

Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de Septiembre de 2017

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara-Durán, C., González-Hernández, M., Centeno-Salas, F.

*Laboratorio de Mecánica de Geosistemas, Centro de Geociencias, UNAM
Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
Centro de Evaluación del Riesgo Geológico (CERG), Iztapalapa*

Introducción

Como parte del desarrollo del proyecto de colaboración sobre el "*Análisis de la Vulnerabilidad Física a la Subsidencia y Agrietamiento en la Ciudad de México*" entre el Centro de Geociencias de la UNAM y el CENAPRED en el año 2017, se ha llevado a cabo la cartografía de las fracturas que afectan el territorio de la Ciudad de México y la evaluación del peligro que representan.

Se realizó un análisis de la distribución espacial de las zonas de mayor deformación y fracturamiento con las construcciones de mayor afectación y colapso durante el sismo de 1985 y con los edificios derrumbados a consecuencia del sismo que tuvo lugar en 19 de septiembre de 2017, de magnitud 7.1 y localizado en el límite estatal entre los estados Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos y a 120 km de la Ciudad de México (SSN, 2017).

Diagnóstico general sobre los procesos de subsidencia y fracturamiento en la CDMX

Desde mediados del siglo XX, cuando inició el fenómeno de subsidencia o hundimiento regional en la Ciudad de México, numerosos autores han estudiado sus efectos y los riesgos que implica para sus habitantes y se ha mostrado que a corto, mediano y largo plazo, la persistente subsidencia del terreno causa daños sobre construcciones e instalaciones poniendo en riesgo su estabilidad.

La subsidencia de la planicie lacustre en la Ciudad de México es un proceso que fue reportado por Gayol en 1925 considerando como su causa principal el aprovechamiento del acuífero para el abasto de agua de la población, aunque también puede ser considerado un fenómeno natural debido a la elevada compresibilidad de los sedimentos lacustres que rellenan la cuenca en donde se asienta la ciudad. La etapa crítica tuvo lugar en las décadas subsecuentes a 1950 como uno de los efectos del gran crecimiento demográfico de la Ciudad de México.

La subsidencia asociada a la extracción excesiva de agua subterránea se puede catalogar como un proceso destructivo para el entorno urbano con tres manifestaciones importantes (Santoyo Villa, et. al., 2005, Carreón Freyre et al., 2006; Cerca et al, 2012, Carreón Freyre et al., 2014; Hernández Espriú et al., 2014):

- el hundimiento de tipo regional; que distorsiona y desestabiliza a un enorme número de edificios y monumentos del patrimonio arquitectónico,
- el abatimiento del nivel del agua subterránea; con la consecuente reducción de la reserva hídrica,
- la contaminación del acuífero; con la infiltración de aguas negras o residuales provenientes de drenajes rotos, lixiviados de los rellenos de residuos sólidos sin protección.

De acuerdo con los límites reconstruidos del lago por González Aparicio (1968), se estima que al menos el 24% de la superficie actual de la CDMX corresponde con el lecho del antiguo Lago de México, la zona de mayor dinámica de hundimiento. Las delegaciones que presentan afectaciones parcial y/o completamente asociadas a la subsidencia son: *Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztacalco, Coyoacán, Iztapalapa, Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac*. Considerando la zona de transición entre el pie de monte y la planicie lacustre se puede incluir también una parte de la delegación *Milpa Alta*. Sin embargo cabe remarcar que solamente 5 de las 16 delegaciones de la CDMX presentan de manera explícita el hundimiento y fracturamiento dentro de su catálogo de riesgo geológico:

- El Atlas de la **Delegación Benito Juárez** contiene la traza de un sistema de fallas con dirección NE en la Sierra de las Cruces y que se supone continúan hacia la Sierra de Río Frío (De Cserna et al., 1988). En este documento se reporta subsidencia en algunas vialidades como: Filipinas y Santa Cruz, Eje Central y Cumbres, Irolo y Zacahuitzco además de Plutarco y Normandía al poniente de la Delegación.
- El Atlas de la **Delegación Iztapalapa**, hace referencia a problemas de hundimiento y fracturamiento uno o dos años posteriores a 1957 en la periferia del Peñón del Marqués, al inicio de la primera etapa de bombeo en la zona oriente del Valle de México. En Iztapalapa se inició el proceso de subsidencia cuando se trasladó la extracción de agua subterránea a la zona oriente del entonces Distrito Federal, en la década de 1970. Se reportaron fracturas asociadas a subsidencia en el flanco suroeste del Peñón y en 1982 se documentó el fracturamiento en las cercanías de la avenida Ermita Iztapalapa. Desde 1980 distintos autores iniciaron estudios cartográficos y de ingeniería geológica sobre fracturas en zonas localizadas de la Delegación Iztapalapa (Ovando-Shelley et al., 2012). A partir del inicio de los trabajos del *Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG)*, Iztapalapa se ha convertido en la zona más estudiada en cuanto al fenómeno de subsidencia y fracturamiento del subsuelo (Carreón Freyre et al., 2008). No existe un registro

histórico completo del hundimiento en la zona, pero se han reportado desplazamientos superiores a los 3 metros en los 20 años anteriores a 2011, por lo que en los sitios críticos se ha estimado una velocidad de 15 cm anuales (Carreón-Freyre et al., 2014). Por medio de estudios InSAR (López-Quiroz et al., 2009; Cabral-Cano et al., 2011) se ha determinado que el hundimiento más importante de la Ciudad de México, en el periodo 2002-2010, se encuentra en la zona norte de la Delegación Iztapalapa y el municipio de Nezahualcóyotl y alcanza los 40 cm por año.

- En el Atlas de Riesgos de la *Delegación Miguel Hidalgo*, se menciona que las porciones noreste y sureste de la delegación corresponden a sedimentos lacustres altamente compresibles interestratificados con capas de arena y delimitan esas zonas como susceptibles al hundimiento y fracturamiento.
- En el Atlas de la *Delegación Milpa Alta* se menciona que ésta se encuentra en la zona de transición lacustre, donde se presentan daños importante asociados a fenómenos de hundimiento y fracturamiento en su extremo noreste. El poblado de San Antonio Tecómitl presenta hundimientos con desarrollo y propagación de fracturas en las unidades habitacionales cercanas a la zona, en la calle Vicente Guerrero. El fenómeno ha ido en aumento durante los últimos diez años en el deportivo de la misma localidad. El tramo carretero entre los poblados de San Bartolomé Xicomulco y San Pedro Actopán también ha presentado evidencias de hundimiento y fracturamiento.
- De acuerdo con el Atlas de Riesgos de la *Delegación Tlalpan*, el territorio susceptible a hundimientos diferenciales se encuentra en la porción noreste, en la zona de Coapa y colindante con las delegaciones Coyoacán y Xochimilco. El fracturamiento del subsuelo ha generado daños a todo tipo de construcciones e infraestructura entre las que se cuentan tuberías hidráulicas, banquetas y pavimentos. El riesgo para el fenómeno de hundimientos, en relación con su frecuencia y afectación, es clasificado como medio.

En el mapa de subsidencia media calculado entre el final del año 2002 y el inicio de 2007 se observa que los máximos valores de subsidencia alcanzan los 39 cm/año en Nezahualcoyotl y alrededor de 32 cm/año en Tláhuac (López-Quiroz et al., 2009; Cerca et al., 2012). Los patrones espaciales de subsidencia se han mantenido casi constantes en toda la serie de tiempo. La contribución de la compactación diferencial es evidente en los flancos de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin. La deformación del terreno es irregular controlada principalmente por el espesor de la secuencia arcillosa y la interestratificación de rocas volcánicas. Las rocas volcánicas incluyen lavas y cenizas asociadas a los edificios volcánicos de las Sierras de Guadalupe, Santa Catarina, de las Cruces y Ajusco-Chichinautzin, además de algunos edificios volcánicos más pequeños ubicados en la zona central del valle como el Peñón del Marqués y el Peñón de los Baños.

Los patrones espaciales de subsidencia en la Ciudad de México muestran un marcado control estructural provocado por la presencia de fallas regionales que afectan a la cuenca. En la zona poniente de la Ciudad el fracturamiento superficial más intenso se encuentra confinado a una estructura en forma de graben delimitada entre la falla normal Mixhuca (MI, Pérez-Cruz, 1998; González-Torres et al., 2015), con orientación NNW-SSE e inclinación al poniente que cruza el centro de la Ciudad de México; y la Falla Normal Copilco, propuesta en este reporte, que tiene una orientación NNW-SSE con inclinación al oriente. Esta falla (CO) delimita las zonas de deformación y el fracturamiento observados en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez y Coyoacán. Además se encuentra definida por la alineación epicentral de 12 sismos en el borde oriental de la Sierra de Las Cruces (Lermo et al., 2016). No existen datos geológicos sobre la geometría y desplazamiento a profundidad de la Falla Copilco pero se infiere por el alineamiento de los patrones de deformación. La falla Mixhuca fue definida por medio de la interpretación de los pozos profundos de PEMEX perforados posterior al terremoto de 1985.

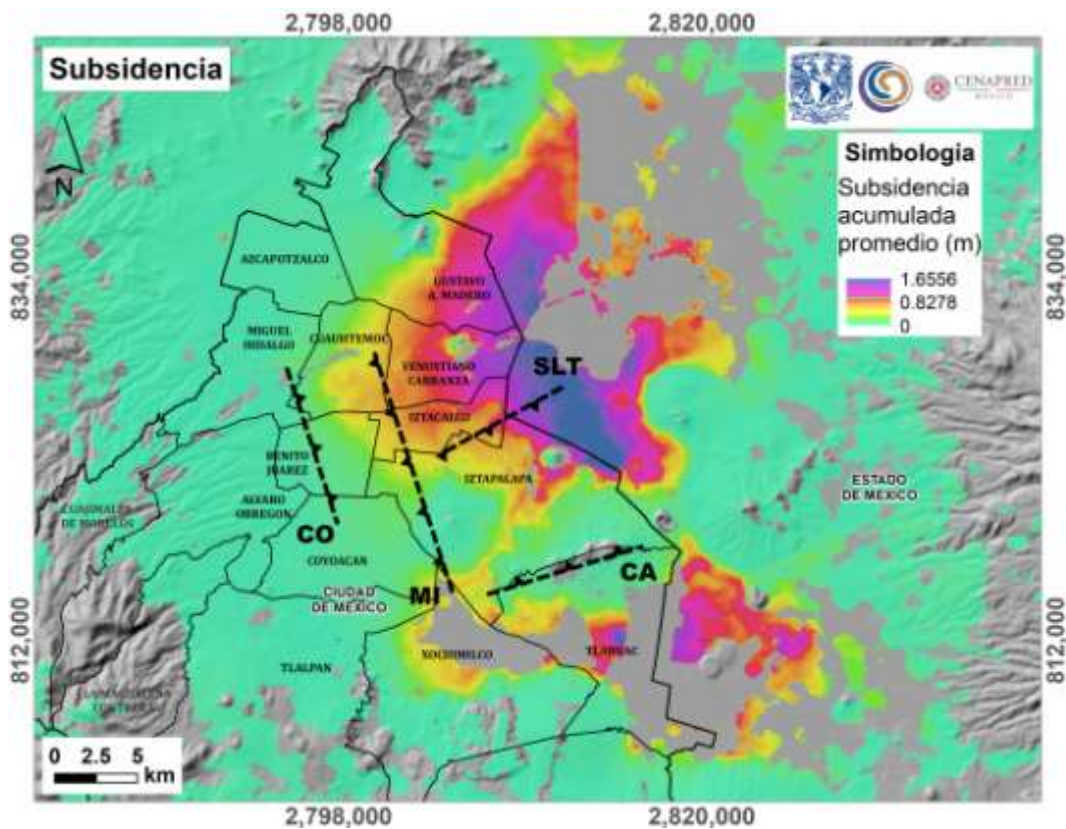


Figura 1. Mapa de promedio de subsidencia acumulada de la Ciudad de México mediante interferometría de radar (InSAR) para el periodo 2002-2007. En la figura se muestran las principales fallas regionales que afectan a la Ciudad: (MI) Mixhuca; (CO) Copilco; (CA) Santa Catarina; (SLT) San Lorenzo Tezonco. Las primeras dos fallas definen el graben de La Roma, mientras que las últimas definen el graben de Santa Catarina. Se muestran los límites de las zonas lacustre (L) y aluvial (A). Para las referencias de cada estructura revisar el texto.

En la zona oriente el control de los patrones espaciales de la subsidencia está influenciado por la presencia de las fallas que conforman el graben de Santa Catarina, definido por Arce et al. (2013), que se confirmaron a partir de la perforación del Pozo profundo de San Lorenzo Tezonco. En la parte sur el graben se encuentra delimitado por una falla ENE-WSW alineada con la Sierra de Santa Catarina y con inclinación al norte. En la parte Norte, se encuentra delimitado por una falla con orientación ENE-WSW con inclinación al sur que se identificó por la correlación entre los pozos profundos Mixhuca y San Lorenzo Tezonco (Arce et al., 2013).

Durante el desarrollo de diferentes proyectos de investigación en el Centro de Geociencias, con apoyo del Centro de Evaluación del Riesgo Geológico de Iztapalapa y actualmente con el CENAPRED, se ha llevado a cabo la actualización de la cartografía en campo a escala 1:20,000 del fracturamiento del subsuelo en la Ciudad de México. Este levantamiento ha consistido en documentar la información geométrica básica de las fracturas como: orientación e inclinación, desplazamiento vertical, área de influencia y litología. El levantamiento de campo se apoya con datos GPS, orientaciones y mediciones con cinta métrica y levantamiento topográfico con estación total. Además, se compilaron las trazas superficiales de fracturamiento y puntos de hundimientos diferenciales documentadas en trabajos previos.

La información obtenida se ha vertido en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Además del levantamiento de campo se llevó a cabo el análisis morfométrico del terreno con imágenes LIDAR para la delimitación de las tres principales unidades del relieve: zona de montaña, zona de piedemonte y planicie lacustre. La cartografía integrada es presentada en el mapa de la Figura 2, ésta no incluye fracturas debidas a fallas estructurales en la infraestructura urbana (fallas de cimentación, efectos de raíces, cambios térmicos en el asfalto, drenaje, etc.).

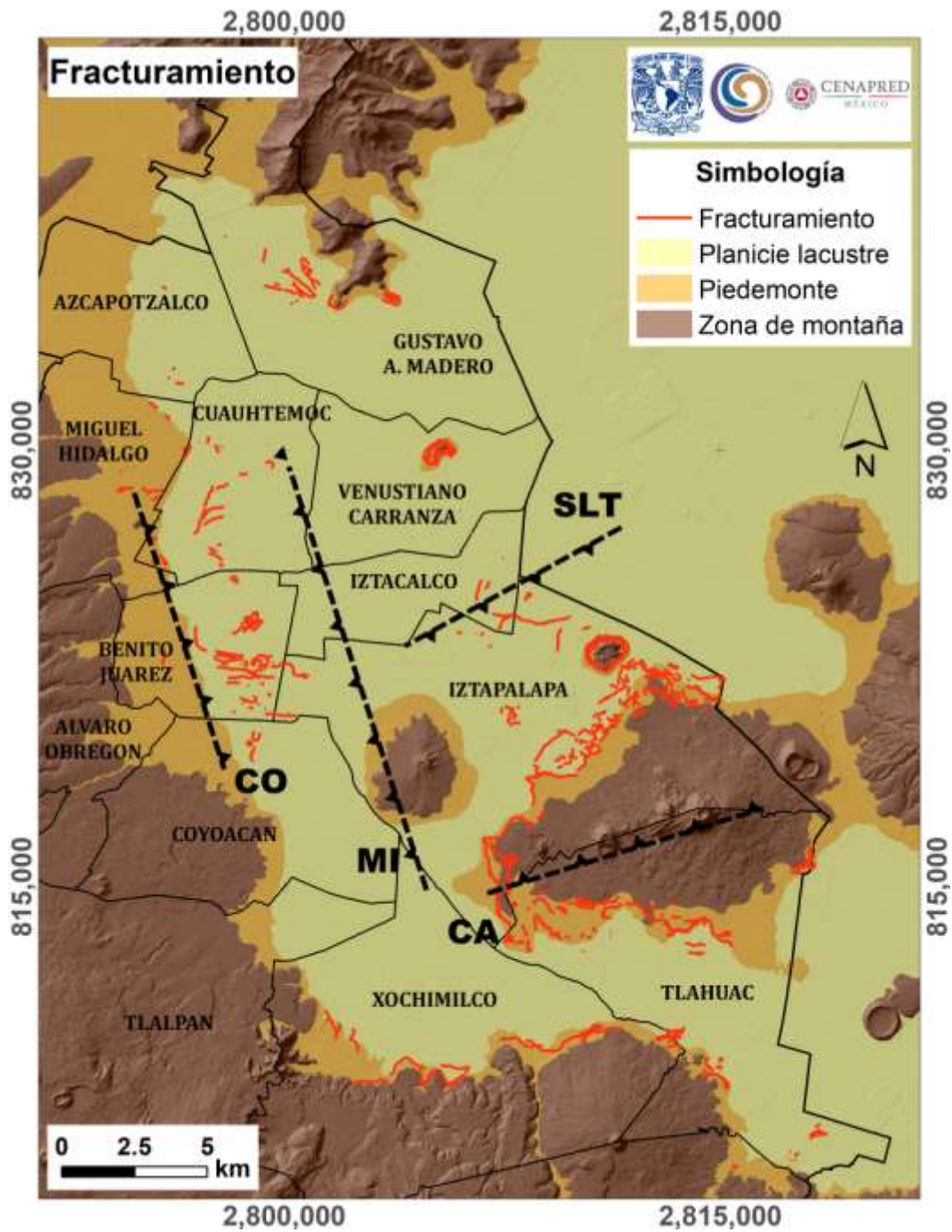


Figura 2. Mapa de las fracturas que afectan el territorio de la Ciudad de México elaborado por el Centro de Geociencias de la UNAM. Se muestra el relieve de la ciudad y las fallas geológicas regionales.

Como se puede observar en las figuras anteriores, los patrones de deformación y fracturamiento en la Ciudad de México están determinados por estructuras regionales, contactos litológicos y cambios en la morfológica del terreno. Aún cuando los materiales

del subsuelo tiene una alta heterogeneidad en su comportamiento mecánico, y por ende distinta respuesta a la propagación de ondas sísmicas, el trabajo desarrollado permite inferir que existen otros factores que condicionan la respuesta del terreno, como es la presencia de fracturas o fallamiento preexistentes. Esto se evidencia al comparar la distribución de las construcciones que sufrieron daños severos y colapso durante los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017.

Relación entre construcciones dañadas por sismos y patrones de fracturamiento y fallamiento

Los efectos combinados de la subsidencia regional y los terremotos pueden incrementar la vulnerabilidad de la infraestructura urbana en la CDMX (Cerca et al., 2012). En la Figura 3 se muestra el mapa de fracturamiento y lineamientos regionales sobrepuesto al mapa de gradiente de subsidencia para los años entre 2002 y 2007. El gradiente de subsidencia indica donde ocurre la deformación diferencial mayor. Generalmente se encuentran asociados con el desarrollo de fracturas en el terreno, las cuales son la separación de planos por el rompimiento de los materiales geológicos. Las primeras fracturas que afectan la secuencia arcillosa de la Ciudad de México son consecuencia de la desecación progresiva del lago (grietas de desecación); posteriormente la continua extracción del agua subterránea ha originado un desequilibrio en la presión de poro de todo el relleno sedimentario de la cuenca y en consecuencia la deformación de los materiales que al darse de manera diferencial origina fracturas que se propagan progresivamente del subsuelo hacia la superficie.

En la Figura 3 se muestra la cartografía de las fracturas (líneas solidas color rojo claro) y las fallas normales (líneas discontinuas de color rojo oscuro) reportadas previamente como la Falla Mixhuca (MI), la Falla Santa Catarina (CA), la falla San Lorenzo Tezonco (SLT) y la Falla Copilco (CO) reportada en este trabajo. Los gradientes de deformación y las fallas definen tres zonas: una franja Norte-Sur en el centro de la ciudad, que comprende gran parte de las delegaciones Cuauhtémoc y Benito Juárez con fracturas de orientación variable, una zona al sur de la Falla SLT que comprende gran parte de la delegación Iztapalapa y parte de Tláhuac y Xochimilco en donde el fracturamiento se localiza alrededor de la estructuras volcánicas, y una zona de menor fracturamiento hacia el norte de la falla SLT en la delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y norte de Iztacalco.

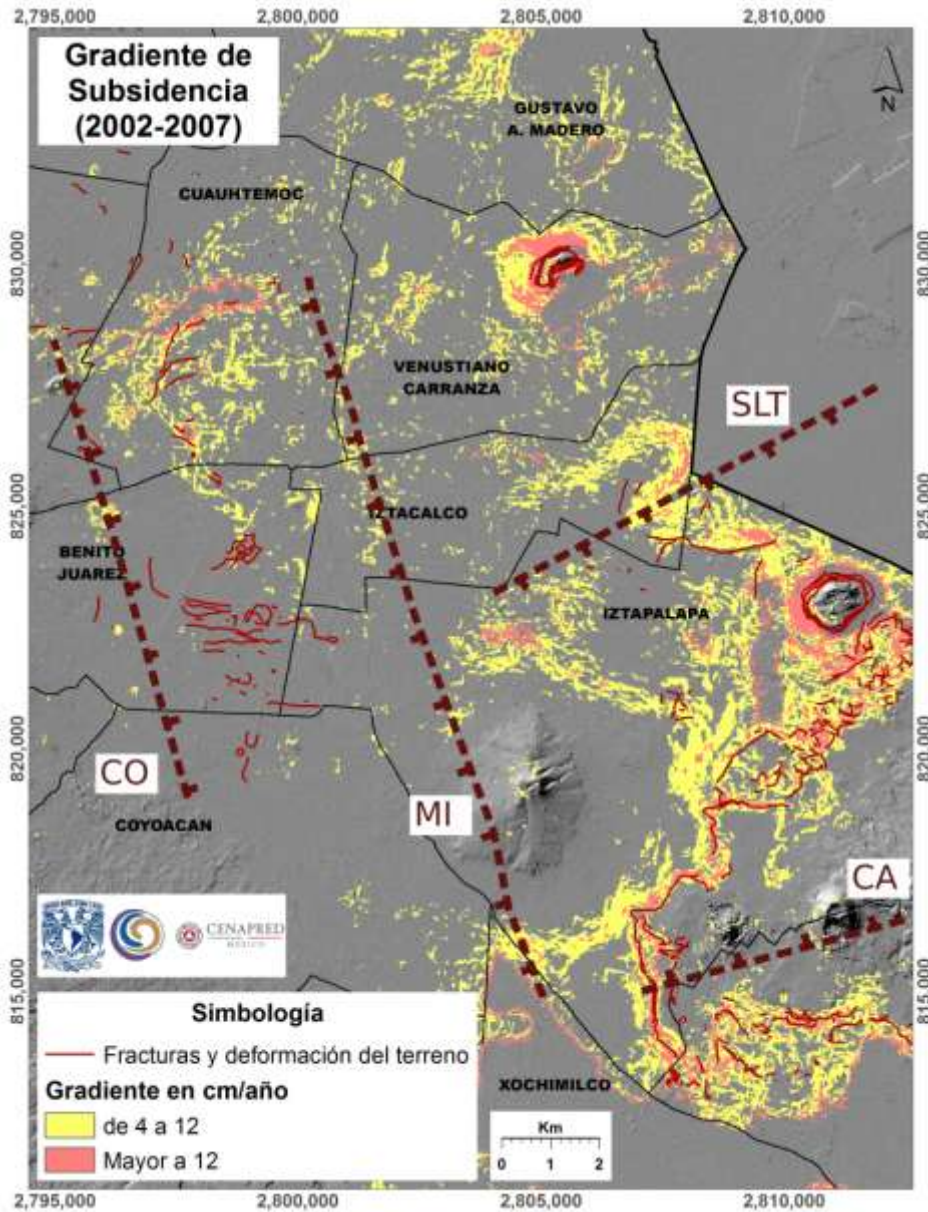


Figura 3. Gradiente de subsidencia en la Ciudad de México entre 2002 y 2007 con la cartografía del fracturamiento y las fallas regionales principales

En la Figura 4 se muestra el mapa de gradiente de subsidencia para el periodo de 2002 a 2007 con el mapa de fracturamiento y se proyectaron: (a) la ubicación de los edificios que colapsaron durante el sismo del 19 de Septiembre de 1985, obtenidos de Tovar de Teresa (1992) y (b) la ubicación de los edificios que colapsaron durante el sismo del 19 de Septiembre de 2017, tomada de la base de datos preliminar del mapa colaborativo 19s de Google (consultado el 21 de septiembre https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1_V97lbdgLFHpx-CtqhLWIJAnYY&usp=sharing).

La respuesta sísmica de la cuenca de México está condicionada fuertemente por la presencia de fallas regionales y fracturas provocadas por la subsidencia del terreno. Se observa que la distribución de edificios colapsados en 1985 coincide con la zona de mayor gradiente de subsidencia en el periodo 2002-2007 en la parte central-norte de la ciudad. Otro grupo de edificios colapsados se encuentran distribuidos dentro de la misma zona pero hacia el sur. Estos últimos muestran una coincidencia importante con los edificios reportados hasta ahora para el sismo de 2017. Los que muestra una relación especial importante con las zonas de fracturamiento en la franja norte-sur del centro de la ciudad.

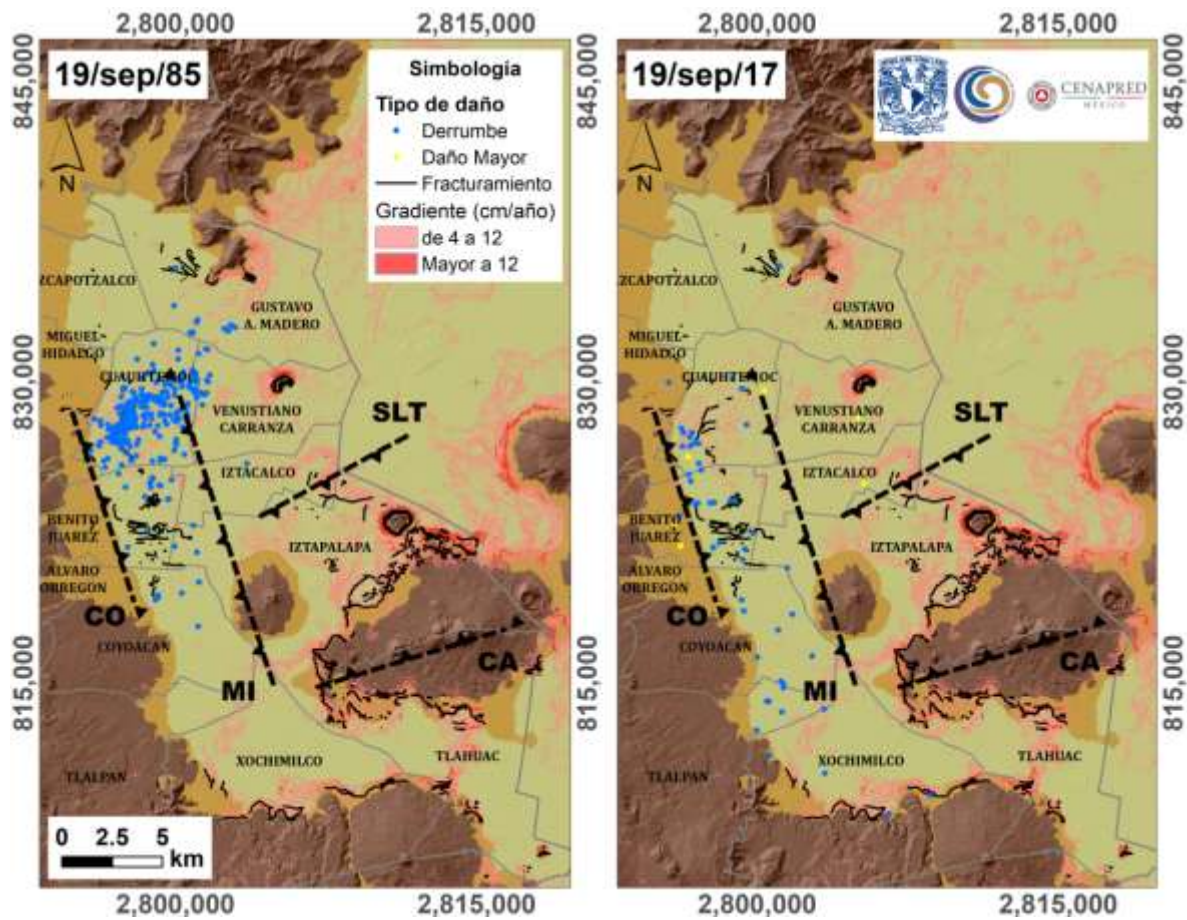


Figura 4. Mapa que muestra la relación espacial entre las fracturas y fallas con la distribución de edificios colapsados en los sismos del 19 de Septiembre de 1985 y de 2017. Información tomada del trabajo de Tovar de Teresa de 1992 y del mapa colaborativo 19s de Google (https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1_-V97lbdgLFHpx-CtqhLWIJAnYY&usp=sharing).

Existen diferencias importantes entre los patrones de afectación del sismo de 1985 y del de 2017, la más importante es que esta vez los daños parecen ser menor intensidad. En la parte oriental de la ciudad, particularmente en la Delegación Iztapalapa, personal del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG) ha reportado el desplazamiento vertical de fracturas durante el sismo; en la Figura 5 se muestran fotografías que documentan la magnitud del desplazamiento. Se han reportado también daños en cientos de casas unifamiliares y multifamiliares, principalmente en colonias populares con edificaciones de autoconstrucción. Tan solo en la delegación Iztapalapa hay aproximadamente 300 viviendas dañadas. Esto aumenta considerablemente las pérdidas económicas que, en vez de concentrarse con el colapso de grandes edificios en 1985, están diseminadas por toda la ciudad lo que incrementará los costos de recuperación. El daño reportado a la infraestructura urbana (calles y líneas de conducción) en el sismo reciente es mayor.



Figura 5. Panel de fotos de fracturas y edificios afectados en la zona oriente de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de Septiembre de 2017: (a) Calle Piraña; (b) Calzada de la Viga; (c) Col. La Planta; (d) Santa María Aztahuacán; (e y f) Calle Cuauhtémoc, Santa María Aztahuacán.

Durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 tuvo lugar el desplazamiento vertical de fracturas de manera distribuida en la zona oriental de la ciudad, lo que confirma la relevancia de considerar estas discontinuidades para la evaluación del daño causado. En la figura 6 se muestra el desplazamiento vertical de una fractura ubicada hacia el sur de la Delegación Iztapalapa y que era monitoreada por una Estación de Medición de Deformación Superficial (EMDS) a cargo del CERG. En esta estación se registro un desplazamiento total de 95 cm.



Figura 6. Estación de monitoreo de La Planta en la parte suroeste de la Delegación Iztapalapa. El desplazamiento vertical de 95 cm fue registrado en la fractura durante el sismo del 19 de Septiembre de 2017.

Referencias

- Arce, J.L., Layer, P.W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O., 2013a, New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34–49.
- Cabral-Cano E., Díaz Molina O. y Delgado-Granados H. (2011) Subsistencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 63, núm. 1, 2011, p. 53-60.
- Carreón-Freyre D.C., Hidalgo-Moreno C.M. y Hernández-Marín M. (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, número especial de geología urbana, tomo LVIII, núm. 2, 2006, p. 237-250.
- Carreón Freyre, D., Gutiérrez Calderón, R., González Hernández, M., Cerca Martínez, M., Zacarias Ramírez, S., 2014. Capítulo 4. Subsistencia - Una amenaza de origen natural y antropogénica poco conocida - ejemplos de México. pp. 133-143. Ed. Theofilos Toulkeridis. *Amenazas de origen natural y Gestión de Riesgo en el Ecuador. Tomo I. Algunos Elementos fundamentales en el Manejo de Reducción de Riesgo de Desastres. Publicado por el Centro de Geología, Volcanología y Geodinámica (CGVG)-GEO1 de la ESPE, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador. 285 p. ISBN: 978-9942-20-688-6*
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D., López-Quiroz, P., Ovando-Shelley, E., Doin, M.P., Gutierrez-Calderón, R., González-Hernández, M., Jimenez-Sánchez, A., and Blancas-Dominguez, D., 2012, Engineering geology approach to the effects of land subsidence in Mexico City, in Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., and Molina-Garza, R.S., eds., *The Southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide 25*, p. 115–134, doi:10.1130/2012.0025(06).
- de Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., 1988, Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p.
- Flores-Estrella, H., Yussim, S. y Lomnitz. 2007. Seismic response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research, *C. Nat Hazards* 40: 357. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0034-6>
- Gayol, R., 1925, Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos. *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, III, 96–132.
- González Aparicio, L., Najera Zamora, M., 1968. Plano reconstructivo de la región de Tenochtitlan al comienzo de la conquista. Dirección de Geografía y Met. (Mexico).
- González-Torres, E. A., Morán-Zenteno., D. J., Mori., L., y Martiny, B. 2015. Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67, 2, 2015, 285-297
- Hernández-Espriú J.A. (2013). Modelo DRASTIC-Sg: una nueva herramienta para mejorar la gestión del acuífero de la Ciudad de México. *Academia de Ingeniería*. p. 1-41.

- Lermo, J., Santoyo, M.A, Jaimes, M.A., Antayhua, Y., Chavacán, M., 2016. Local Earthquakes of the Mexico Basin in Mexico City: κ , Q, Source Spectra, and Stress Drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (4): 1423–1437, doi: 10.1785/0120150189
- López-Quiroz, P., Doin, M.P., Tupin, F., Briole, P., and Nicolas, J.M., 2009, Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry: *Journal of Applied Geophysics*, v. 69, p. 1–15, doi:10.1016/j.jappgeo.2009.02.006
- Mapa colaborativo 19s de Google (consultado el 21 de septiembre https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1_-V97lbdgLFHpx-CtqhLWIJAnYY&usp=sharing).
- Ovando-Shelley, E., Lermo-Samaniego, J., Auvinet, G. and Méndez-Sánchez, E., 2012. Microtremor measurements to identify zones of potential fissuring in the basin of Mexico. *Geofísica Internacional* 51-2:143-156.
- Pérez-Cruz, G.A., 1988, Estudio sismológico de re exión del subsuelo de la Ciudad de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, 83 p.
- Santoyo Rivera E. et al., 2005. Síntesis geotécnica de la Cuenca de México. TGC-Geotécnica, D.F. México.
- Tovar de Teresa, G., 1992. La ciudad de los palacios: crónica de un patrimonio perdido, Volume 1. Ed. Vuelta. 191 pp.