro produces the highest economic impact due to its longitudinal development, while in the Chapultepec fault her high street value makes it the second highest economic impact.

Keywords: Differential subsidence, economic impact, Morelia.

Introducción

La subsidencia o hundimiento del terreno es detonada por la extracción de líquidos subterráneos tales como gas, petróleo y agua. En México, la sobreexplotación del agua subterránea constituye el principal factor detonante de la subsidencia regional que afecta a numerosas ciudades del centro de la República Mexicana tales como la ciudad de México (Adrián et al., 1999), Celaya (Díaz-Salmerón, 2010; Giordano, 2010), Querétaro (Pacheco et al., 2006), Irapuato, Salamanca (Garduño et al., 2000), Silao, Aguascalientes, Santa Ana Maya y Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001), entre otras. La sobreexplotación del agua subterránea abate el nivel freático y en consecuencia reduce la presión de poro de los materiales no consolidados que conforman el acuífero. Lo anterior se traduce en incrementos del esfuerzo efectivo, manifestándose reacomodos de la fase sólida y por ende, una disminución de volumen del depósito fluviolacustre que en superficie se aprecia como hundimiento del terreno. Cuando esta subsidencia se desarrolla sobre materiales no consolidados depositados sobre antiguas fallas geológicas o paleorelives abruptos, se produce la subsidencia diferencial también conocida como hundimiento diferencial, falla de superficie (Holzer, 1984), falla geológica asísmica o proceso de subsidencia creep-falla (Garduño-Monroy et al., 2001; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006). Se ha encontrado que los escarpes producidos por la subsidencia diferencial son coincidentes con los puntos de máxima convexidad (Holzer y Pampeyan, 1981) de la paleosuperficie sepultada; es decir, con la corona de escarpes de esas antiguas fallas geológicas o bien, de contactos litológicos fuertemente inclinados. En suma, la sobreexplotación del agua subterránea genera subsidencia y ésta, en combinación con antiguas fallas geológicas cubiertas por depósitos no consolidados, produce la subsidencia diferencial.

El impacto de la subsidencia regional o diferencial, es principalmente material y económico. Particularmente la subsidencia diferencial produce en zonas urbanas deformaciones en obras civiles, afectando incluso monumentos históricos de gran interés como el Ex Convento de San Agustín en Salamanca, Gto, (Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez, 2006), así como instalaciones industriales y hospitales. Todo ello con registro de grietas, deformaciones estructurales, y ruptura de instalaciones especiales. En edificaciones de más de dos plantas el hundimiento diferencial genera graves desplomes que ponen en riesgo la seguridad y funcionalidad de la construcción. En zonas rurales y agrícolas, es común el agrietamiento de canales y la formación de escarpes que rompen con la pendiente natural del terreno generando obstáculos en el arado del suelo, modificación de la

dirección del escurrimiento superficial, así como zonas de inundación progresiva focalizada en el bloque de falla que se hunde. Por lo anterior, en el largo plazo los daños económicos asociados a este fenómeno son alarmantes. Por ejemplo, en China se reportan pérdidas por varios miles de billones de dólares en ciudades ubicadas sobre el delta del río Yangtze (Yin et al., 2006), en la planicie del norte de China (Hu et al., 2013), así como en ciudades costeras (Zhang y Wang, 2005). En México, y particularmente en Morelia, Mich., se suponen pérdidas de varios millones de pesos (Garduño-Monroy, et al., 1998) derivados de la demolición de la fábrica de aceites Tron Hermanos, antigua Central de autobuses, edificio de urgencias del IMSS y cinco casas dúplex en Infonavit La Colina (Garduño et al., 1988), además de múltiples viviendas y edificios públicos dañados. Sin embargo, estas estimaciones para el caso de Morelia son generalmente cualitativas y carecen de principios valuatorios fundamentales, por ello el presente trabajo tiene como objetivo principal la evaluación del impacto económico por subsidencia diferencial, mediante la implementación de un modelo numérico previamente revisado por especialistas en valuación.

Con base en la revisión de antecedentes lograda hasta el momento, se ha encontrado que para evaluar pérdidas económicas producidas por subsidencia regional existen una gran número de métodos, de entre los que destacan: valor futuro, costo ingenieril, *shadow engineering method*, costo por reemplazo, comparación de desastres, método proporcional a la relación de costos directos e indirectos, descomposición de pesos, juicio de expertos, *Delphi*, métodos estadísticos basados en investigación, métodos de predicción de base estadística, y métodos de análisis de regresión (Hu et al., 2004; Zhang y Wang, 2005; Yi et al., 2010; Liu et al., 2012; Hu et al., 2013).

Sin embargo, los métodos de evaluación de impacto económico por efecto de subsidencia diferencial son limitados encontrándose hasta el momento solo dos propuestas. La primera, hecha por Julio-Miranda et al. (2012), corresponde a una adaptación de la propuesta de Blong (2003) en donde la pérdida económica resulta del producto del grado de severidad de la afectación, evaluada in situ, por la proporción de costo estimado con referencia a un inmueble de características promedio. En el segundo método, propuesto por Hernández-Madrigal et al. (2014), el impacto económico es el producto del valor catastral del predio afectado por un respectivo factor de demérito. Este último calculado con base en relaciones espaciales de proximidad y pertenencia que guardan entre si los predios afectados, la trayectoria de la subsidencia diferencial y su franja de afectación.

Es de resaltar que los métodos para evaluar pérdidas económicas asociadas a subsidencia regional, se caracterizan por considerar únicamente la relación espacial de inclusión; es decir, el valor numérico resulta del producto del costo unitario, obtenido con cualquiera de los métodos arriba indicados, por el número de unidades o viviendas afectadas e incluidas en el polígono de subsidencia. En cambio, los métodos para subsidencia diferencial estiman la pérdida económica multiplicando el costo del inmueble por el número de viviendas intersectadas por el eje de falla. Esto debido a que el primer tipo de subsidencia tiene una expresión poligonal mientras que en el segundo tipo el comportamiento es evidentemente lineal; por ello que los métodos no sean compatibles entre sí. Una característica común en los métodos para subsidencia diferencial, es que por necesidad buscan ser discretos dado que la afectación es inversamente proporcional a la distancia del eje de falla. En el caso del método de Julio Miranda et al. (2012) la discrecionalidad se logra mediante el grado de afectación evaluada *in situ* por expertos. Mientras que Hernández-Madrigal et al (2014) obtiene la discrecionalidad mediante el uso de un factor de demérito calculado a partir de relaciones netamente espaciales, sin la influencia del carácter o personalidad del experto que pueda generar estimaciones sesgadas.

Es por esto último que en el presente trabajo se aplicará el método de Hernández-Madrigal et al. (2014), siendo además que fue un método diseñado acorde a las características geológicas y cartográficas disponibles para la ciudad de Morelia.

En este trabajo se presenta el factor de demérito, valor catastral e impacto económico para viviendas de la ciudad de Morelia afectadas por las fallas geológicas asísmicas: Nocupétaro, La Colina, Cuautla, Mirasoles y Chapultepec. El análisis para el resto de las fallas se realizará en trabajos futuros.

Área de estudio

La ciudad de Morelia, ubicada en el sector septentrional del Estado de Michoacán de Ocampo, es definida fisiográficamente por el Corredor Tarasco y Sierra de Mil Cumbres que corresponden a subprovincias del Cinturón Volcánico Transmexicano. Las principales unidades litoestratigráficas de la ciudad son, de la más antigua a la más reciente (Fig. 1): i) secuencia andesítica Mil Cumbres (Mioceno medio-superior, >12Ma), color gris verdoso intensamente alteradas y fracturadas de espesor mayor a los 200m (Garduño-Monroy, et al., 2001); ii) flujos piroclásticos ignimbríticos del Mioceno de composición riolítica, generalmente de color rosa, ricos en líticos de

Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas...

andesitas y pómez, de espesor máximo de 200m; iii) epiclastitas o depósitos coluvio-aluviales contemporáneos al flujo piroclástico; iv) complejo volcánico del Cerro Punhuato (Mioceno), integrado por derrames de lavas y brechas (andesíticas y dacíticas), así como por un flujo piroclástico producto del colapso occidental de su edificio volcánico; v) secuencias lacustres, fluviolacustres, flujos piroclásticos del Mioceno-Plioceno y depósitos recientes conformadas por alternancias de materiales no consolidados (limos, arcillas, arenas y gravas) de hasta 60m de espesor. En esta unidad se encuentra el actual nivel freático y al menos 105 pozos profundos que proveen el 44% del agua potable de la ciudad (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006).

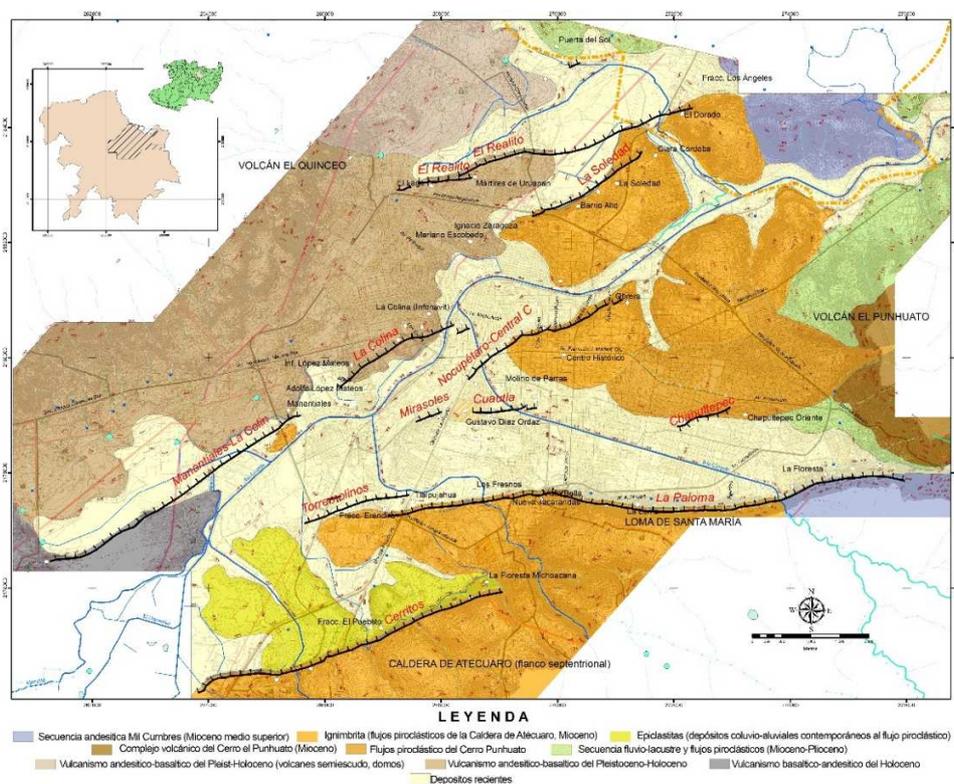


Figura 1.- Localización y geología de la ciudad de Morelia con trayectoria de fallas por subsidencia diferencial. Modificado de Hernández-Madriral et al. (2011).

Trabajos realizados por éstos últimos autores muestran abatimientos medios del nivel freático de 3m/año, con valores máximos de hasta 18m/año durante el periodo

1980-1990; años en los que se inicia también el registro de fallas geológicas asísmicas asociadas a procesos de subsidencia o hundimiento diferencial.

El crecimiento desordenado de la mancha urbana de Morelia produce un desequilibrio hídrico cada vez más crítico. Debido por un parte a la extracción de mayores volúmenes de agua subterránea y por otra, al incremento de superficies asfaltadas y pavimentadas que inhiben la infiltración y en consecuencia la recarga de los acuíferos. En correspondencia con lo anterior, el proceso de subsidencia diferencial se intensifica y genera incrementos importantes en la longitud y desnivel de las fallas asísmicas, así como en el número de estas. Actualmente, se tiene el registro y cartografía de la trayectoria de trece fallas, las cuales se enlistan a continuación de norte a sur: Puerta del Sol, El Realito-Lago, La Soledad, La Colina, Manantiales, Nocupétaro, Mirasoles, Cuautla, Chapultepec, Viveros, Torremolinos, La Paloma y Cerritos (Fig. 1) (Hernández-Madrigal et al., 2011). Todas con orientación E-O y ENE-OSO concordante con la orientación del fallamiento Morelia-Acambay y con hundimiento del bloque norte, a excepción de las fallas Chapultepec y Viveros cuyo desplazamiento es hacia el sur.

Materiales y método

El cálculo del impacto económico se inició con la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para lo cual se empleó el programa ArcGis 10.2. Los insumos cartográficos básicos consistieron en mapa planimétrico de la mancha urbana de la ciudad de Morelia, obtenida por restitución fotogramétrica a partir de imágenes aéreas del INEGI (1995); trayectoria de fallas geológicas y sus respectivas franjas de afectación, así como valores de calle obtenido del plano de valores para la ciudad de Morelia publicado por la Secretaría de Finanzas del Estado de Michoacán actualizado al año 2015.

El impacto económico (IE) producido por cada una de las fallas geológicas se evaluó mediante las siguientes ecuaciones:

$$IE = PE_1 + PE_2 + \dots + PE_n \quad (1)$$

$$PE_i = VP_i * FD_i \quad (2)$$

Donde:

IE = Impacto económico por falla geológica

PE_i = Pérdida económica para el predio "i"

VP_i = Valor del predio "i"

FD_i = Factor de demérito del predio "i" normalizado a 1

En este trabajo se utilizaron dos valores de predio (VP_i): el primero corresponde al valor catastral, es decir, al valor del terreno, que resultó de multiplicar el valor de calle por el área del predio de interés; mientras que en el segundo se utilizó un valor de terreno y construcción de 281USD/m², propuesto por Julio-Miranda et al. (2012) para situaciones similares en San Luis Potosí, integrado por costos promedio de construcción y de terreno de 158 USD y 123USD, respectivamente.

En tanto que el factor de demérito se obtuvo mediante la siguiente ecuación (Hernández-Madrigal et al., 2014):

$$FD_i = \frac{\left(\frac{AA_i + 1}{A_i + d_i}\right)}{2} \quad (3)$$

Donde:

AA_i = Área del predio "i" ocupada por la franja de afectación (m²)

A_i = Área total del predio "i" (m²)

D_i = Distancia perpendicular del centroide del predio "i" al eje de la falla (m)
(d_i ≥ 1m)

El primer término de la ecuación anterior representa el efecto de la orientación y pertenencia de la falla con respecto al predio afectado, mientras que en el segundo se representa la proximidad del predio al eje de falla geológica. Así, el FD es evaluado en función de las relaciones espaciales de proximidad y pertenencia que guardan entre sí el predio con respecto a la falla geológica que lo afecta.

Resultados

Se obtuvo la distribución espacial y montos del Impacto Económico (IE) producidos por las fallas Nocupétaro, Chapultepec, La Colina, Cuautla y Mirasoles (Figs. 2, 3, 4, 5 y 6).

Valores catastrales

Los resultados muestran que con base en los valores catastrales las fallas geológicas Colina y Chapultepec registran, a nivel de predio, valores mínimos de IE

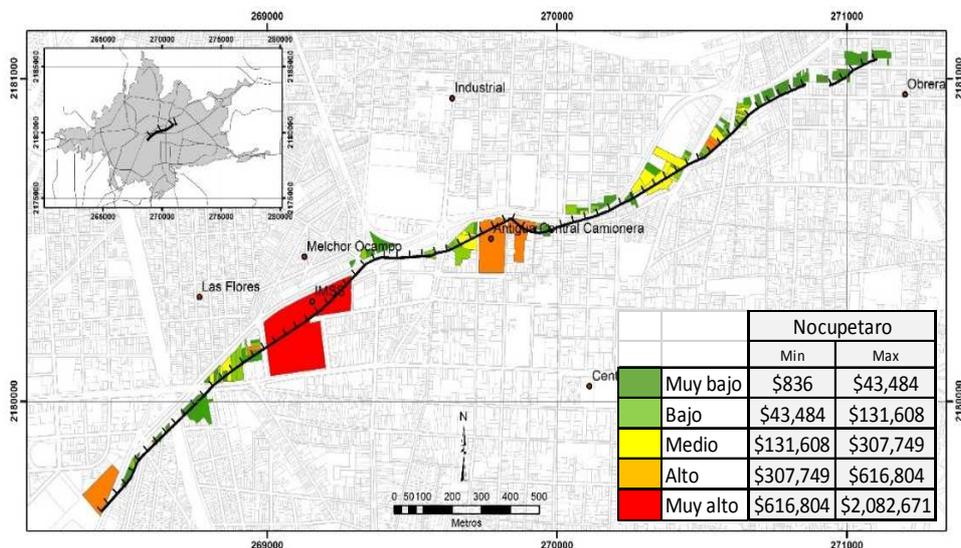


Figura 2.- Distribución espacial de predios afectados e impacto económico producido por falla geológica Nocupétaro.

de entre \$400 a \$411/predio, respectivamente; y valores máximos de IE son registrados en la Chapultepec y Nocupétaro con montos de \$1'050,537 a \$2'082,671/predio, respectivamente (Tabla1). Lo cual evidentemente está relacionado con el valor de calle y área de los predios afectados. Por ejemplo, en el caso de la falla Nocupétaro el mayor impacto se concentra en el Centro Histórico y Calzada La Huerta, donde el valor y área de los predios es mayor, mientras que predios con menor área, valor e impacto se ubican en la Col. Obrera (Fig. 2). En fallas como la Chapultepec, en donde las calles presentan valores homogéneos, la distribución espacial del impacto económico es más sensible al grado de exposición o factor de demérito (Fig. 3). El IE global producido por las cinco fallas geológicas alcanza un monto de \$28'950,343, distribuido de la siguiente manera: Nocupétaro 47.15%, Chapultepec 23.3%, La Colina 18.17%, Cuautla 7.07% y Mirasoles 4.3% (Tabla 2). Es decir, de las cinco fallas analizadas las tres primeras con mayor grado de afectación son Nocupétaro, seguida por la Chapultepec y después La Colina.

Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas...

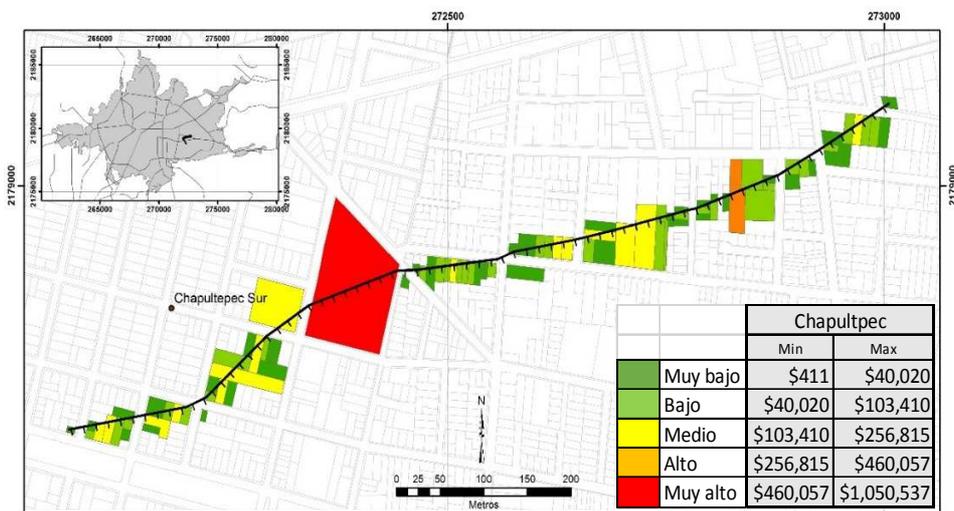


Figura 3.- Distribución espacial de predios afectados e impacto económico producido por falla geológica Chapultepec. Observe que en este caso el bloque caído se encuentra al sur de la falla.

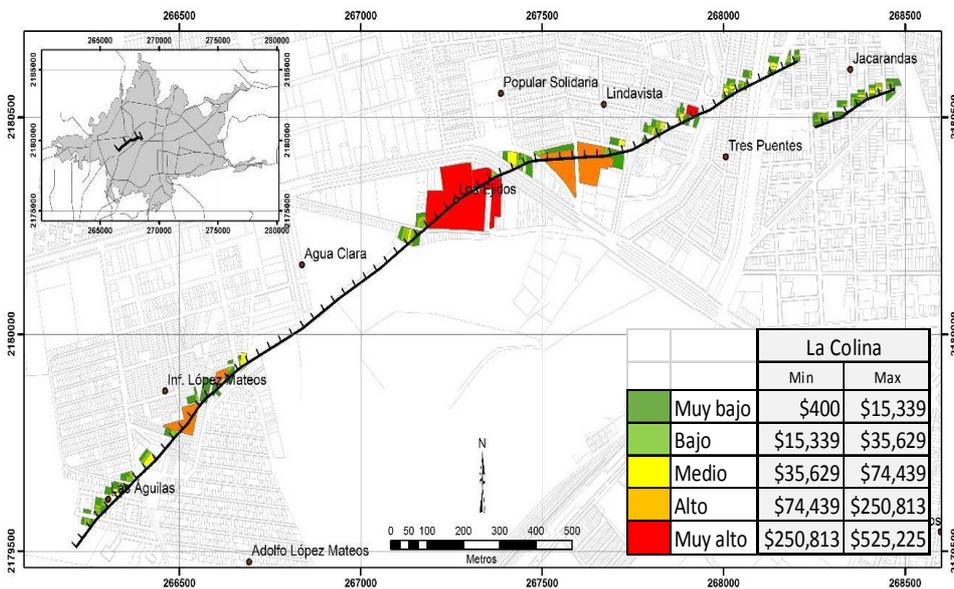


Figura 4.- Distribución espacial de predios afectados e impacto económico producido por falla geológica La Colina.

Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas...

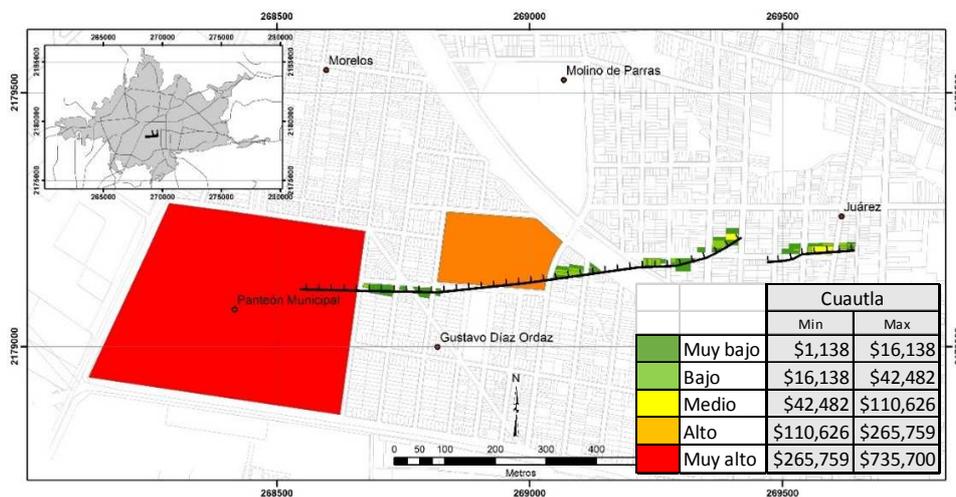


Figura 5.- Distribución espacial de predios afectados e impacto económico producido por falla geológica Cuautla.

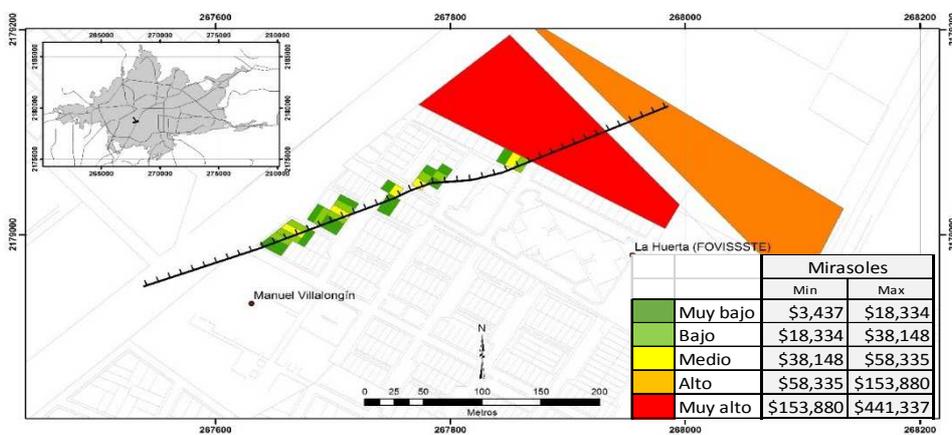


Figura 6.- Distribución espacial de predios afectados e impacto económico producido por falla geológica Mirasoles.

Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas...

TABLA 1

Impacto económico mínimo y máximo producido por cada falla geológica, considerando únicamente el valor del terreno de acuerdo al valor de calle para el año 2015.

Nombre	Impacto económico (\$)	
	Mínimo	Máximo
Nocupétaro	836	2'082,671
Chapultepec	411	1'050,537
La Colina	400	525,225
Cuatla	1,138	735,700
Mirasoles	3,437	441,337

TABLA 2

Impacto económico total y global, obtenido del análisis espacial realizado en el SIG con base en el valor del terreno.

Falla geológica	Longitud		Franja de afectación		Predios afectados		Área total afectada		FD	Valor medio de calle		Impacto Económico	
	m	%	Norte (m)	Sur (m)	N°	%	m ²	%	prom (min-max)	\$	%	\$	%
Nocupétaro	3081	37.5	10	5	227	35.3	27377	45.18	0.284 (0.015-1)	606.8	20.3	13,650,756	47.15
Chapultepec	1025	12.5	3	5	104	16.2	6456	10.65	0.265 (0.02-0.9)	967.7	32.3	6,745,242	23.3
Colina	2576	31.3	10	5	214	33.3	19547	32.26	0.328 (0.02-1)	389.6	13.0	5,260,402	18.17
Cuatla	1060	12.9	5	3	68	10.6	5227	8.63	0.339 (0.007-0.96)	383.8	12.8	2,047,872	7.074
Mirasoles	482	5.86	5	3	30	4.67	1990	3.28	0.335 (0.01-0.8)	647.0	21.6	1,246,070	4.304
Totales =	8225				643		60596			2,994.9		28,950,343	

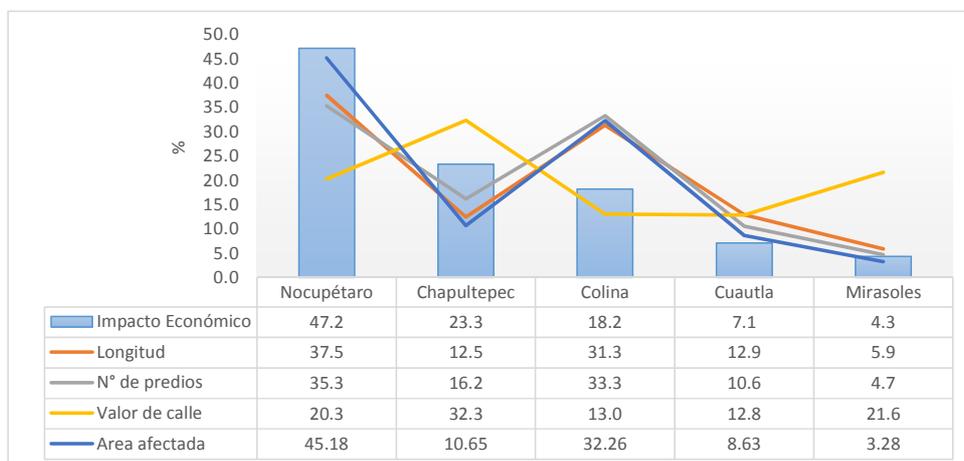


Figura 7.- Valores proporcionales de impacto económico, longitud, N° de predios afectados y valor de calle. Los valores numéricos se muestran en la tabla 1.

Como consecuencia del método aplicado, se tiene que los principales factores que determinan el grado de IE son: Longitud de falla o número de predios afectados, valor de calle y área afectada. Sin embargo, la influencia de estos factores es variable para cada estructura geológica. Por ejemplo en las fallas Nocupétaro y Colina (Fig. 7) el IE es proporcional al área afectada y longitud, mientras que en la falla Chapultepec el IE es influenciado principalmente por los valores de calle y menos por la longitud y área afectada. En las fallas Cuautla y Mirasoles el IE es bajo debido principalmente a su poco desarrollo longitudinal en comparación con las otras tres.

Valor de terreno y construcción

Si consideramos el valor promedio de 281 USD/m², empleado por Julio-Miranda et al. (2012) para el caso de San Luis Potosí; tendríamos que el Impacto Económico total producido por las cinco fallas sería de 13'424,235.92 USD equivalente a \$201'363,538 (Tabla 3).

TABLA 3
Impacto económico total y global obtenido con base en el valor medio de 281USD/m² de terreno y construcción.

Falla geológica	Pedios afectados	Impacto Económico	
	N°	USD	\$
Nocupétaro	227	5,553,636	83,304,547
Chapultepec	104	1,963,554	29,453,315
Colina	214	4,026,154	60,392,304
Cuautla	68	1,339,708	20,095,622
Mirasoles	30	541,183	8,117,751
Totales =	643	13,424,236	201,363,539

Con base en el valor medio del Factor de Demérito (FD) (Tabla 2), el cual puede entenderse también como factor de exposición, resulta que los inmuebles afectados por las fallas Cuautla y Mirasoles son los más expuestos en tanto que los inmuebles de la colonia Chapultepec presentan menor exposición. Lo anterior se debe a que en las primeras existen al menos dos predios, Panteón Municipal e Internado España-México, con muy alto grado de exposición.

Discusión

La aplicación del método propuesto por Hernández-Madrigal et al. (2014) fue rápida y sencilla. El factor de demérito obtenido es discreto y congruente con la afectación observada en campo. Sin embargo, los montos obtenidos del IE se observan subestimados dado que existen registros de pérdidas económicas superiores al total aquí calculado. Por mencionar un ejemplo se tiene la Torre del antiguo Hospital General Regional N° 1 del IMSS, cuya sola demolición costó más de 12 millones de pesos.

La subestimación del IE se generó principalmente por el uso de valores de calle o valores prediales, dado que son valores muy inferiores al valor del inmueble (terreno y construcción). Por lo tanto, una mayor exactitud del IE se podría alcanzar utilizando valores de terreno y de construcción vigentes para la ciudad de Morelia, requiriéndose para ello estudios amplios de mercado y análisis valuatorios especializados que quedan fuera del alcance de este trabajo, pero que se implementarán en proyectos posteriores. Otro elemento que influyó en la subestimación del IE fue la versión del mapa utilizado en este trabajo, dado que no consideró los desarrollos habitacionales más recientes de las Colonias Agua Clara y Los Ejidos afectados por la falla La Colina (Fig. 4).

Al utilizar la propuesta de 281USD/m², resulta un IE más congruente aunque muy cuestionable, toda vez que los valores comerciales de SLP son muy distintos a los de Morelia, además de que dentro de la misma ciudad los valores comerciales varían drásticamente de un sector a otro; sin embargo, resulta ser un referente para trabajos posteriores.

Finalmente, es importante destacar que las pérdidas económicas son en perjuicio de los propietarios. Esto porque la Ley de Catastro actual no considera ninguna disminución del impuesto predial para propiedades afectadas por subsidencia diferencial. La aplicación del factor de demérito, aquí calculado, en la determinación del impuesto predial coadyuvaría al fortalecimiento de los principios jurídicos de justicia tributaria.

Conclusiones

Se estimó el impacto económico producido por cinco de las trece fallas geológicas que afectan a la ciudad de Morelia. Por su desarrollo longitudinal, la falla Nocupétaro produce el mayor impacto económico de las cinco estructuras analizadas. En tanto

que por el valor de los predios afectados, la falla Chapultepec logra ubicarse en la segunda estructura con mayor IE.

En cuanto al monto global calculado de IE, se tiene por una parte que el valor predial genera subestimaciones al no considerar el valor de construcción o valor comercial del predio; y por otra, el empleo de un valor medio de m² de edificación y terreno, como constante a multiplicar por el área del predio afectado para obtener el valor de éste, permite estimar montos de IE más lógicos. Se destaca que para garantizar los principios de proporcionalidad y equidad en el cobro del impuesto predial, habrá de considerarse como referente un valor de mercado que incluya evidentemente el factor de demérito aquí calculado, debido a la afectación por subsidencia diferencial o falla geológica asísmica.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a los apoyos económicos otorgados por el proyecto de investigación de Ciencia Básica 134575 del CONACYT y del proyecto 2015 de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Literatura citada

- Adrian O.G., Rudolph D.L. y Cherry J.A., 1999. The analysis of long term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, **35**, 3327-3341. <http://dx.doi.org/10.1029/1999WR900148>
- Ávila-Olivera J.A. y Garduño-Monroy V.H., 2006. Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsidencia-Creep-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México. *Geotermia*, vol. 19, núm. 2. 50-59.
- Blong R., 2003. A new damage index. *Natural hazards* 30. 1-23.
- Díaz-Salmerón J.E., 2010. Geometría y monitoreo con GPS de los procesos de subsidencia-creep-falla (PSCF), en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México. Tesis de maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. 101 pp.
- Garduño-Monroy V.H., Arreygue E., Chiesa S., Israde I., Rodríguez G. y Ayala M., 1998. Las fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio. *Revista Ingeniería Civil*, vol. 1, n° 5. UMSNH. 4-12.

- Garduño V.H., Arreygue E. y Rodríguez G., 2000. Mapa de riesgos de Salamanca. Reporte técnico. Municipio de Salamanca. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy V.H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I. y Rodríguez-Torres G., 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*, v. 18, núm. 1. 37-54
- Giordano N., 2010. Estudio con georadar (GPR) de la geometría de los procesos de subsidencia-creep-falla (PSCF), en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México. Tesis de maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. 104 pp.
- Hernández-Madriral V.M., Garduño-Monroy V.H. y Avila-Olivera J.A., 2011. Atlas de peligros geológicos de la ciudad de Morelia, Mich: Estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento. H. Ayuntamiento de Morelia, Mich. Dirección de Protección Civil y Bomberos de Morelia. 82p.
- Hernández-Madriral V.M., Muñiz-Jáuregui J.A., Garduño-Monroy V.H., Flores-Lázaro N. y Figueroa-Miranda S., 2014. Depreciation factor equation to evaluate the economic losses from ground failure due to subsidence related to groundwater withdrawal. *Natural Science*. Vol. 6, N° 3. 108-113.
- Holzer L. y Pampeyan E., 1981. Earth fissures and localized differential subsidence. *Water resources research*. Vol. 17, N° 1. 223-227.
- Holzer T.L., 1984. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. P. 67-106. En: *Man-induced land subsidence* (Holzer TH. Ed.). Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology, Colorado.
- Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C. y Wang S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology* 76. 65-77.
- Hu B., Zhou J., Xu S., Chen Z., Wang J., Wang D., Wang L., Gou J. y Meng W., 2013. Assessment of hazards and economic losses induced by land subsidence in Tianjin Binhai new area from 2011 to 2020 based on scenario analysis. *Natural Hazards* 66. 873-886.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 1995. Fotografías aéreas a escala 1:75,000". Fecha de vuelo: febrero de 1995.
- Julio-Miranda P., Ortiz-Rodríguez A.J., Palacio-Aponte A.G., López-Doncel R. y Barboza-Gudiño R., 2012. Damage assessment associated with land

- subsidence in the San Luis Potosi-Soledad de Graciano Sanchez metropolitan area, Mexico, elements for risk management. *Natural Hazards* 64. 751-765.
- Liu Y.L., Chen Z.L., Wang J., H B.B., Ye M.W. y Xu S.Y., 2012. Large-scale natural disaster risk scenario analysis: a case study of Wenzhou City, China. *Nat Hazards* 60.1287–1298.
- Pacheco J., Arzate J., Rojas E., Arroyo M., Yutsis V. y Ochoa G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, **84**, 143-160.
- Rodríguez-Castillo R. y Rodríguez-Velázquez I., 2006. Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **2**, 265-269.
- Yin Y., Zhang K. y Li X., 2006. Urbanization and land subsidence in China. IAEG, núm. 31. Sociedad Geológica de Londres. 1-5.
- Yi L.X., Wang J., Shao C.Q., Jia W.G., Jiang Y.X., Bo L., 2010. Land subsidence disaster survey and its economic loss assessment in Tianjin China. *Nat Hazards Rev* 11. 35–41.
- Zhang W.R. y Wang R.T., 2005. Risk evaluation of the economic losses induced by land subsidence in Shanghai from 2001 to 2020. *Adv in Water Sci* 16. 870–874.