

ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS SÚBITOS POR SISMO Y SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO, POR MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES

*Alberto Jaime P⁽¹⁾, Gaspar Alcocer⁽¹⁾,
Josefina Barrera González⁽¹⁾ y Juan S. Sanabria Pérez⁽²⁾*

RESUMEN

Se estudian el hundimiento regional (subsistencia) y los asentamientos súbitos causados por sismo en el suelo de la Ciudad de México, mediante la técnica de Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR) que utiliza imágenes satelitales. Se resumen investigaciones previas desarrolladas en la Ciudad de México sobre este fenómeno. Se presenta de manera breve el método para la obtención de asentamientos relativos mediante DInSAR. Además, se presentan los resultados de algunos perfiles de hundimientos obtenidos para el año 2016 y los meses comprendidos entre agosto y noviembre de 2017 en el centro histórico de la Ciudad de México y en la Zona del Volcán Xico. También se estiman los asentamientos súbitos provocados por los sismos de septiembre de 2017. El asentamiento regional de la Ciudad de México determinado con imágenes satelitales se hace en un tiempo breve y a un costo bajo. Al comparar los asentamientos medidos con los métodos topográficos tradicionales, se verificó que son similares.

Palabras clave: subsistencia; asentamiento súbito por sismo; imágenes satelitales; DInSAR; Interferometría

GROUND SUBSIDENCE AND EARTHQUAKE INDUCED SETTLEMENTS IN MEXICO CITY, USING SATELLITE IMAGERY

ABSTRACT

The land subsidence and the sudden settlements induced by earthquakes in Mexico City subsoil are determined with Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR), which uses satellite images. Some previous studies about this phenomenon in Mexico City are summarized. As well as the methodology DInSAR, used for determining the relative settlements. Moreover, the results of some profiles of relative settlement for year 2016 are presented, and for the months between August and November 2017 in Mexico City Downtown and the Xico Volcano Area. In addition, the sudden settlements induced by the September 2017 earthquakes are calculated. The annual regional settlement in Mexico City, determined with the use of satellite images, is made in a brief period of

Artículo recibido el 16 de 06 de 2021 y aprobado para su publicación el 27 de 02 de 2022. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. ajaimep@iingen.unam.mx, galcocerg@iingen.unam.mx, jbarrerag@iingen.unam.mx

⁽²⁾ Estudiante de Doctorado Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F. juan.sanabria@comunidad.unam.mx

time and at low cost. The results are in very good agreement, when compared with those obtained from traditional surveying methods.

Keywords: land subsidence; sudden seismic induced settlement; satellite imagery; DInSAR; Interferometry

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En la Ciudad de México, la subsidencia ha ocasionado diversos daños a edificios, a los sistemas de abastecimiento de agua y de drenaje, al sistema de transporte colectivo, calles y vialidades, entre otras estructuras. La medición de las tasas de hundimiento en las diferentes zonas de la ciudad de México permite la evaluación del comportamiento de las diversas estructuras que pueden ser afectadas. Este control se ha hecho con procedimientos topográficos convencionales. Tanto la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, la Comisión Nacional del Agua, la Gerencia de Aguas del Valle de México (actualmente Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México) y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) hicieron las nivelaciones topográficas en diferentes periodos de tiempo, hasta la fecha. Esto implica costos importantes y tiempos de ejecución largos. Por medio de imágenes satelitales puede hacerse este control menos oneroso y en tiempos cortos.

Asimismo, el Valle de México se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad. Los sismos que causaron afectación ocurrieron en los años 1957, 1985, y, recientemente, los de 2017. Estos cuentan con registros. Estos sismos dañaron edificios, tuberías del sistema de agua potable, calles y otras estructuras de los servicios municipales.

Objetivo

Emplear imágenes satelitales interpretadas por medio de la técnica DInSAR para estimar el hundimiento regional en la Ciudad de México; así como, asentamientos provocados por sismos.

Alcances

Este artículo aborda la subsidencia de la Ciudad de México provocada por la explotación de los acuíferos para abastecimiento de agua potable de la propia ciudad. Por medio de la técnica DInSAR, se determinan las tasas de hundimiento en varias zonas de la ciudad y se comparan con las determinadas por medio de la topografía convencional a través de bancos de nivel, mediciones e información publicada de los asentamientos de la Ciudad de México. Se exponen los principios básicos y la metodología del procesamiento de imágenes satelitales. También, se determina el hundimiento súbito provocado por los sismos de septiembre de 2017.

HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La subsidencia de la ciudad de México fue estudiada a fines del siglo XIX por Téllez Pizarro en 1899, Roberto Gayol en 1925 y por José A. Cuevas entre los años 1920-30 (citado por Hiriart y Marsal, 1969, figs. 2 y 3; Zeevaert, 1983). Nabor Carrillo (1947) a solicitud de José A. Cuevas, realizó el estudio del hundimiento empleando técnicas de la naciente mecánica de suelos y señaló como su causa la consolidación

de las arcillas debido a incrementos de esfuerzos efectivos provocados por la extracción de agua para abastecimiento de la ciudad, fig. 1 (Jaime, 1988).

Además del hundimiento de la ciudad, se observa que la extracción del agua del suelo da lugar a la formación de grietas y fisuras verticales en los estratos de arcilla que conforman la parte más superficial del perfil de suelos del valle de México. Estos estratos arcillosos se encogen de manera diferencial. Evidencias de estas grietas se encuentran superficialmente en el lago de Texcoco, Ecatepec, colonia Roma, Coapa, Tláhuac, Xochimilco, Iztapalapa, etc. También, sistemáticamente, en las muestras inalteradas del subsuelo se observa agrietamiento o, bien, en los registros de campo de sondeos geotécnicos se informa de pérdida de lodos. También, es frecuente que se presenten grietas en los límites del antiguo lago con las sierras y los volcanes que se encuentran en el Valle de México. Estos efectos han sido estudiados por varios autores como Juárez-Badillo (1961), Marsal y Mazari (1969, 1990), Figueroa (1976), Zeevaert (1983) y Auvinet *et al.* (2021).

Debido a lo anterior, se puede decir que las propiedades de la arcilla del Valle están en constante evolución (de los estratos profundos hacia la superficie) en lo que se refiere a contenido de agua, resistencia al esfuerzo cortante, compresibilidad y características dinámicas, Jaime (1988), Ovando *et al.* (2007), Aguilar (2008) y Mayoral *et al.* (2019). Además, Ovando *et al.* (2013) discuten el daño que ha provocado los asentamientos diferenciales por subsidencia y por el cambio de las propiedades del suelo en monumentos históricos de la Ciudad de México y los mismos se acrecientan cuando ocurren sismos.

El impacto más importante del hundimiento de la ciudad ocurre en las cimentaciones. Así, en cimentaciones parcial o totalmente compensadas, el abatimiento de la presión de poro más los esfuerzos inducidos por la cimentación provocan que se exceda la presión de preconsolidación de la arcilla. Por tanto, pasa a trabajar en la rama virgen de la curva de compresibilidad, con el consecuente incremento de deformaciones verticales.

Las investigaciones más sistemáticas para identificar y evaluar la subsidencia fueron iniciadas por Carrillo en el año 1945, mediante el empleo de piezómetros y bancos de nivel. Posteriormente, Marsal, Hiriart y Sandoval (1952), y Marsal y Mazari (1969) continuaron con estos estudios. Diversos autores como D. Reséndiz *et al.* (1970), G. Figueroa (1976, 1990), F. Nader y R. Morales (1978), R. Murillo y G. García (1978), A. Ortega-Guerrero *et al.* (1999), E. Ovando *et al.* (2001), E. Santoyo *et al.* (2005), y G. Auvinet *et al.* (2017), han estudiado el hundimiento regional de la Ciudad y el Valle de México y sus efectos en las edificaciones y en los servicios municipales. También, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica ha hecho reuniones y simposios especializados en el tema en los años 1970, 1978, 1990, 1991 y recientes. Cabral-Cano *et al.* (2008), Osmanoglu *et al.* (2011) y Jaime *et al.* (2021) han estudiado la subsidencia en la ciudad de México a partir de imágenes satelitales.

Diferentes investigaciones han demostrado que los sismos provocan asentamientos súbitos y aceleran y propician la aparición de grietas en la superficie. Marsal y Mazari (1969), identificaron estos asentamientos provocados por el sismo de julio de 1957 en diversas construcciones. Posteriormente, Zeevaert (1983) y Jaime *et al.* (1987) documentaron la ocurrencia de asentamientos súbitos del suelo después de un sismo. Jaime *et al.* (2020) estimaron los asentamientos provocados por sismo con el uso de imágenes satelitales.

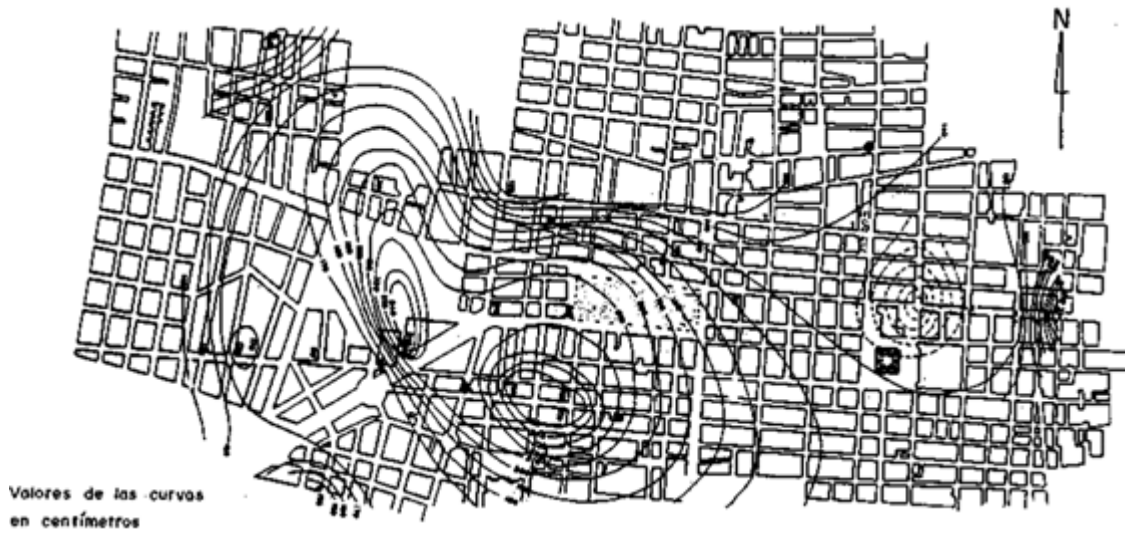


Figura 1. Asentamientos de la Ciudad de México en el periodo de 1897-1938 (Carrillo, 1947)

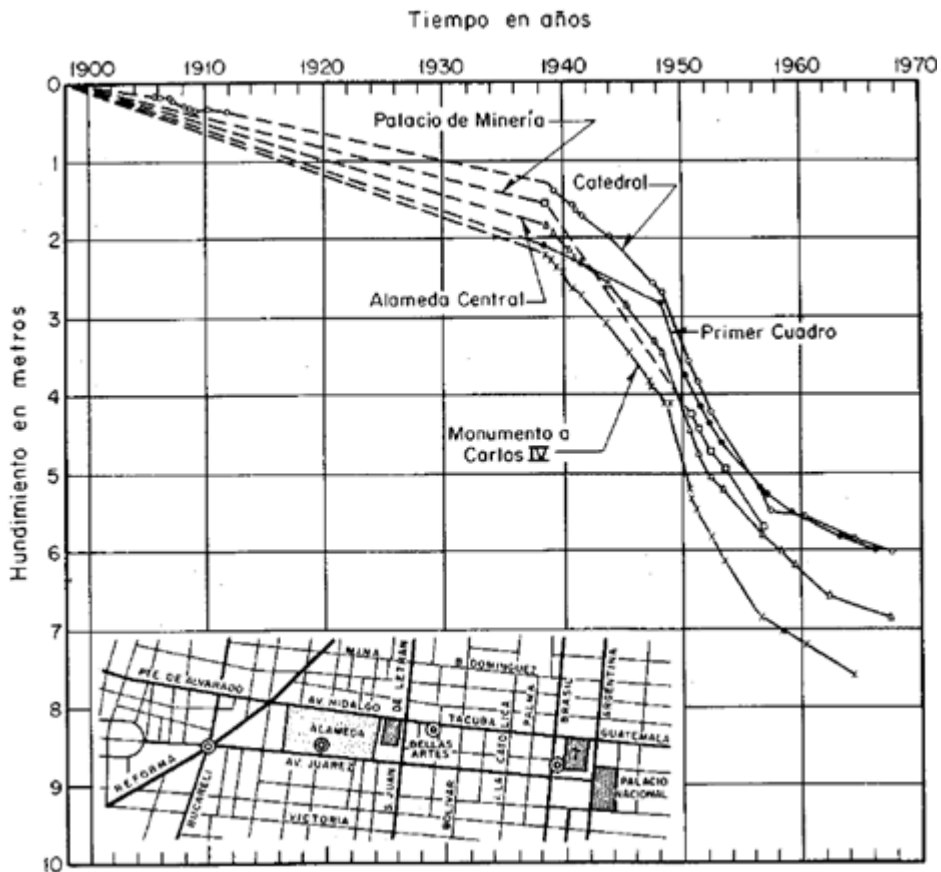


Figura 2. Nivelación de monumentos de la Ciudad de México en el periodo de 1898-1966 (Hiriart y Marsal, 1969)

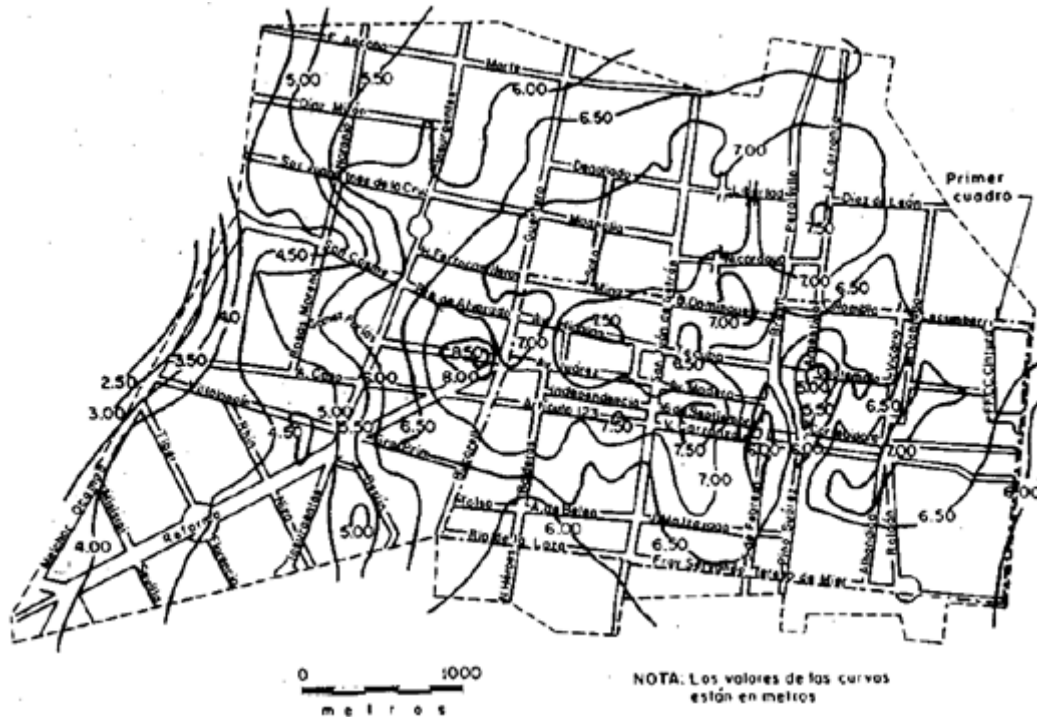


Figura 3. Asentamientos de la Ciudad de México en el periodo de 1891-1966 (Hiriart y Marsal, 1969)

Zeevaert (1983) describe el caso de un edificio con cimentación parcialmente compensada, el cual sufrió un asentamiento brusco después del sismo de 1957 y un incremento en su tasa de hundimiento (fig. 4). Zeevaert indica que los esfuerzos cortantes estáticos más los esfuerzos cortantes dinámicos inducidos durante el sismo de julio de 1957 alcanzaron la resistencia última al corte del depósito de arcilla limosa. Por tanto, ocurrió daño parcial en la estructura del suelo, dando como resultado un incremento en la compresibilidad del material que produjo el fenómeno de consolidación observado.

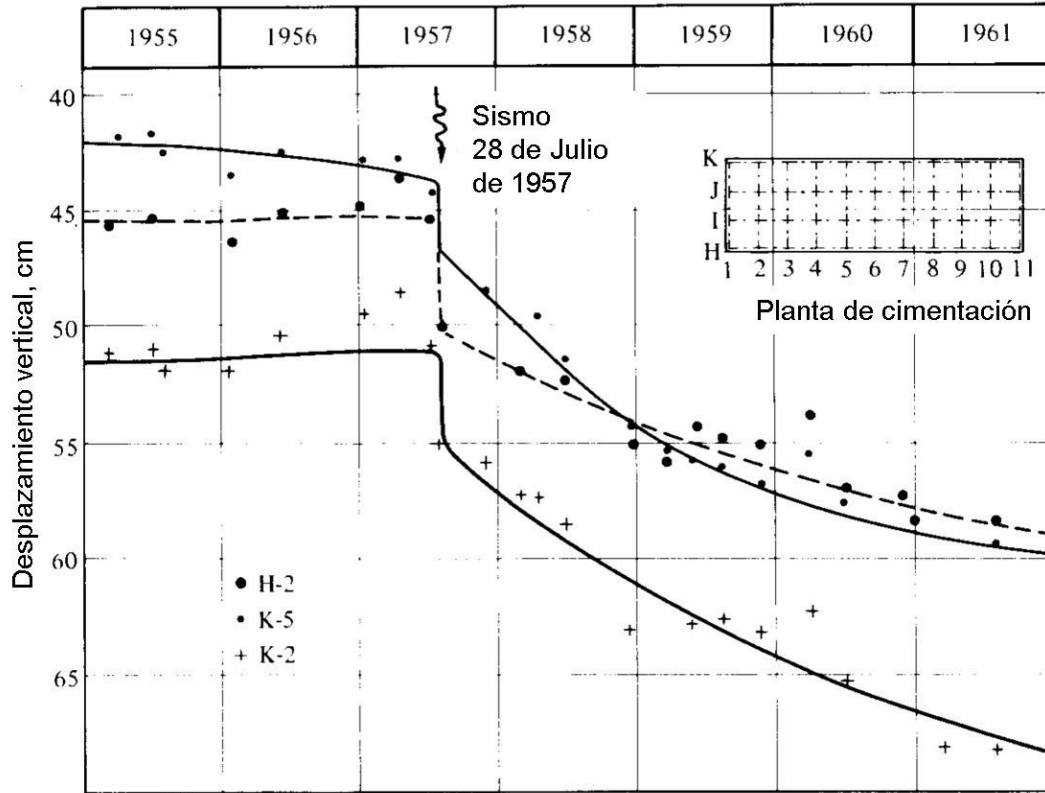


Figura 4. Sismo de 1957 de la Ciudad de México, efecto en el asentamiento de un edificio (Zeevaert, 1983)

Jaime *et al.* (1987) estudiaban los asentamientos de un edificio pesado de cuatro niveles en la colonia Roma de la Ciudad de México. La estructura fue construida en 1982 y presentó asentamientos de 18-24 cm en un periodo de 32 meses, que causó daño a una estructura ligera adyacente. Por esta razón, se realizaron levantamientos topográficos periódicos y se colocaron varios bancos de nivel alrededor del edificio y la manzana en la que se localizaba, fig. 5. El sitio del edificio se encontraba frente a un pequeño parque; el banco de nivel de referencia se instaló en la parte central de éste. En este parque no había influencia de otras estructuras; aunque el banco de nivel de referencia no era estrictamente un punto fijo, debido a que lo afectaba la subsidencia regional de la ciudad de México, este efecto también se presentaba en el edificio y la manzana completa en estudio, por tanto, su efecto se anula.

El asentamiento a lo largo del tiempo de unos puntos típicos se muestra en la fig. 6. De mayo a septiembre de 1985, la velocidad de asentamiento de la estructura y la manzana fue de 4.5 cm/año y cero, respectivamente. Después de los sismos de septiembre, las curvas asentamiento-tiempo muestran un movimiento vertical abrupto de la estructura de 2.2 cm, en promedio. La siguiente nivelación después del sismo, se realizó en octubre, cuando ya había acceso al lugar. El levantamiento topográfico de los puntos de control del asentamiento alrededor de la manzana claramente muestra que la manzana completa se hundió entre 0.1 y 2.8 cm con respecto al punto de referencia. Durante los siguientes meses hasta 1986, la velocidad de los movimientos verticales de la estructura fue el mismo que era antes del sismo y los movimientos de la manzana cesaron.

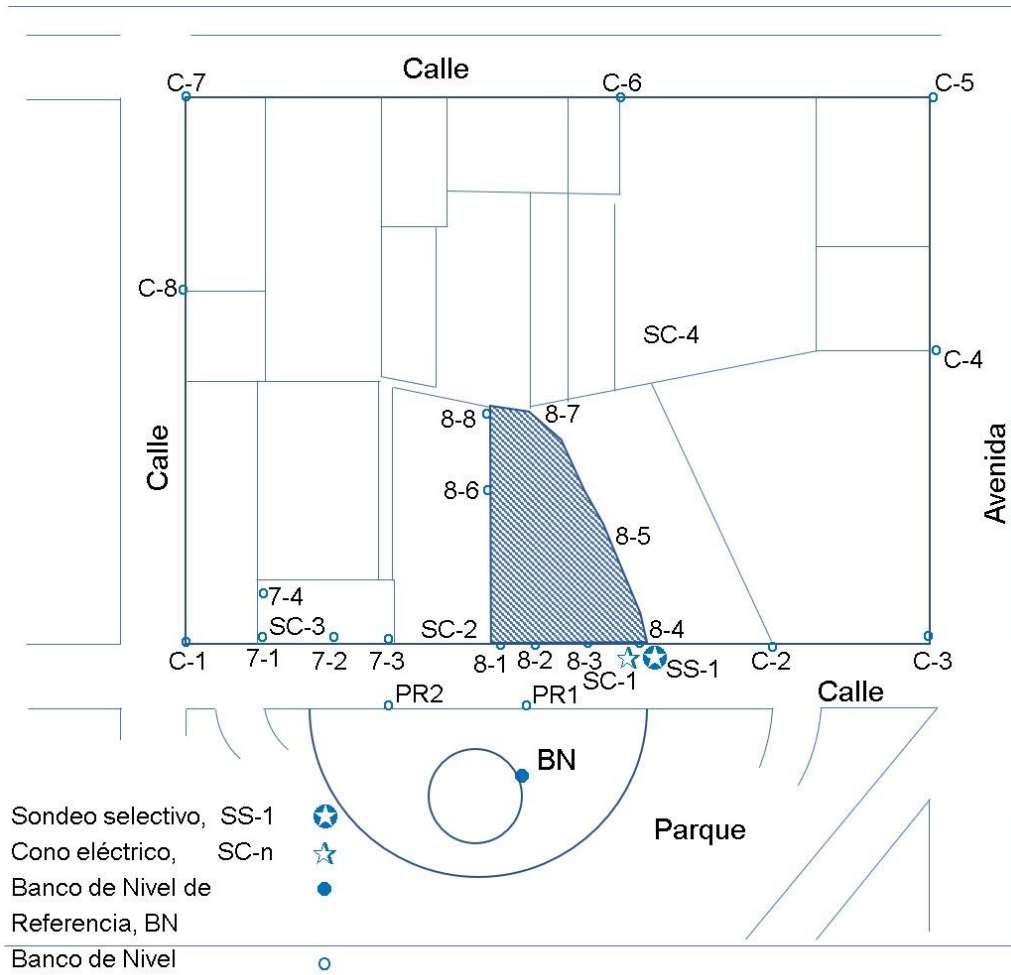


Figura 5. Localización del edificio, sondeos y bancos de nivel (Jaime *et al.*, 1987)

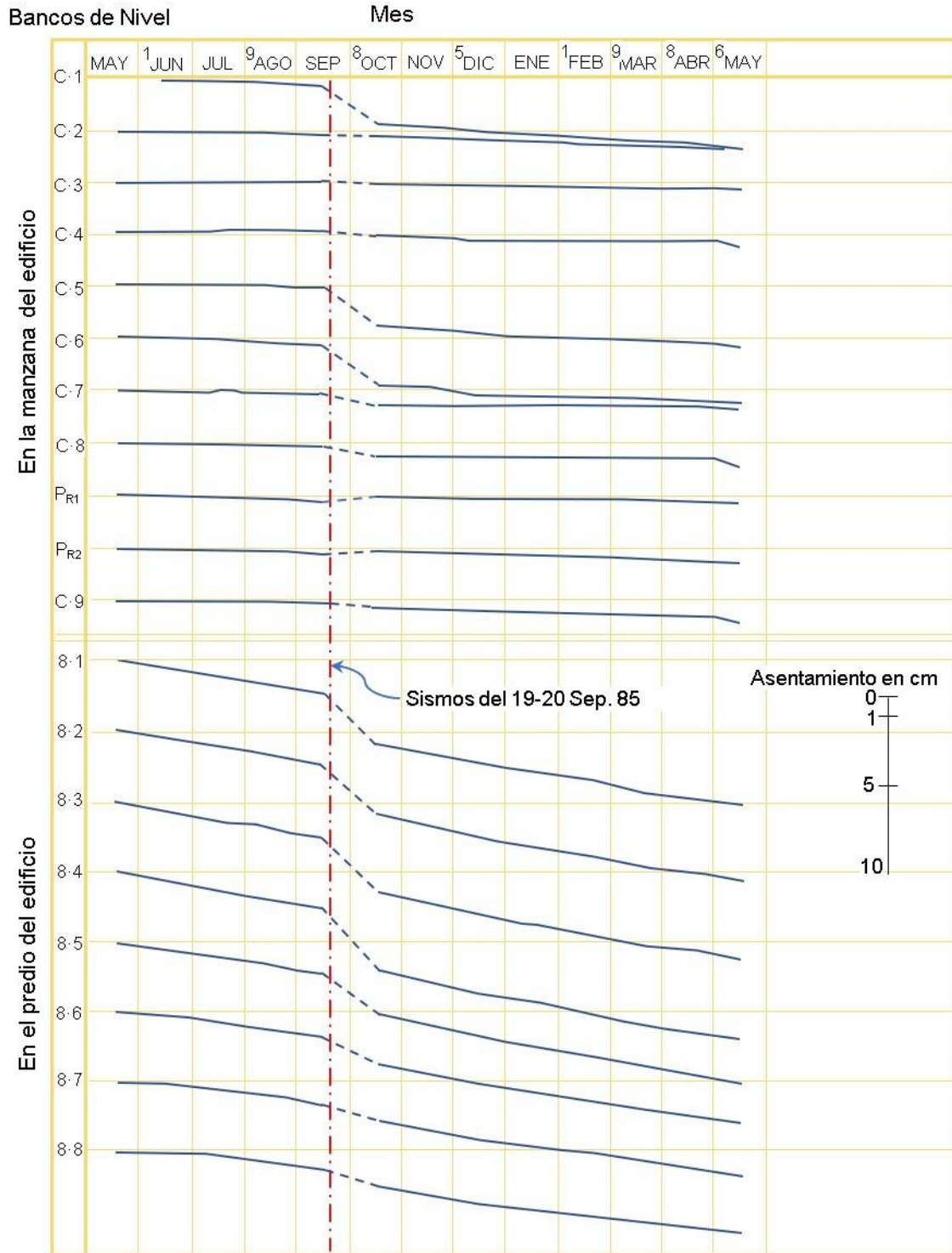


Figura 6. Resultados de las nivelaciones en los diferentes bancos de nivel (Jaime *et al.*, 1987)

De acuerdo con lo descrito, los sismos inducen asentamientos inmediatos tanto en campo libre como en la zona de influencia de edificios y estructuras. También, provocan la aparición súbita de grietas que no se habían manifestado y una deformación mayor de grietas anteriores.

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Principios básicos

En esta investigación se usaron imágenes de satélites SAR. Estos satélites están instrumentados con un radar de sensor activo. Los satélites tienen órbitas fijas entre 600 y 800 km de altura desde la superficie terrestre y recorren su órbita en tiempos fijos; por tanto, pasan por un mismo sitio con ese mismo periodo de tiempo. Las características generales más importantes de los radares de sensor activo utilizados en los satélites y su uso se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Banda de frecuencias más utilizadas. (NASA, 2017)

Banda	Rango de frecuencias	Longitud de onda, λ (cm)	Ejemplos de aplicaciones
VHF	300 KHz-300MHz	100.0 a 1000.0	Follaje, penetración del suelo, biomasa.
Banda P	300 KHz-1GHz	30.0 a 100.0	Biomasa, humedad del suelo.
Banda L	1GHz-2GHz	15.0 a 30.0	Agricultura, gestión forestal, humedad del suelo.
Banda C	4GHz-8GHz	3.8 a 7.5	Océano, agricultura.
Banda X	8GHz-12GHz	2.4 a 3.8	Océano, agricultura, radar de alta resolución.
Banda Ku	14GHz-18GHz	1.7 a 2.4	Glaciología (mapeo de la cubierta de nieve).
Banda Ka	2GHz-2GHz	0.8 a 1.1	Radares de alta resolución

Un sistema de radar consta, principalmente, de un transmisor, un receptor, una antena y un sistema electrónico para el registro de las señales. Adicionalmente, un sistema de radar de apertura sintética (SAR) registra información de un mismo objetivo en distintas posiciones; por tanto, la imagen que resulta es como si fuera recibida por una gran antena. El SAR es de visión lateral, para poder obtener imágenes en dos dimensiones. El transmisor emite pulsos cortos de microondas en intervalos regulares, los cuales viajan a la velocidad de la luz y se reflejan en la superficie terrestre. Posteriormente, la antena recibe una porción de la energía retrodispersada para determinar la distancia y la localización del objetivo. El radar mide la amplitud (intensidad) y la fase (fracción de un ciclo completo de onda senoidal) de esta señal recibida. La retrodispersión depende de parámetros del radar (frecuencia o longitud de la onda, polarización, ángulo de incidencia) y de propiedades de la superficie terrestre (constantes dieléctricas y rugosidad). De forma simplificada, la fase que regresa a la antena está dada por:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} r = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (1)$$

Donde φ es la fase, R es la distancia entre el radar y el objetivo, $r=2R$, es la longitud completa que viaja el pulso de ida al objetivo y de regreso al radar, y λ es la longitud de onda del pulso emitido (fig. 7).

Cuando se comparan dos imágenes satelitales se puede obtener su diferencia de fases ($\Delta\varphi$), fig. 8. Este proceso se conoce como interferometría SAR o InSAR. La imagen más antigua (maestra) se compara con la más reciente (esclava). Se obtiene un Interferograma al determinar la diferencia de fases entre estas dos capturas. El Interferograma está relacionado con la altitud, cambios en la posición de los dispersores, entre otros componentes.

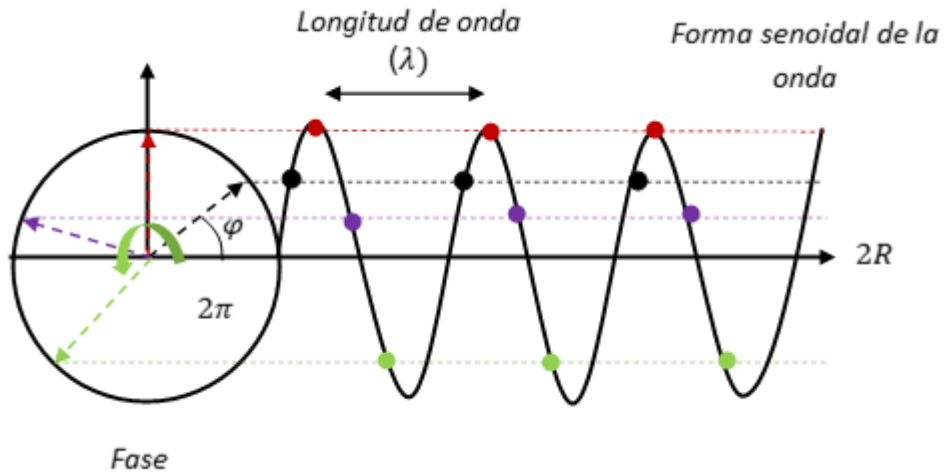


Figura 7. Fase de la onda. (Ferretti *et al.*, 2007)

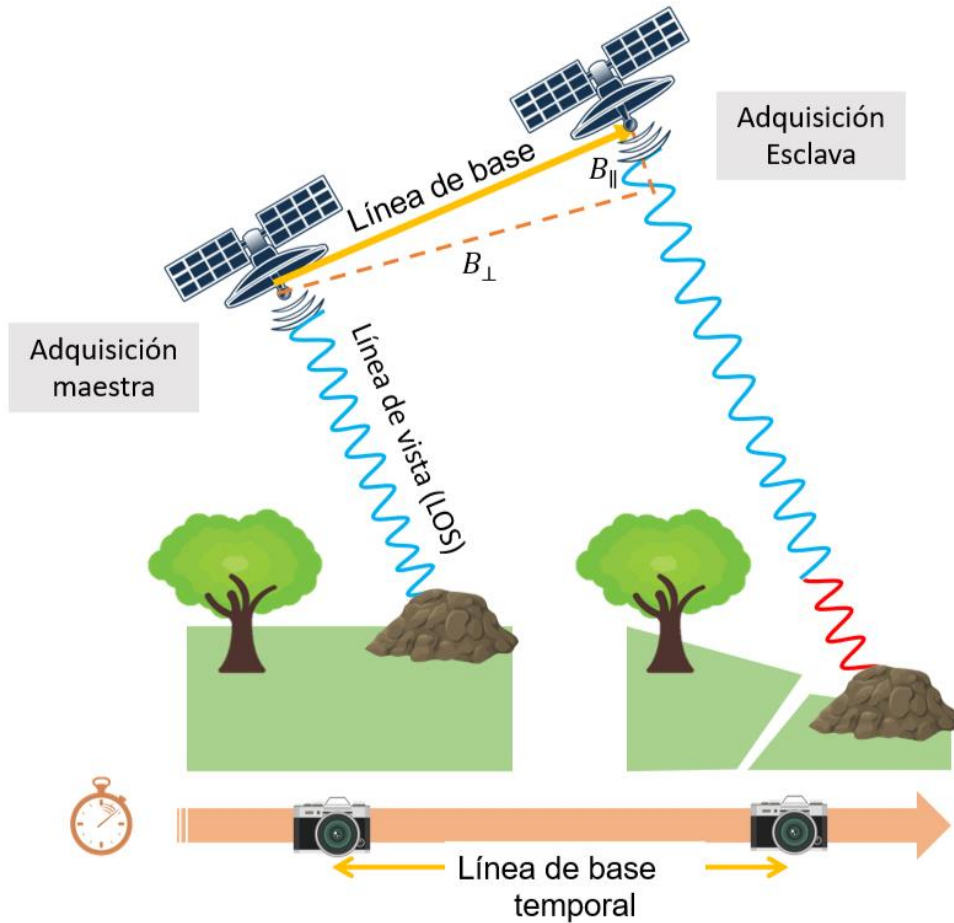


Figura 8. Paso repetido del satélite. (Modificado de Osmanoglu, 2016)

La fase interferométrica está compuesta de aportaciones de la topografía, movimientos de la superficie terrestre, condiciones atmosféricas, separación entre las órbitas de las imágenes maestra y esclava y las propiedades de la Tierra; tal como se muestra en la ecuación:

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{DEM} + \varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta\varphi$ = fase interferométrica (diferencia de fases entre la maestra y esclava).

Las fases, φ , son:

φ_{flat} =por la curvatura de la Tierra

φ_{DEM} =debido a la topografía del terreno.

φ_{defo} =por el movimiento del suelo.

φ_{atm} =debido a perturbación atmosférica

φ_{noise} = por ruido

En la ec. 2, se despeja la contribución del movimiento del suelo (φ_{defo}) y se determinan los desplazamientos relativos en el periodo de tiempo (línea de base temporal) comprendido entre las imágenes comparadas. A este proceso se le conoce como Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR por sus siglas en inglés) (Ferretti *et al.*, 2007). Los desplazamientos resultantes son en dirección de la vista del radar, LOS (por sus siglas en inglés, Line Of Sight).

Se puede realizar una corrección para determinar los hundimientos, los cuales son los desplazamientos en la componente vertical. Las correcciones sugeridas son aproximadas. La geométrica es la más empleada, está en función del ángulo de incidencia y del desplazamiento en la dirección LOS (fig. 9) y se expresa:

$$d_v = \frac{\varphi_{unw}\lambda}{4\pi \cos \theta} \quad (3)$$

Donde φ_{unw} =la fase interferométrica desenvuelta

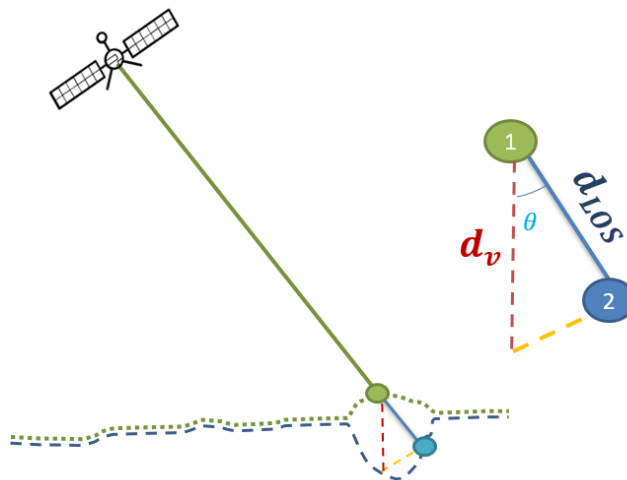


Figura 9. Desplazamiento en la dirección de vista del radar (d_{LOS}) y su proyección vertical (d_v).

Metodología

Las imágenes satelitales se interpretaron mediante el software SNAP de libre acceso (*Sentinel Application Platform*). Desarrollado por las organizaciones Brockmann Consult, SkyWatch y C-S.

La secuencia general para determinar los mapas de hundimientos relativos se resume a continuación:

- 1) Obtención del Interferograma Diferencial (fig. 10a)
 - a. *Preparación de las imágenes*. Se realiza la lectura de las imágenes maestra y esclava. En ambas se seleccionan las ráfagas pertenecientes a la zona de interés y se les aplica información orbital precisa (por ejemplo, la ubicación del satélite durante la adquisición de las imágenes).
 - b. *Apilamiento o correregistro de las imágenes*. Con el fin de obtener un solo producto y realizar los cálculos, las imágenes se colocan en un mismo sistema coordinado y son alineadas con un nivel de precisión de subpíxel. Aquí se hace el cálculo del Interferograma Complejo (multiplicación compleja de imágenes y diferencia de fases).
 - c. *Extracción de la fase por curvatura de la Tierra*. La curvatura de la Tierra es estimada usando metadatos y se sustrae del Interferograma Complejo.
 - d. *Extracción de la fase topográfica*. Se utiliza un modelo de elevación digital (por ejemplo, el SRTM 1sec HGT) para sustraer la fase topográfica y se realiza el cálculo de la coherencia. Se obtiene el Interferograma Diferencial.
- 2) Procesamiento del Interferograma Diferencial para determinar los desplazamientos en dirección LOS (fig. 10b):
 - a. *Aplicación de filtro Goldstein*. Se emplea para reducir al mínimo posible las contribuciones atmosféricas y de ruido del Interferograma Diferencial.
 - b. *Desenvolvimiento de la fase*. Con el algoritmo SNAPHU (Chen y Zebker, 2019) se procede a quitar o agregar el número entero de ciclos al Interferograma Diferencial para determinar la fase desenvuelta.
 - c. *Conversión de fase a desplazamiento*. Este proceso convierte la fase desenvuelta de radianes a unidades métricas. Como resultado, se obtienen los desplazamientos en dirección LOS.
 - d. *Corrección del terreno*. En este proceso se corrigen las distorsiones geométricas de las imágenes SAR usando un modelo de elevación digital (DEM); además, se geolocalizan en un sistema de referencias geográficas (e. g., el WGS84).
- 3) Corrección geométrica de los desplazamientos en dirección LOS para determinar los hundimientos. Se corrigen los desplazamientos en cada píxel para determinar los hundimientos relativos. En algunos casos es necesario establecer un punto de referencia de cero hundimiento y corregir el resto con respecto a dicho punto de referencia.

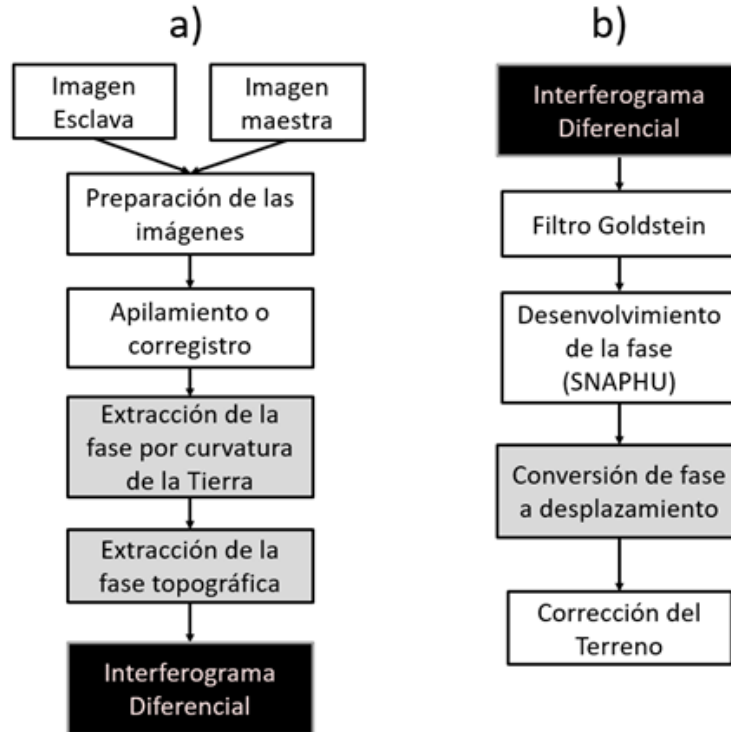


Figura 10. Secuencia general para determinar el Interferograma Diferencial y los desplazamientos en dirección LOS.

ESTIMACIÓN DE HUNDIMIENTO REGIONAL MEDIANTE DInSAR

Información satelital

Las imágenes satelitales se obtuvieron desde la base de datos ASF Data Search Vertex de la Agencia Espacial Europea (2020) y fueron capturadas por el satélite Sentinel -1A. Se adquirieron en el modo IW (*interferometric wide swath*). La huella es aproximadamente de 250 kilómetros en un formato SLC (*Single Look Complex*) con una resolución nominal de 5 metros en dirección del rango (perpendicular a la trayectoria del satélite) y de 20 metros, en dirección del azimuth (en dirección de la órbita del satélite). La precisión de los resultados obtenidos es menor a 1 mm, la cual es función de la longitud de onda del radar, de la coherencia y del método de extracción de la información de las imágenes.

Los análisis se hicieron para dos periodos de tiempo: uno por un año y el otro por mes. El análisis por año se realizó para el año 2016, el análisis por mes se hizo para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2017. Este análisis por mes se llevó a cabo para determinar el hundimiento asociado a los sismos de septiembre de 2017.

En la tabla 2 se resumen las características de los pares de imágenes utilizadas.

Tabla 2. Información de las imágenes utilizadas

Análisis	No.	Satélite	Fecha de captura	Dirección	Track	Órbita
Por año	1	S1A	26-enero-2016	Descendente	143	14915
	2	S1A	20-enero-2017	Descendente	143	9665
Por mes	3	S1A	31-julio-2017	Descendente	143	17715
	2	S1A	24-agosto-2017	Descendente	143	18065
	3	S1A	5-septiembre-2017	Descendente	143	18240
	4	S1A	29-septiembre-2017	Descendente	143	18590
	5	S1A	23-octubre-2017	Descendente	143	18940
	6	S1A	4-noviembre-2017	Descendente	143	19115
	7	S1A	28-noviembre-2017	Descendente	143	19465

Con esta información se obtuvieron los siguientes Interferogramas para estimar los hundimientos (tabla 3).

Tabla 3. Interferogramas obtenidos

Análisis	Periodo	Imagen maestra	Imagen esclava
Por año	2016	1 (26/01/2016)	2(20/01/2017)
Por mes	Agosto 2017	1 (31/07/2017)	2 (24/08/2017)
	Septiembre 2017	3 (05/09/2017)	4 (29/09/2017)
	Octubre 2017	4 (29/09/2017)	5 (23/10/2017)
	Noviembre 2017	6 (04/11/2017)	7 (28/11/2017)

Para verificar la subsidencia anual relativa obtenida por DInSAR, se comparó con nivelaciones hechas con topografía convencional.

Análisis de hundimientos por el sismo del 19 de septiembre de 2017

En las figs. 11 y 12 se muestran los hundimientos relativos determinados para agosto y septiembre de 2017, respectivamente. Como referencias se encuentran la Catedral Metropolitana y el Aeropuerto de la Ciudad de México (AICM). En estos meses, se determinaron asentamientos entre 1 y 3 cm/mes en la zona de suelos blandos de la ciudad de México.

En las figs. 13 y 14 se muestran los hundimientos calculados para octubre y noviembre de 2017, respectivamente. Se determinaron asentamientos entre 2 y poco más de 4 cm/mes.

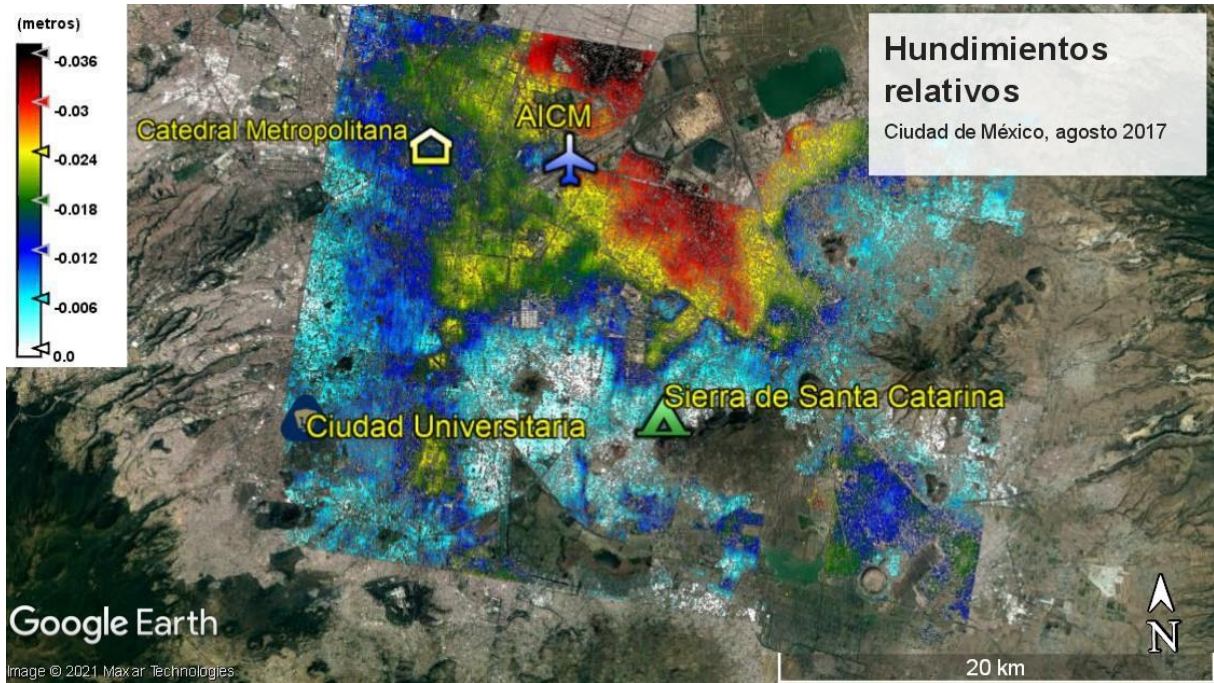


Figura 11. Hundimientos relativos (m/mes) en la Ciudad de México, agosto 2017.

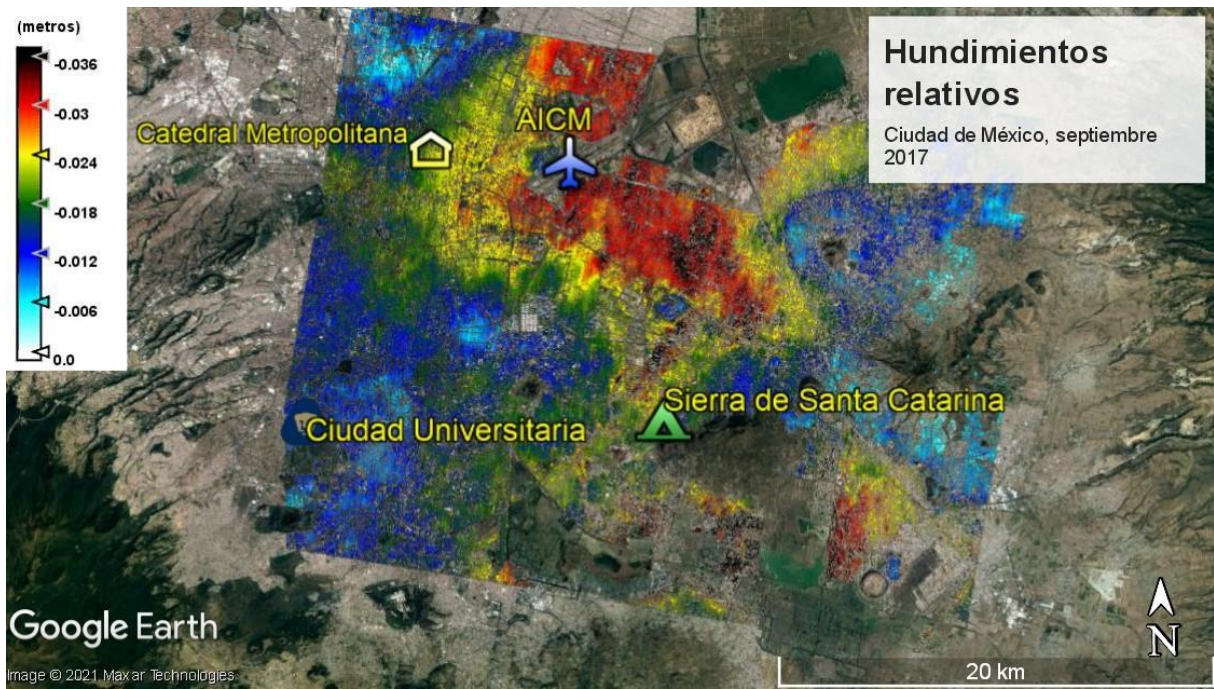


Figura 12. Hundimientos relativos (m/mes) en la Ciudad de México, septiembre 2017.

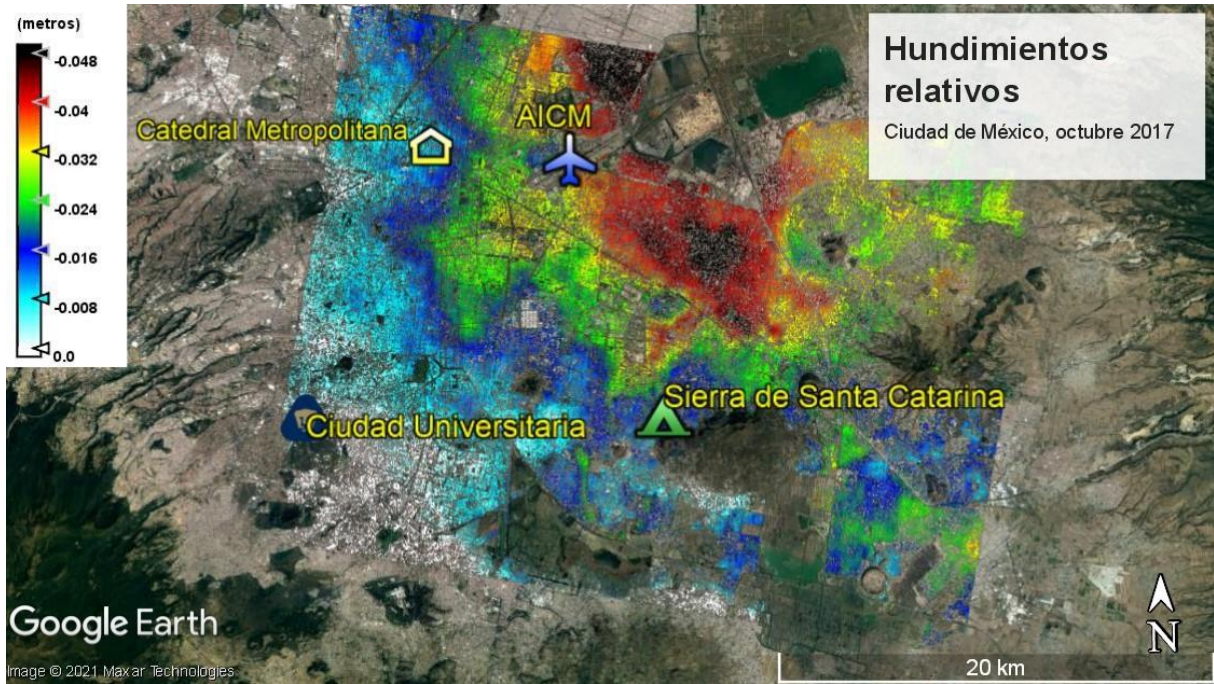


Figura 13. Hundimientos relativos (m/mes) en la Ciudad de México, octubre 2017.

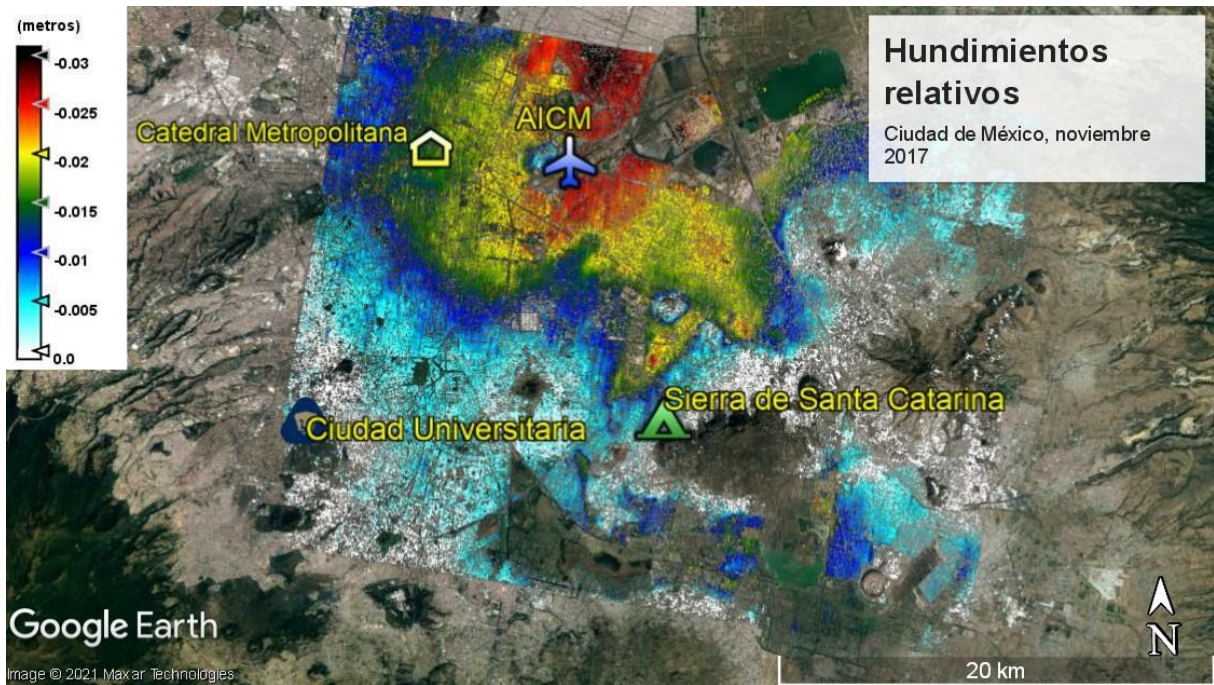


Figura 14. Hundimientos relativos (m/mes) en la Ciudad de México, noviembre 2017.

Se concentró el análisis en el Centro Histórico de la Ciudad de México donde se ubicaron dos perfiles de hundimiento: un perfil Oeste – Este, de aproximadamente 5 km de longitud que pasa por la Alameda Central y la Catedral Metropolitana, y uno Norte - Sur, de aproximadamente 3.6 km que también pasa por la Catedral Metropolitana. La traza de estos perfiles se presenta en la fig. 15.

En las figs. 16 y 17 se presentan los perfiles de hundimiento determinados. En el perfil Oeste-Este se observan hundimientos mensuales de hasta 1.1 cm mayores en septiembre, con respecto a agosto, octubre y noviembre. La diferencia se puede asociar a los sismos de septiembre, 2017. En el lado Este se determinaron mayores asentamientos, lo cual coincide con el aumento del espesor de la capa de los suelos arcillosos compresibles en esa zona. En la Alameda Central, fig. 16, hay poca coherencia de las imágenes. Las imágenes corresponden a una longitud de onda de 5.6 cm (Banda C). Estas ondas pueden ser interferidas por el movimiento de hojas y ramas de árboles, el pavimento, entre otros. En los cuerpos de agua la señal no es retrodispersada. Para disminuir este problema, se pueden emplear imágenes obtenidas con una longitud de onda mayor (e. g. Banda L).

En el perfil de hundimientos relativos Norte - Sur, fig. 17, se determinaron asentamientos hasta 1.1 cm mayores en septiembre con respecto a agosto y los demás meses, que también se asocian a los sismos de septiembre, 2017.



Figura 15. Traza de los perfiles de hundimiento en el Centro Histórico de la CDMX. Perfiles Oeste-Este y Norte-Sur.

Hundimientos en el Centro Histórico de la CDMX Perfil Oeste - Este

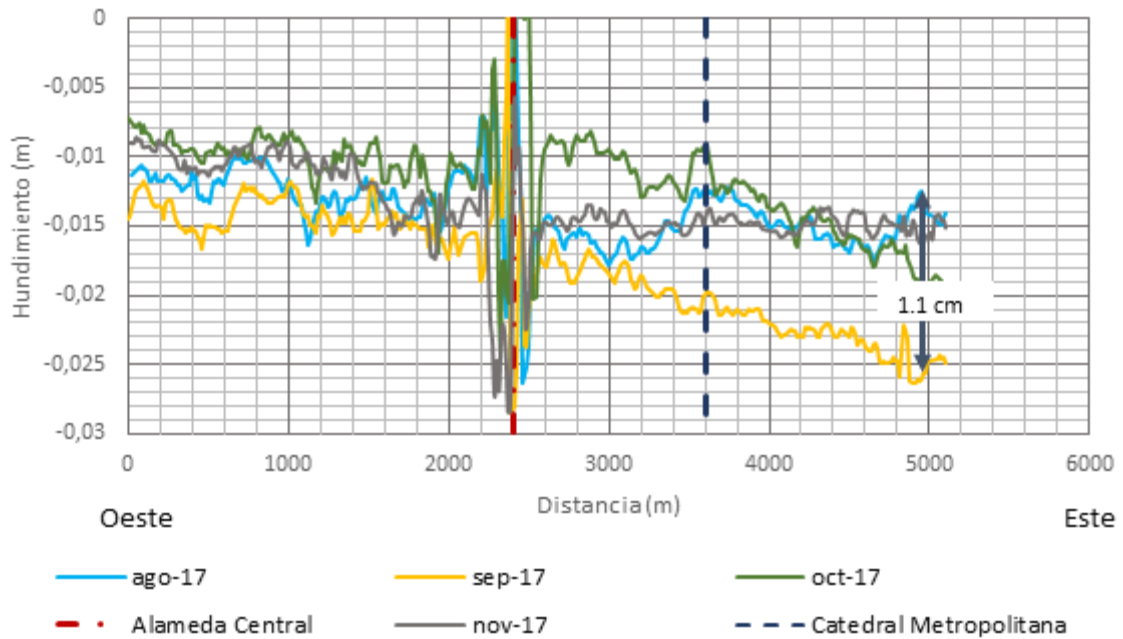


Figura 16. Hundimientos relativos (m/mes) en el Centro Histórico de la CDMX. Perfil Oeste-Este.

Hundimientos en el Centro Histórico de la CDMX Perfil Norte - Sur

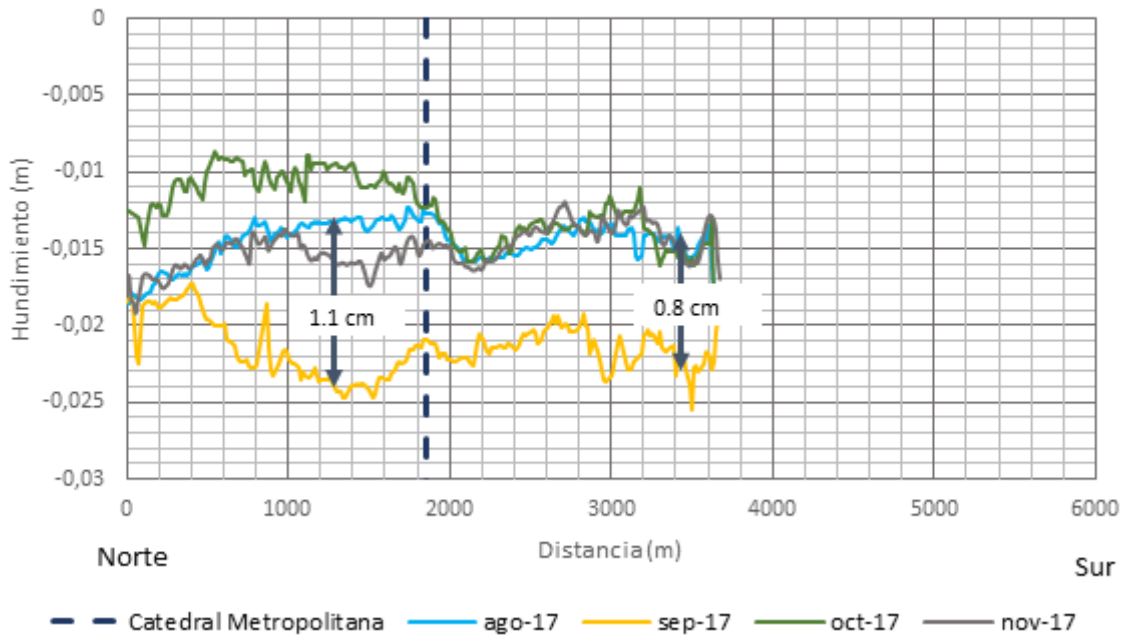


Figura 17. Hundimientos relativos (m/mes) en el Centro Histórico de la CDMX. Perfil Norte -Sur.

Análisis de hundimientos por el sismo en la zona del volcán Xico

Por otra parte, también se realizó un análisis de asentamientos en dos perfiles: Oeste - Este y Norte - Sur en la zona alrededor del volcán Xico. La fig. 18 muestra las trazas de dichos perfiles, cuyas longitudes son de, aproximadamente, 3 km. Asimismo, se marca como referencia un punto O (506824.00 m E, 2130495.00 m N) en la intersección de dichos perfiles.

En las figs. 19, 20, 21 y 22 se presentan los mapas de hundimiento mensual determinados para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2017, respectivamente. Se observa que, para los meses de agosto, octubre y noviembre los hundimientos determinados varían entre 0.5 y 2.0 cm; mientras que, para el mes de septiembre alcanzan los 3.5 cm.

En las figs. 23 y 24 se presentan los perfiles de hundimiento. El perfil Oeste-Este, muestra asentamientos mensuales hasta 3.4 cm/mes mayores en septiembre, con respecto a los obtenidos en agosto, octubre y noviembre. La diferencia se puede asociar a los sismos de septiembre. En la fig. 23, a 1.1 km desde el punto O hacia el oeste, hay poca coherencia en las imágenes.

En el perfil de hundimientos relativos Norte-Sur, fig. 24, se obtuvieron asentamientos hasta 1.7 cm/mes mayores en septiembre con respecto a agosto y los otros meses, que también se asocia a los sismos de septiembre, 2017.



Figura 18. Traza de los perfiles de hundimientos en la Zona del Volcán. Perfiles Oeste-Este y Norte-Sur.

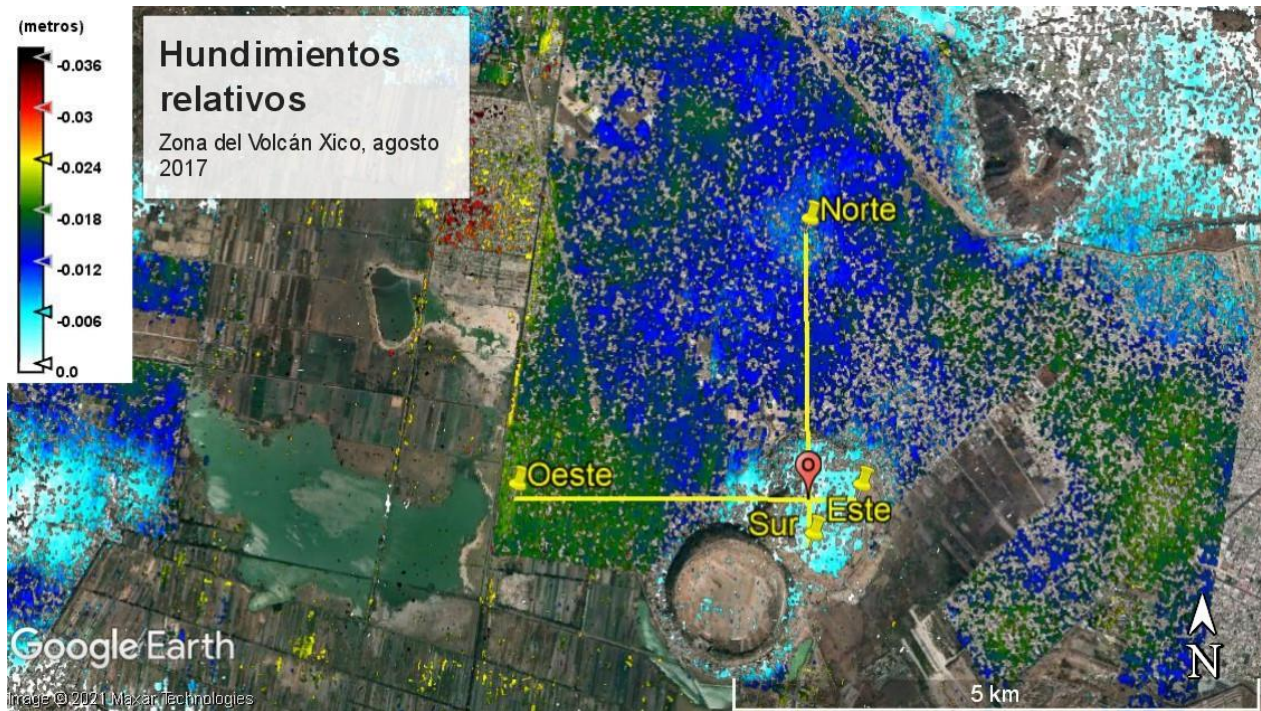


Figura 19. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico, agosto 2017.

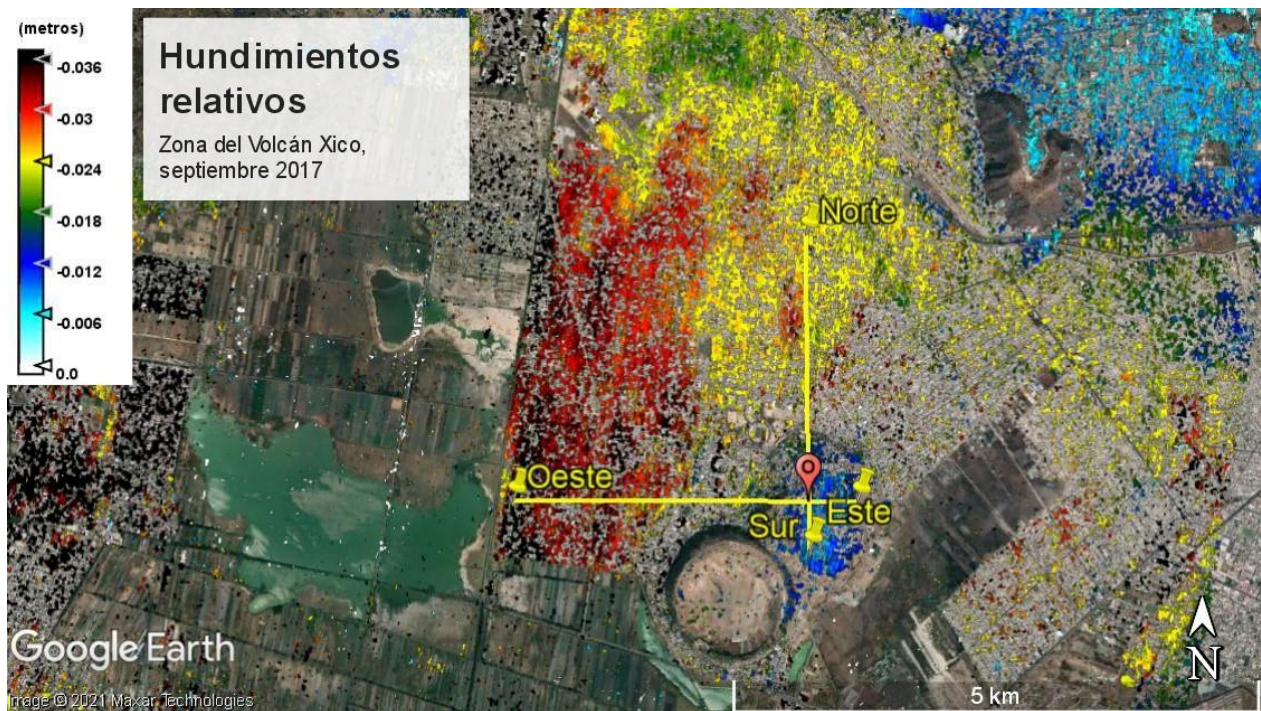


Figura 20. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico, septiembre 2017.

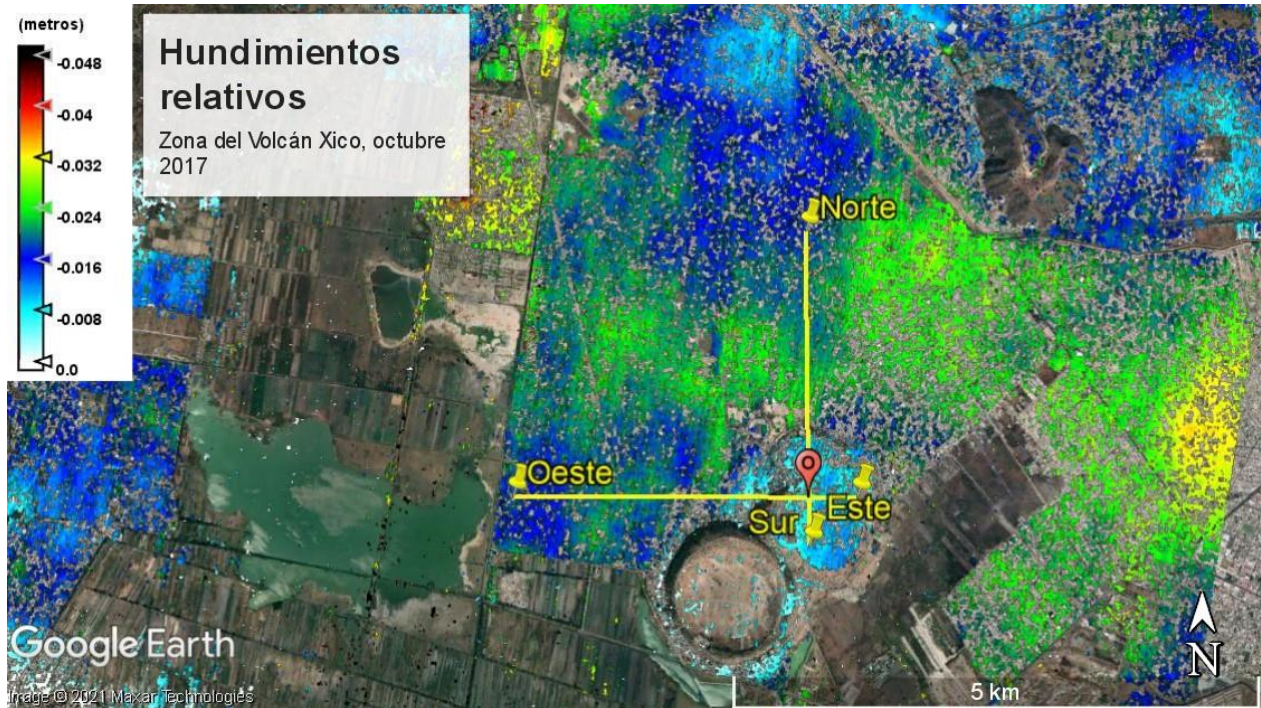


Figura 21. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico, octubre 2017.

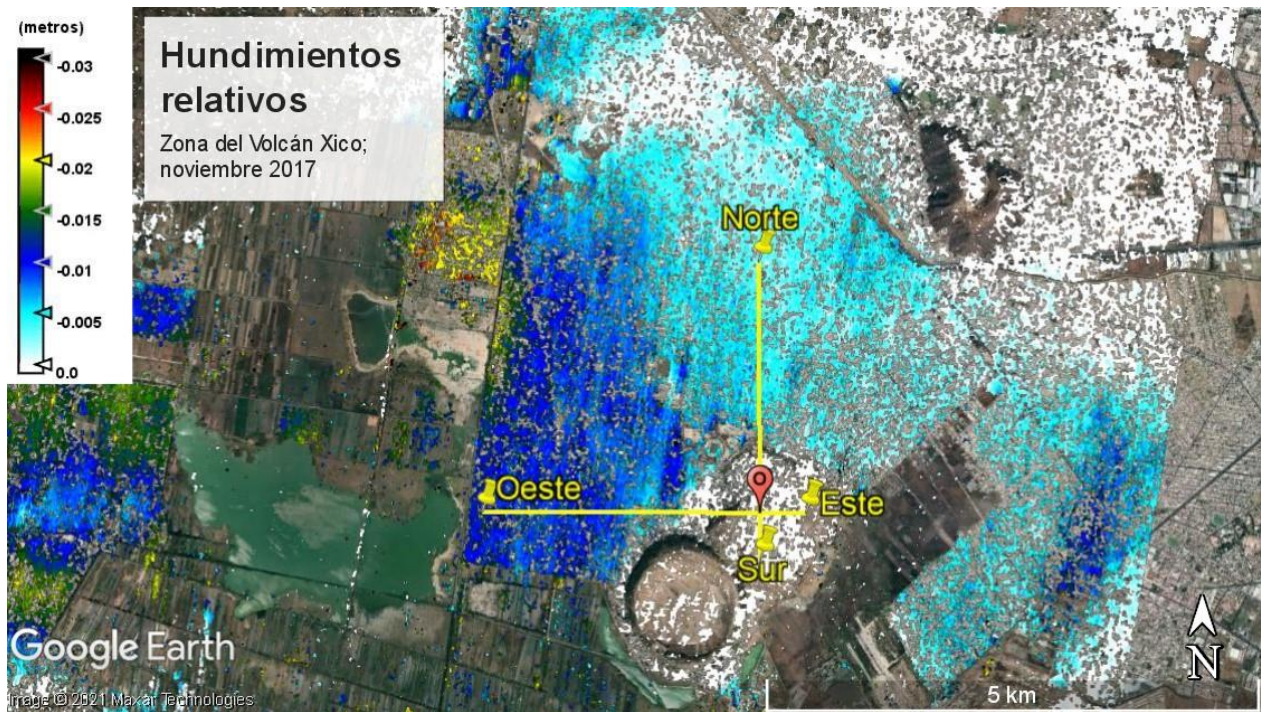
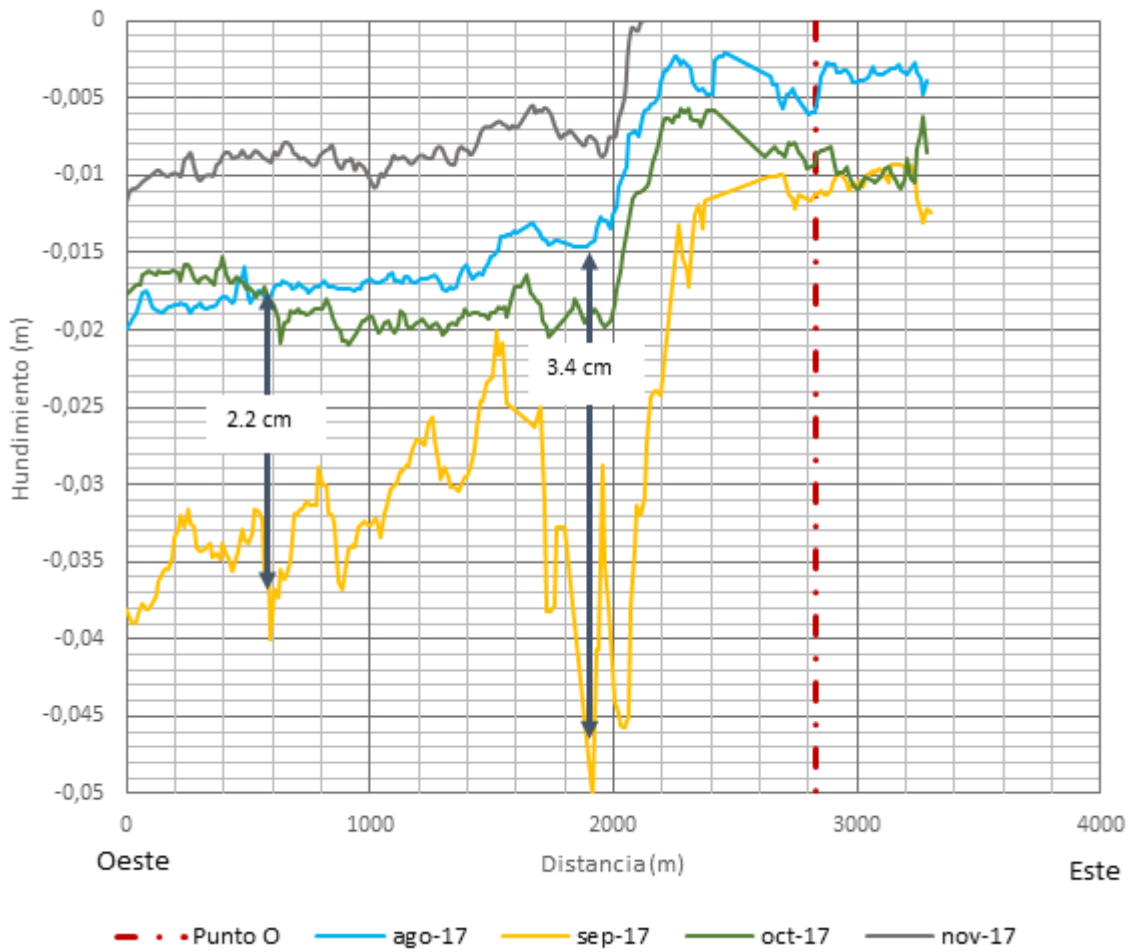


Figura 22. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico, noviembre 2017.

Hundimientos en la zona del Volcán Xico Perfil Oeste - Este



ISSN-e 2395-8251

Figura 23. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico. Perfiles Oeste-Este.

Hundimientos en la zona del Volcán Xico Perfil Norte - Sur

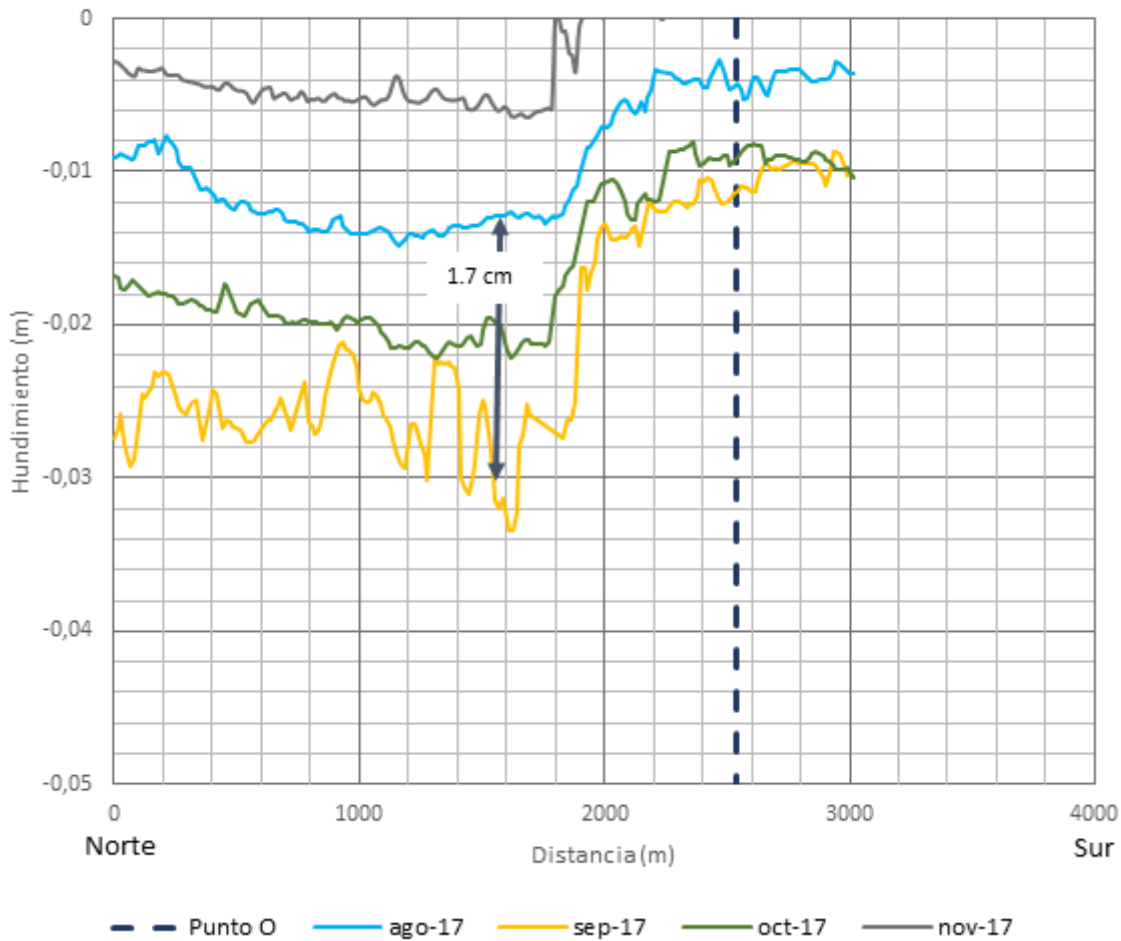


Figura 24. Hundimientos relativos (m/mes) en la Zona del Volcán Xico. Perfiles Norte-Sur.

Hundimiento regional

Para estimar la subsidencia anual promedio de los bancos de nivel de SACMEX, las elevaciones de los bancos de 2016 se restaron de aquellas correspondientes a 2007 y se dividieron entre 9 años. Este hundimiento anual promedio se comparó con el obtenido con el análisis DInSAR correspondiente a 2016.

Como en la sección anterior, se realizaron dos perfiles de hundimiento anual: uno Oeste - Este, de aproximadamente 5 km de longitud; y otro, Norte - Sur, de aproximadamente 3.6 km. Ambos perfiles se cruzan en la Catedral Metropolitana, como se realizó en el caso de los hundimientos por sismo ya descritos. Las trazas de estos perfiles se presentan en las figs. 26 y 28.

En las figs. 27 y 29 se presentan los perfiles de hundimientos. Se determinaron hundimientos mínimos del orden de 1cm/año y máximos del orden de 12 cm/año, en la parte Oeste y en la Este, respectivamente. Se observa una tendencia de hundimientos similar a los resultados promediados de los

bancos de nivel. En la zona Oeste hay un buen ajuste en los primeros 1600 m del perfil, la diferencia es de menos de 0.5 cm/año. Donde hay más dispersión, la diferencia es de aproximadamente 2.0 cm/año.

En el perfil de hundimientos relativos Norte - Sur hay pocos datos de bancos de nivel. Las diferencias mínima y máxima entre los promedios de hundimientos de bancos de nivel y el perfil obtenido por DInSAR para 2016 son, aproximadamente, de 0.5 y 2.0 cm/año, respectivamente.

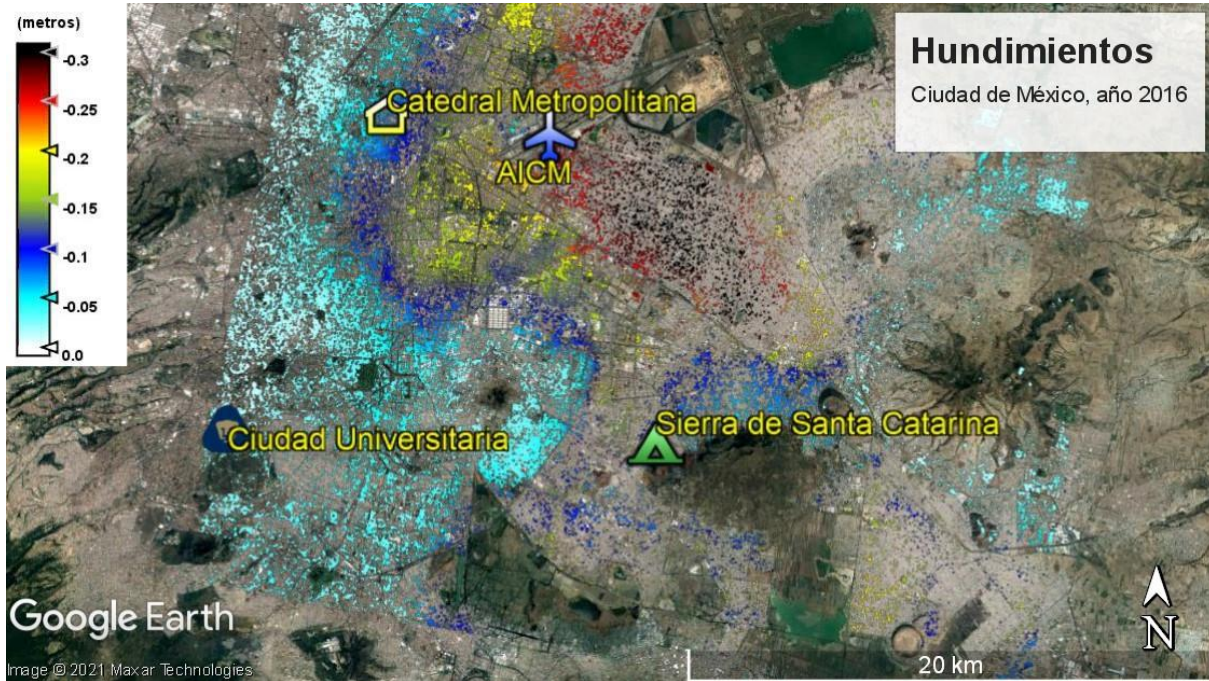


Figura 25. Hundimientos relativos (m/año) correspondientes al año 2016.



Figura 26. Bancos de nivel SACMEX. Perfil Oeste-Este

En la tabla 4 se resumen los datos y los hundimientos anuales promedio de los bancos de nivel de SACMEX a lo largo del perfil Oeste-Este.

Debe tomarse en cuenta, que puede haber fluctuación de los asentamientos relativos debido a los cambios entre periodos de lluvias y de secas. Al subir el nivel freático, se produce una disminución en los esfuerzos efectivos del suelo. Asimismo, el régimen de extracción de agua de los pozos para abastecimiento de agua potable de la ciudad puede variar por temporadas. Esto debería ser motivo de estudio tomando en cuenta los datos de nivelaciones y del régimen de extracciones por año o por mes.

Tabla 4. Datos de los Bancos de Nivel SACMEX en el Perfil Oeste – Este.

Bancos de nivel (BN)	ID	Coordenadas UTM (m)		Distancia (m)	Elevación 2007 (m.s.n.m.)	Elevación 2016 (m.s.n.m.)	Hundimiento promedio anual de BN (m)
		Este (E)	Norte (N)				
BN - 959	C(N01W02)06	482925	2149807	310	2235.46688	2235.33978	-0.0141
BN - 35	B(N01W02)02	483379	2149640	790	2232.7805	2232.56606	-0.0238
BN - 956	C(N01W02)02	483646	2149530	1080	2231.36828	2231.04388	-0.0360
BN - 960	C(N01W02)10	483882	2149383	1360	2230.1831	2229.79161	-0.0435
BN - 32	B(N01W01)05	484200	2149361	1630	2229.07228	2228.69496	-0.0419
BN - 953	C(N01W01)16	485400	2149050	2900	2231.23187	2230.66324	-0.0632
BN - 935	C(N01E01)02	485914	2148843	3450	2230.29488	2229.56679	-0.0809
BN - 939	C(N01E01)06	486055	2148825	3595	2231.8962	2231.21549	-0.0756
BN - 946	C(N01E01)13	486152	2148803	3700	2229.61496	2229.14204	-0.0525
BN -04	B(N01E01)04	486451	2148781	3986	2228.22184	2227.49728	-0.0805

ISSN-e 2395-8251

Hundimiento anual en el Centro Histórico CDMX Perfil Oeste - Este

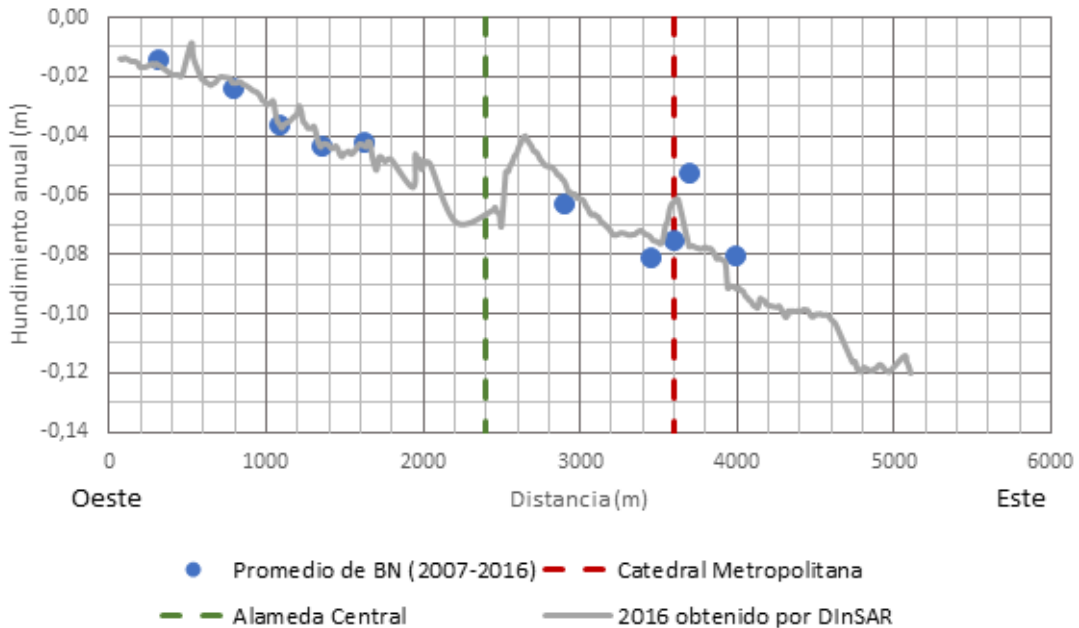


Figura 27. Hundimientos relativos anuales (m/año) en el Centro Histórico. Perfil Oeste-Este



Figura 28. Bancos de nivel SACMEX. Perfil Norte-Sur

En la tabla 5 se resumen los datos y los hundimientos anuales promedio de los bancos de nivel de SACMEX a lo largo del perfil Norte-Sur. Los hundimientos se determinaron de manera similar a los correspondientes del perfil Oeste - Este.

Tabla 5. Datos de los Bancos de Nivel SACMEX en el Perfil Norte – Sur.

Bancos de nivel (BN)	ID	Coordenadas UTM (m)		Distancia (m)	Elevación 2007 (m.s.n.m.)	Elevación 2016 (m.s.n.m.)	Hundimiento promedio anual de BN (m)
		Este (E)	Norte (N)				
934	C(N01E01)01	485,995	2,149,266	1450	2,231.25	2,230.59	-0.0736
946	C(N01E01)13	486,152	2,148,803	1855	2,229.61	2,229.14	-0.0525
947	C(N01E01)14	486,129	2,148,600	2060	2,231.30	2,230.39	-0.1010
1404	M(S01E01)02	485,814	2,148,068	2665	2228.98	2228.22	-0.0843

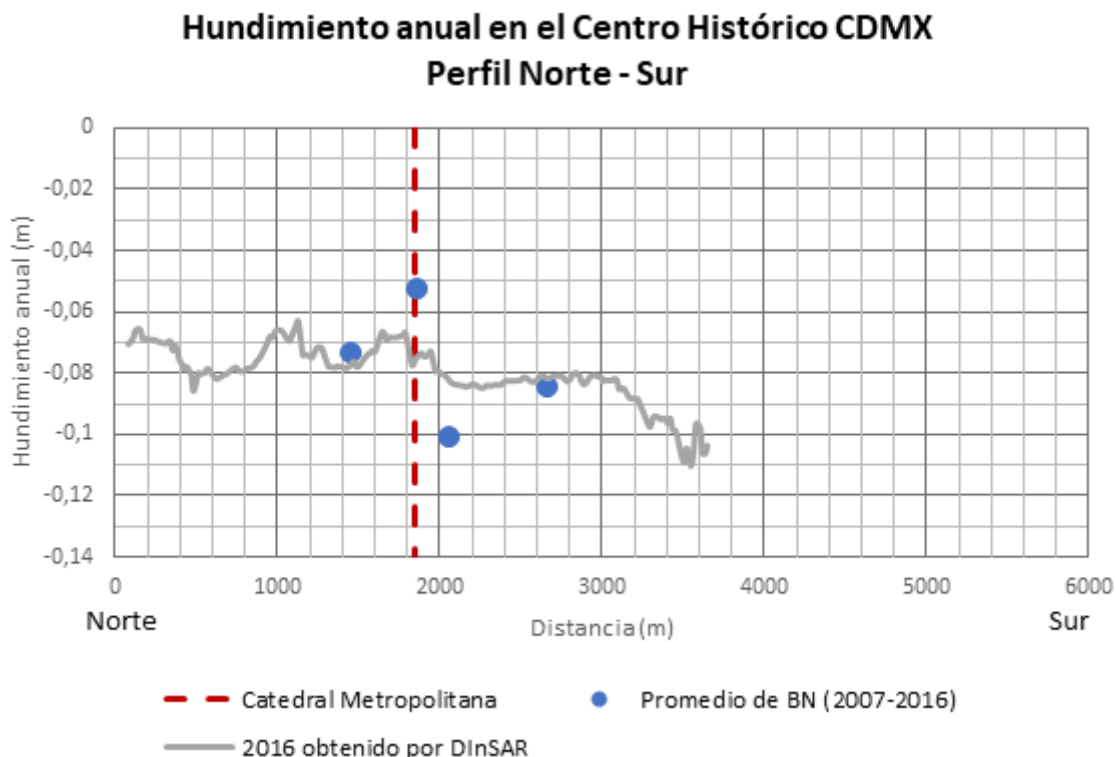


Figura 29. Hundimientos relativos anuales (m/año) en el Centro Histórico. Perfil Norte - Sur.

CONCLUSIONES

La tecnología DInSAR es una excelente herramienta para visualizar zonas de asentamiento en áreas urbanas sobre todo en aquellas de difícil acceso. Esta herramienta proporciona información que puede ser analizada en gabinete de manera más eficiente, económica y en menos tiempo, en comparación con técnicas topográficas convencionales de campo. Desde luego, es recomendable complementarla con bancos de nivel fijo para aumentar su nivel de precisión.

Los sismos que afectaron a la Ciudad de México en septiembre de 2017 indujeron asentamientos súbitos. En el Centro Histórico estos asentamientos variaron entre 1.2 y 2.5 cm en el campo libre. En la zona del Volcán Xico los asentamientos súbitos calculados resultaron entre 1.0 y 5.0 cm.

De los resultados obtenidos con la tecnología DInSAR, se estimó que en algunas zonas de la ciudad la tasa de hundimiento anual alcanza valores de 45 cm por año. Otras zonas, como el Centro Histórico de la Ciudad, se hunden, aproximadamente, a una velocidad entre 6 y 15 cm por año. Valores similares a los determinados con los métodos topográficos tradicionales.

REFERENCIAS

Aguilar, R. (2008). "Respuesta dinámica de los suelos del valle de México en el futuro. Los nuevos retos de la Ingeniería Geotécnica en el Siglo XXI", *XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. Vol. 2. pp. 621-628. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

- Auvinet G., Juárez, M., Méndez, E., Hernández, F., Martínez, S. y Pérez, M. (2021). “Evaluación del mecanismo de agrietamiento del suelo en el sur-oriente de la Ciudad de México mediante exploración geotécnica profunda”, *Memorias de la XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. pp. 1053-1063. Ciudad de México: SMIG.
- Auvinet G., Méndez E. y Juárez M. (2017). “El Subsuelo de la Ciudad de México”, Volumen III. *Instituto de Ingeniería, UNAM*, Ciudad de México.
- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., y Carande, R. E. (2008). “Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City”. *The Geological Society of America Bulletin*. Vol. 120. pp. 1556–1566. <https://doi.org/10.1130/B26001.1>.
- Carrillo, N. (1947). “Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la Ciudad de México”, *Procedimientos del II congreso Internacional de mecánica de suelos*. Holanda.
- Chen, C. W. y Zebker, H. A. (2019). *SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*. Obtenido de Stanford University: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>
- Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F. (2007). “ESA TM-19 InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation”. *ESA*, Noordwijk, Netherlands.
- Figuroa, G. (1990). “Grietas por sobreexplotación y hundimientos durante sismos”. *Simposio el subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*. Ciudad de México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Figuroa, G. (1976). “Subsidence of the City of Mexico; a historical review”. *Proceedings of the Anaheim Symposium of the International Association of Hydrological Sciences*. N° 121. pp. 35-38.
- Hiriart, F. y Marsal, R.J. (1969). “El hundimiento de la Ciudad de México”. Volumen Nabor Carrillo, *Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Fiduciaria: Nacional Financiera, S.A.*, pp. 109-147, México.
- Jaime, A., Alcocer, G, Sanabria, J. y Barrera, J. (2021). “Uso de imágenes satelitales para estimar la subsidencia provocado por sismo en la Ciudad de México”. *Memorias de la XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. pp. 989-996. Ciudad de México: SMIG.
- Jaime, A., Alcocer, G, Sanabria, J. y Barrera, J. (2020). “Uso de imágenes satelitales para estimar el asentamiento provocado por sismo en la Ciudad de México”. *Gaceta del Instituto de Ingeniería*. Número 145. Nov-Dic 2020. pp. 3-6. Ciudad de México.
- Jaime, A. (1988). “Geotecnia y sismicidad en el Valle de México”. SD29. *Series del Instituto de Ingeniería-UNAM*.
- Jaime, A., Romo, M. P. y Jasso, M. (1987). “Seismic Induced Settlement in a Building”, *Memorias del VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*. Vol. 2, pp. 257, 275, Cartagena, Colombia.
- Juárez-Badillo, E. (1961). “Mecanismo de grietas de tensión en el Valle de México”. *Tesis de doctorado*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Marsal R.J. y Mazari, M. (1969). “El subsuelo de la Ciudad México”. *Instituto de Ingeniería, UNAM*, México.
- Marsal, R.J., Hiriart, F. y Sandoval, R. (1952). “Hundimiento de la Ciudad de México. Observaciones y estudios analíticos”. *Ediciones ICA*. Serie B. N°3. México, D.F.

- Mayoral, J. Tepalcapa, S., Román-de la Sancha, A., El Mohtar, C. y Rivas, R. (2019). "Ground subsidence and its implication on building seismic performance". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 126:105766. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105766>.
- Murillo, R. y García, G. (1978). "Ex-lago de Texcoco", *Simposio sobre el subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Nader, F. y Morales, R. (1978). "Ex-lagos de Xochimilco y Chalco". *Simposio sobre el subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- NASA, ESA. (2020). ASF Data Search. Obtenido de Earth Data: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- NASA (2017). ARSET - Introduction to Synthetic Aperture Radar. Visitado el 12/05/2021: <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-introduction-synthetic-aperture-radar>
- Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D. y Cherry, J. (1999). "Analysis of long term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling". *Water Resources*. Vol. 35. No. 11Pp. 3327–3341. <https://doi.org/10.1029/1999WR900148>
- Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., y Cabral-Cano, E. (2016). "Time Series analysis of InSAR data: Methods and trends". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Osmanoglu, B., Dixco, T., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. y Jiang, Y. (2011). "Mexico City Subsidence observed with persistent scatterer InSAR". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>
- Ovando, E., Ossa, A. y Romo, M. (2007). "The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27. pp. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.08.005>.
- Ovando, E., Ossa, A. y Santoyo, E. (2013). "Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City". *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 65, N° 1. pp. 157-167. [DOI:10.18268/BSGM2013v65n1a12](https://doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a12)
- Ovando, E., Romo, M., Contreras, N. y Giralt, A. (2001). "Effects on soil properties of future settlements in downtown Mexico City due to ground water extraction". *Geofísica Internacional*. Vol. 42, N° 2. pp. 185-204. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.2.264>
- Reséndiz, D., Springall, G., Rodríguez J.M. y Esquivel R. (1970). "Información Reciente sobre las Características del Subsuelo y la Práctica de la Ingeniería de Cimentaciones en la Ciudad de México". *V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. México: SMMS.
- Santoyo, E., Ovando E., Mosser, F. y Plata, E. (2005). "Síntesis Geotécnica de la cuenca del Valle de México". México: TGC Geotecnia.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1991). "Agrietamiento de suelos". *SMMS*, México.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1990). "El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de Cimentaciones a Cinco Años del Sismo". *SMMS*, México.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1978). "El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México". *SMMS*, México.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1970). “Memorias V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos”. *SMMS*, México.

Zeevaert L. (1983). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. Nueva York, EEUU: Van Nostrand Reinhold Company.