



SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

PROYECTO

ESTIMACIÓN DEL HUNDIMIENTO DIFERENCIAL DEL TERRENO UTILIZANDO LA TÉCNICA DOUBLE-PASS PARA LA GIRD EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Dirección de Investigación

Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales

Antulio Zaragoza Álvarez

Leobardo Domínguez Morales

Otz Chaim Alcaraz Alonso

Ana Karen Villalba Aguilera

Enero 2020





CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	3
ANTECEDENTES	¡Error! Marcador no definido.
HUNDIMIENTO REGIONAL	¡Error! Marcador no definido.
TÉCNICA INSAR PARA EL FENÓMENO DE HUNDIMIENTO.....	11
CALCULO DE HUNDIMIENTO CON INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL USANDO LA TÉCNICA DOUBLE-PASS	13
USO DE EQUIPO VANT PARA EL ANÁLISIS DEL AGRIETAMIENTO.....	19
PRUEBAS GEOTÉCNICAS CON EQUIPO PANDA EN LA ALCALDÍA TLÁHUAC	24
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS	36



INTRODUCCIÓN

El hundimiento y agrietamiento del terreno es un problema geológico-geotécnico que, a nivel mundial, ha llamado la atención de especialistas, investigadores, urbanistas, constructores, medios de comunicación y gobiernos (CENAPRED, 2014) debido a los cuantiosos y recurrentes daños que ocasionan en los sectores de vivienda, carreteras, vías férreas, líneas de comunicación y conducción, instalaciones industriales y en obras de ingeniería.

La República Mexicana cuenta con una superficie de 1 964 375 km² de los cuales 1 042 369.56 km² (53.06%) de la superficie presenta afectaciones por hundimiento y agrietamiento muy bajas, 149 523.92 km² (7.61%) presenta afectaciones bajas, 632 156.87 km² (32.18%) presenta una afectación media, 122 045.05 km² (6.21%) afectaciones altas, así como 18 279.57 km² (0.96%) presentan afectaciones en el rango de muy alto. Las tasas de hundimiento son variables debido a que están controladas por el espesor y las características geomecánicas de los sedimentos. Asimismo, la intensidad de las tasas de extracción de agua subterránea y la recarga del acuífero juegan un papel crucial en su evolución, control y minimización de riesgo (Tuxpan, 2018).

Desde hace varias décadas el hundimiento regional, también conocido como hundimiento diferencial del terreno en la Ciudad de México ha estado presente; en algunas zonas, la ciudad llegó a hundirse hasta 40 cm. Siendo uno de los fenómenos más difíciles de medir y caracterizar en grandes áreas, ya que en su ocurrencia intervienen diversos factores naturales y humanos, provocando problemas en los sistemas de drenaje como fugas, inundaciones y desabastos, deformación y ondulaciones en construcciones, y escalonamientos o asentamientos en calles y avenidas.

Sin embargo, a pesar de los daños que el hundimiento regional provoca en las ciudades, no está considerado como un riesgo latente o un desastre, además de que no se incluye en la Ley de Aguas Nacionales, ni en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEPA), así como tampoco se considera en los programas urgentes de ayuda social, y el motivo es que sus efectos por lo general se observan a largo plazo, por lo que los afectados no cuentan con elementos legales para ampararse o reclamar (Rodríguez y Rodríguez, 2006).

En general, desde el punto de vista de la resistencia de materiales, todo tipo de suelos y rocas son propensos a deformarse y agrietarse, pero su magnitud y velocidad de ocurrencia dependen de diversos factores, como la resistencia al esfuerzo cortante, las características esfuerzo deformación de los mismos, el grado de alteración natural (intemperismo), el grado de consolidación natural, la permeabilidad y el grado de alteración o modificación del medio por actividades humanas (CENAPRED, 2014).



En la actualidad, el uso de geotecnologías como la Percepción Remota (PR) han logrado posicionarse como una herramienta funcional para el análisis de la superficie terrestre, logrando estudios sobre fenómenos como el hundimiento y agrietamiento de terreno, por lo que, las ventajas de utilizar la PR en materia de prevención de desastres, radican en la obtención de información acerca de un objeto, área o fenómeno sin entrar en contacto directo con él, además de cubrir grandes extensiones de territorio (Velásquez, 2002). La obtención de estos datos involucra el uso de instrumentos llamados sensores remotos, los cuales son capaces de captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales a una distancia considerable de aquellos (Pérez, 2007).

Este término es más comúnmente usado en conexión con técnicas electromagnéticas para la adquisición de la información, en donde estas técnicas cubren el conjunto del espectro electromagnético desde: baja frecuencia, ondas de radio a través de las microondas, submilimétricas, infrarrojo lejano, infrarrojo cercano, visible, ultravioleta, rayos x y gamma (Elachi y Van, 2006).

Adicionalmente, los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT), específicamente implementados en el estudio de fenómenos naturales, están experimentando un notable aumento, debido a la reducción de costos y el tamaño de los sensores relacionados al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), la facilidad de generar vuelos pre-programados, IMUs (unidades de movimiento inercial) y auto-pilotos, esta tecnología puede llenar algunos vacíos del conocimiento, mejorando la resolución espacial y temporal de los sistemas de sensores remoto-actuales más comunes. Ya que la plataforma del VANT permite georreferenciar las imágenes que captura, es posible realizar los procesos de generación de Modelo Digital de Superficie (MDS) y de ortoimágenes, herramientas utilizadas en esa investigación para la identificación de agrietamientos en las calles.

HUNDIMIENTO REGIONAL

Un hundimiento se caracteriza por ser un movimiento tridimensional, el cual depende del estado de esfuerzos y geodinámicas del terreno, dominando movimientos verticales o movimientos horizontales. El movimiento vertical del terreno se refleja en la topografía por como una oquedad o subsidencia, siendo fácilmente estudiada a partir de métodos geológicos-geodésicos, entre otros; no obstante, los movimientos laterales son menos evidentes y se manifiesta menos en superficie, sobre todo en áreas planas, donde la componente vertical es muy pequeña, siendo difícil identificar dichas deformaciones con métodos tradicionales.

El hundimiento regional se puede definir como un descenso de la superficie del terreno (Lugo, 2011), respecto a un punto fijo que no presenta movimientos o que sus desplazamientos (verticales, principalmente) son insignificantes y mucho menores a los del resto del terreno.

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 4 de 37





El fenómeno se presenta principalmente en suelos de origen lacustre y en depósitos aluviales y fluviales, constituidos por partículas finas de suelo como arcillas, limos y arenas finas (CENAPRED, 2014). Son varias las causas que pueden provocar la deformación del terreno, entre éstas se tienen: i) la aplicación de cargas superficiales, ii) la deformación natural, iii) el hundimiento por extracción de agua y iv) la contracción por desecación natural. Sin embargo, el proceso que más influye en la deformación del subsuelo es la consolidación por extracción de agua.

La velocidad de deformación por extracción de agua depende también de la permeabilidad de los materiales y de la forma y tamaño de sus partículas, por lo que no sucede de manera inmediata, sino que se desarrolla en el transcurso del tiempo, y pueden ser necesarios varios años o décadas para que este fenómeno sea visible y ocasione daños, que pueden llegar a ser irreparables, en obras de ingeniería, monumentos históricos e infraestructura.

Cuando se extrae agua de un acuífero se reducen las presiones de poro en su seno (Mendoza et al., 2003). Si se trata de un acuífero confinado, la masa de suelo impermeable (materiales arcillosos, por ejemplo) también sufrirá reducciones de presión de poro. La disminución de la presión de poro en el acuífero ocurre en tiempos relativamente cortos mientras que en la masa arcillosa suprayacente se da en tiempos mucho más largos. El gradiente de presiones que se origina da lugar a un lento flujo de agua desde el material arcilloso hacia el acuífero.

El agua desalojada produce reducciones de volumen en el material arcilloso, compresible, asociados a los incrementos de esfuerzos efectivos que resultan. Suponiendo que el acuífero está constituido por materiales permeables de baja compresibilidad y que el material arcilloso que lo confina es comparativamente mucho más compresible (Fig. 1), los cambios volumétricos que se producen durante el bombeo regional ocurrirán principalmente en este último material. Si ambos materiales están constituidos por estratos sensiblemente horizontales, la deformación volumétrica resultante es unidimensional o en una dirección.



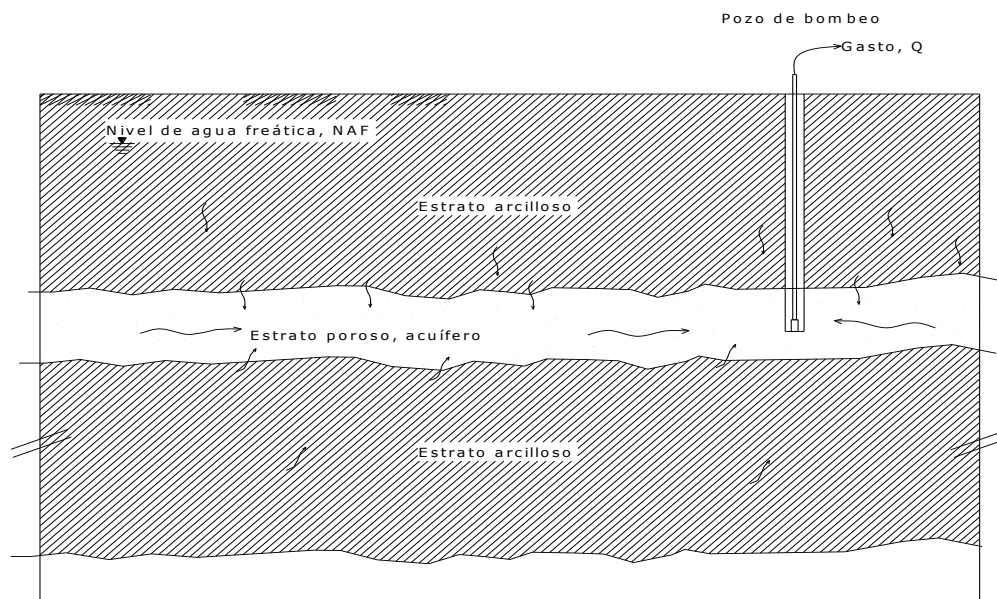


Fig. 1. Esquema simplificado de consolidación por extracción de agua en un depósito de suelos. Tomado de CENAPRED, 2014.

Debido a que la magnitud de los hundimientos puede ser de solo unos cuantos centímetros por año, y que afecta superficies muy extensas, de varios kilómetros cuadrados, éstos son casi imperceptibles; sin embargo, al cabo de algunos años tienden a generar problemas. Cuando el hundimiento se produce de una forma diferencial, es decir con diferente magnitud de un punto a otro, ya sea por las diferencias en las propiedades de los suelos o por geometrías irregulares del basamento, se puede presentar un fenómeno más espectacular y destructivo que genera esfuerzos de tensión, escalonamientos y, finalmente, agrietamientos.

En varios casos ocurridos en México, el asentamiento diferencial ha provocado la aparición de grietas en la superficie del terreno, por lo que en muchas ocasiones estas manifestaciones se confunden y se asocian con problemas de origen geológico como fallas o fracturas de la corteza. Sin embargo, un aspecto distintivo de los agrietamientos del terreno debidos al fenómeno de hundimiento o asentamiento regional es su relación con el abatimiento de los niveles piezométricos en la masa del suelo. No obstante, también existen casos en los que este efecto (extracción de agua) se combina con las características de deformación de los materiales que rellenan el basamento y la forma geométrica de éste. Es decir, cuando el basamento que contiene a los depósitos de suelos deformables es de forma irregular y con escalonamientos o con irregularidades muy pronunciadas, en la superficie del terreno se observan los efectos de estas irregularidades a través de líneas de asentamientos o escalonamientos que generalmente coinciden con las protuberancias del basamento (Fig. 2).

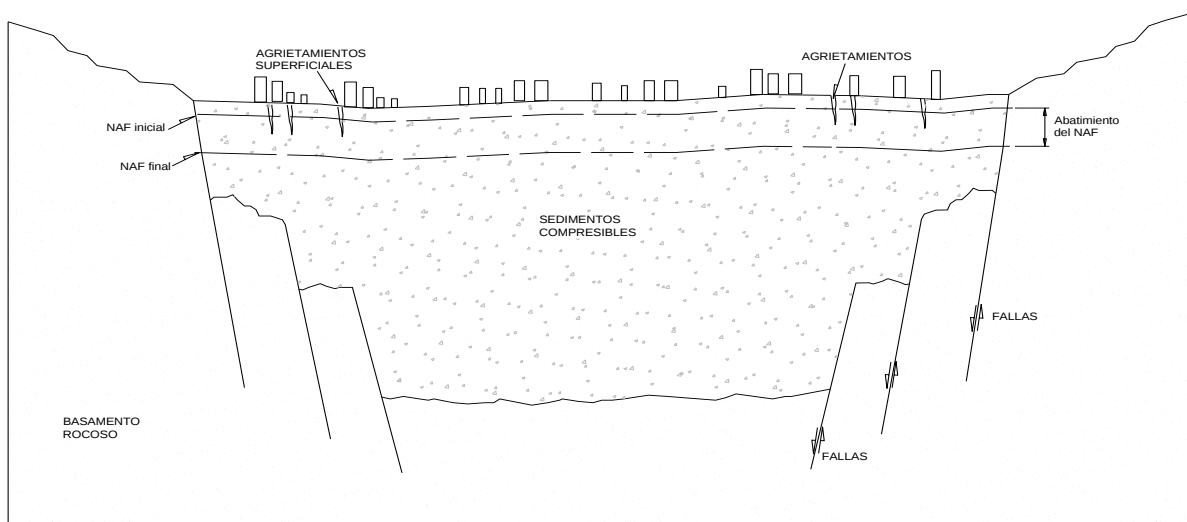


Fig. 2 Esquema simplificado del agrietamiento superficial inducido por la forma del basamento en una fosa tectónica o graben. CENAPRED, 2014.

Holzter et al. (1976) afirman que las grietas se presentan en puntos de máxima curvatura donde se presenta el hundimiento y que la topografía de la roca basal es un factor importante. **Larson (1983)** propuso una lista de lugares en donde comúnmente la aparición de las grietas es más susceptible debido al abatimiento del agua subterránea (Fig. 3).

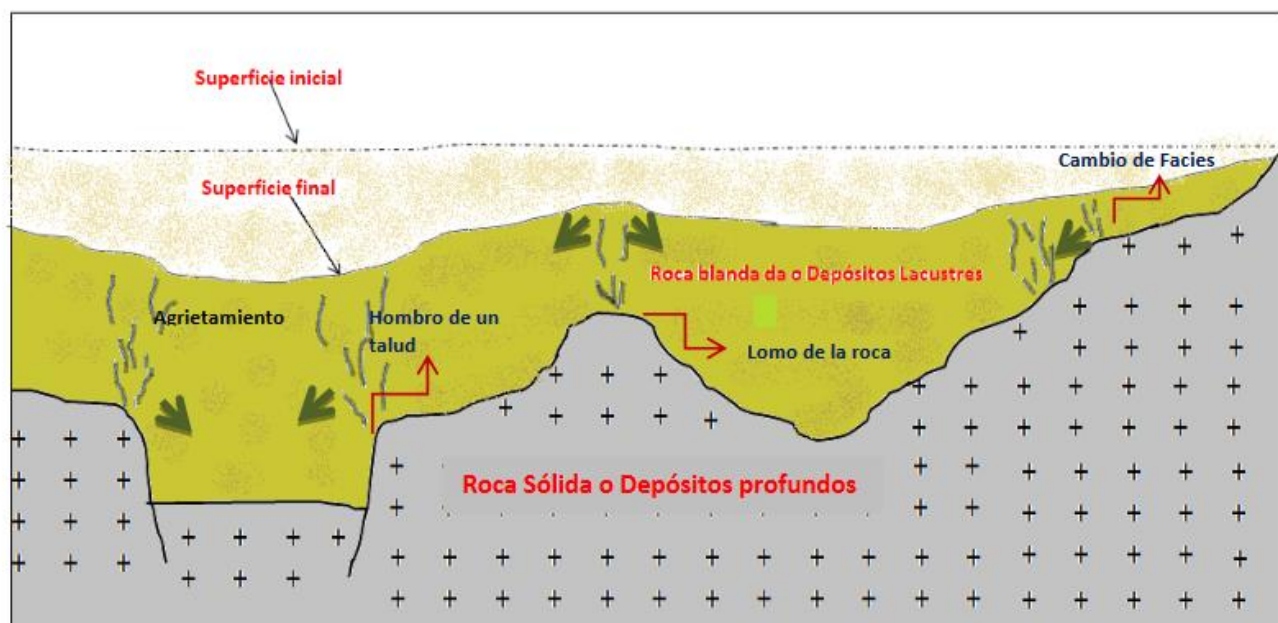


Fig. 3. Esquema simplificado del agrietamiento superficial inducido por la forma del basamento en una fosa tectónica o graben. CENAPRED, 2014.

Los principales factores que determinan la propagación de grietas son el desequilibrio mecánico producido por sobrecarga estática y dinámica y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo como agua, petróleo o gas (SMMS, 2017). En general el agrietamiento de un cuerpo se puede generar por cualquiera de los modos descritos o por la combinación de ellos, las grietas pueden ser controladas si se modifica el estado de esfuerzos en la masa del suelo por medio del uso de rellenos aplicados progresivamente para reducir los esfuerzos de tensión en el vértice de la grieta.

Las grietas pueden desarrollarse o propagarse de tres distintos modos (Fig. 4):

- a) **Por tensión:** este tipo de grietas se generan cuando un esfuerzo de tensión separa entre sí las caras de la grieta, es decir, se observa una abertura simétrica con desplazamiento relativo entre las caras correspondientes perpendicular a la superficie de la fractura, se aplica tensión normal al plano de fractura.
- b) **Por tensión cortante o deslizamiento:** las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra en dirección perpendicular a su vértice por la separación asimétrica por lo que se presenta un desplazamiento tangencial y perpendicular al frente de la grieta denominándose falla a causa del movimiento ocurrido.
- c) **Por rotura transversal o por tensión cortante y torsión:** las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra pero con un desplazamiento paralelo al frente de la grieta y ocasionado por la inducción de un esfuerzo de torsión.

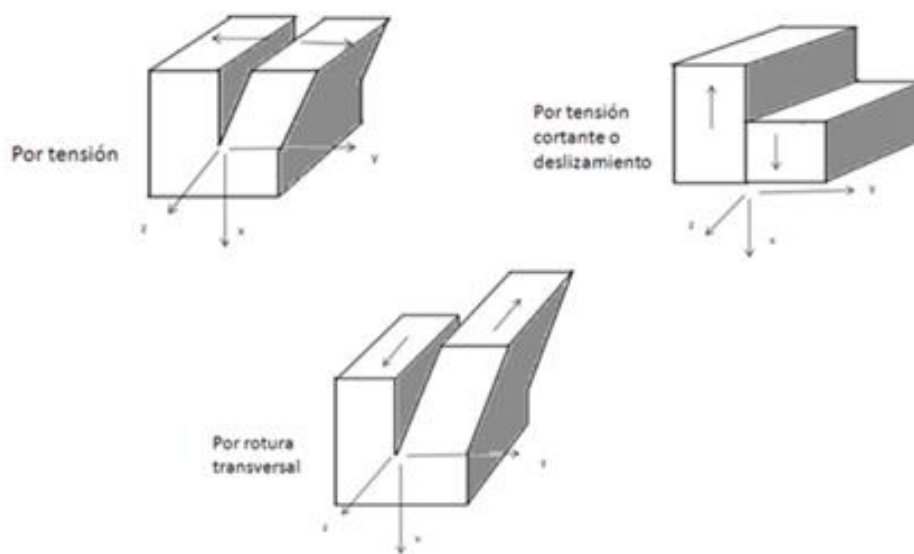


Fig. 4. Clasificación de la propagación de grietas a) Por tensión, b) Por tensión cortante o deslizamiento, c) Por rotura transversal.

EL ORIGEN DE LOS HUNDIMIENTOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La formación geológica de la cuenca de México se dio hace 600 mil años, y pertenece al relieve del Sistema Volcánico Transversal (Lugo, 1990), se originó cuando las lavas depositadas por el vulcanismo de las sierras Nevada, Las Cruces y posteriormente la sierra Chichinautzin (Aguilar et al., 2003), formaron la base en donde se acumularían los depósitos aluviales que constituyen en la actualidad el acuífero superior de la cuenca de México, que tiene entre 600 o 700 m de espesor, y en donde se asienta la actual Ciudad de México (Fig. 5). De acuerdo con un estudio realizado por el Dr. Auvinet (2009, 2011), el ingeniero Roberto Gayol fue el primer investigador en informar que la ciudad de México se estaba hundiendo, observa que desde finales del siglo XIX (1891) y principios del XX (1921) varias construcciones comenzaron a hundirse y documentó las primeras grietas que aparecen en la ciudad en 1925, sugiriendo que una de las principales causas era el desagüe de la Ciudad de México, demostrando que la extracción desmedida del agua de los pozos artesianos y profundos, era responsable de los diversos hundimientos.

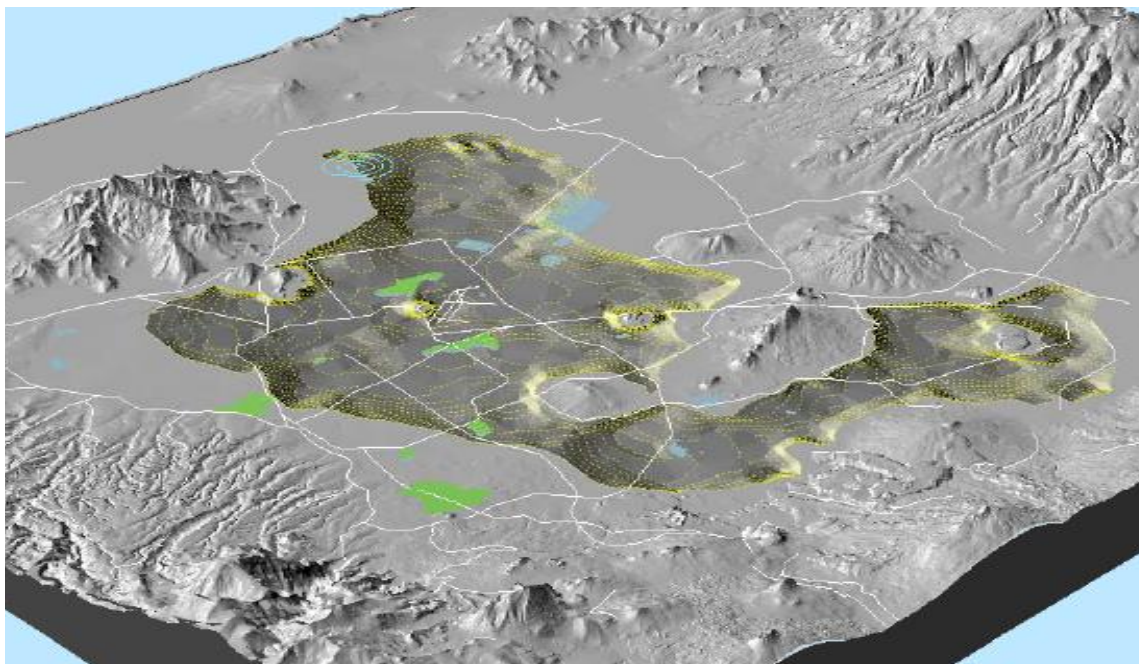


Fig. 5. Modelo de la cuenca de México (Auvinet, 2009).

Sin embargo, no es hasta 1947, cuando el Dr. Nabor Carrillo confirma la hipótesis de Gayol y formaliza las investigaciones que en un inicio fueron teorías empíricas y observaciones que suponían la hipótesis de la extracción de agua, posteriormente se recopilaron datos de 2,215 bancos de nivel (**DGCOH**) (Fig. 6), para diferentes periodos de tiempo distribuidos en todo el valle de México.

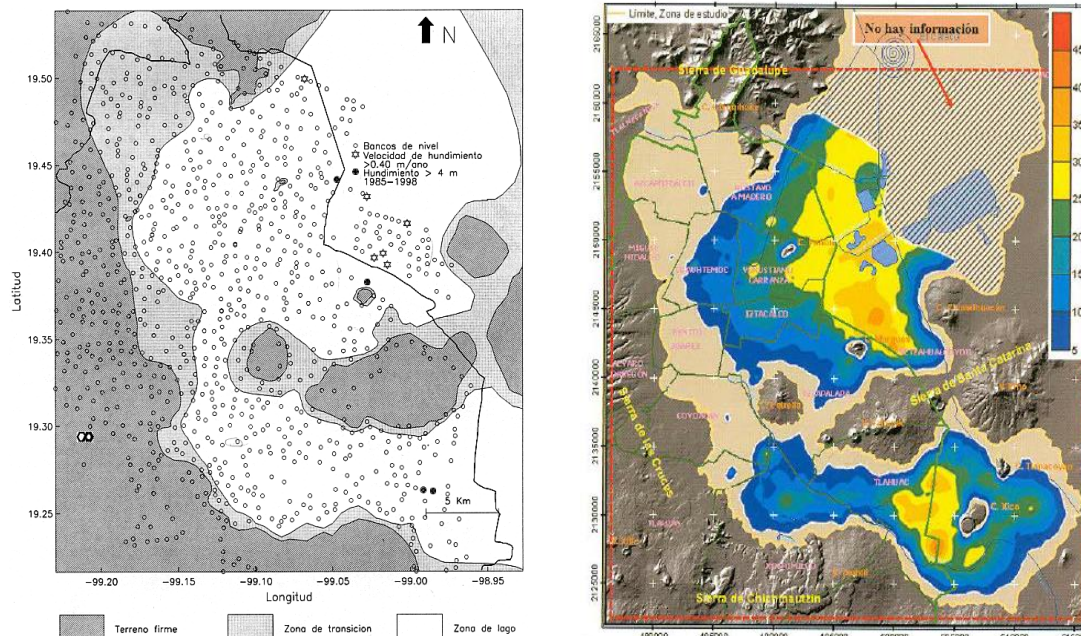
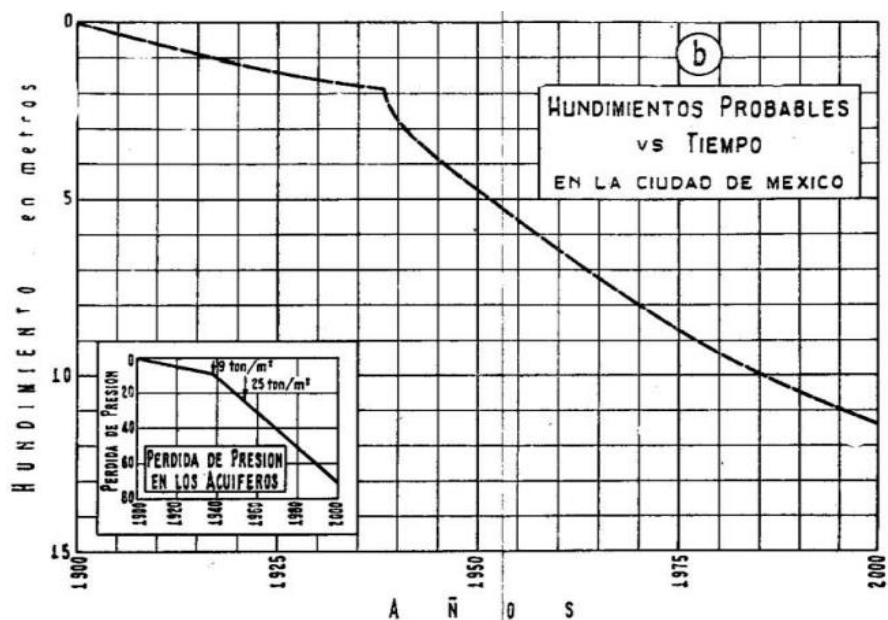


Fig. 6. Bancos de nivelación (Aguilar 2003); Rango de subsidencia 2000-2005 (Auvinet, 2009).

Los sedimentos lacustres tienen propiedades mecánicas muy singulares que no están dentro de los patrones de comportamiento de la mayoría de suelos, su comportamiento mecánico resulta muy complejo tanto en lo estático como dinámico porque es en tres dimensiones. El análisis de la componente horizontal de los movimientos tectónicos es de vital importancia; sin embargo, en la Cuenca de México los suelos no pueden considerarse dentro de una clasificación simple, debido a que los sedimentos que la componen son heterogéneos, volcánicos, lacustres con una proporción y variedad de microfósiles que forman parte de la microestructura del suelo (Díaz Rodríguez, 1998).

El hundimiento regional de la Ciudad de México es de trascendental importancia para su desarrollo futuro, debido a las conexiones que dicho hundimiento tiene con el abastecimiento de agua potable, con las inundaciones ocurridas en zonas urbanizadas y con el comportamiento de casas y edificios. Las Alcaldías como Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, ya presentan signos importantes de este fenómeno.

De acuerdo con Marsal y Sainz, 1956, realizaron una estimación del hundimiento de los Ciudad de México para los próximos 30 años el que fue calculado en 20 m, con respecto a los medidos hasta ese año (Fig. 7).



NOTA. La curva de hundimientos fue calculada a partir de las propiedades medias de la formación arcillosa, suponiendo que la pérdida de presión en los acuíferos se mantendrá constante e igual a 1 ton/m² año en el futuro y que ella tuvo la evolución que se indica en la gráfica adjunta.

Fig 7. Curva de Hundimientos probables de 1900 al año 2000 según Marsal y Sainz, 1956.

TÉCNICA INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL PARA EL FENÓMENO DE HUNDIMIENTO

Para el análisis de hundimientos, actualmente se llevan a cabo métodos de Percepción Remota, los cuales utilizan imágenes de satélite, específicamente de tipo RADAR, que son..., así como técnicas de procesamiento de imágenes, para este caso se utilizó la Interferometría Diferencial (InSAR), que es la técnica factible para medir el hundimiento diferencial en grandes áreas, como lo es la Ciudad de México.

El uso de imágenes de satélite obtenidas mediante sensores tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) los cuales pueden ser terrestres o aerotransportados (montados en, aviones, UAV's o satélites) que orbitan alrededor del planeta, y junto con la utilización de técnicas InSAR, permiten obtener información sobre el desplazamiento de la superficie del terreno (o de objetos ubicados sobre ésta, así como infraestructuras, edificios, muros, etc.) con un rango de movimiento que va desde milímetros hasta metros.

El procesamiento InSAR, se basa en la estimación del cambio de fase de la señal de radar desde dos o más tomas simultáneas generadas por dos antenas o en varias adquisiciones de la misma escena por la misma antena en distintos periodos de tiempo (Hanssen, 2001) (Fig. 8). Las fases para generación de producto InSAR se mencionan de la siguiente manera: Co-registración la cual se aplica debido a que las variaciones de las orbitas las

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 11 de 37



2020
LEONORA VICARIO

cuales producen cambios en la geometría de iluminación, por lo que para hacer el promedio de varias imágenes en diferentes tiempos se requiere una co-registración de las mismas.

El interferograma se obtiene al calcular la diferencia de fase de las dos imágenes que forman el par interferométrico (Lira-Chávez, 2010). Coherence Change Detection, consiste en estimar la diferencia de fase asociada a la razón de cambio entre objetos o fenómenos geodinámicos a partir de pares interferométricos adquiridos en distintas fechas pero en términos de la magnitud de la señal (Hanssen, 2001). b) El radar polarimétrico realiza su trabajo a través del control de las propiedades de comportamiento de la dirección del campo eléctrico de las ondas de radar y la adquisición de las propiedades de un objeto de la escena, todo esto a partir del comportamiento de dispersión al interactuar las ondas con el objeto (Henderson y Lewis, 1998) (Fig. 9). A partir de las propiedades polarimétricas de la imagen (HH, VV), se obtendrá el descriptor de textura (Para este trabajo se asocian a depósitos de coladas de lava, flujos piroclásticos y lahares). Este, a su vez, se obtiene de una matriz de coherencia que permite estimar parámetros de descomposición: Entropía, Anisotropía y Lambda.

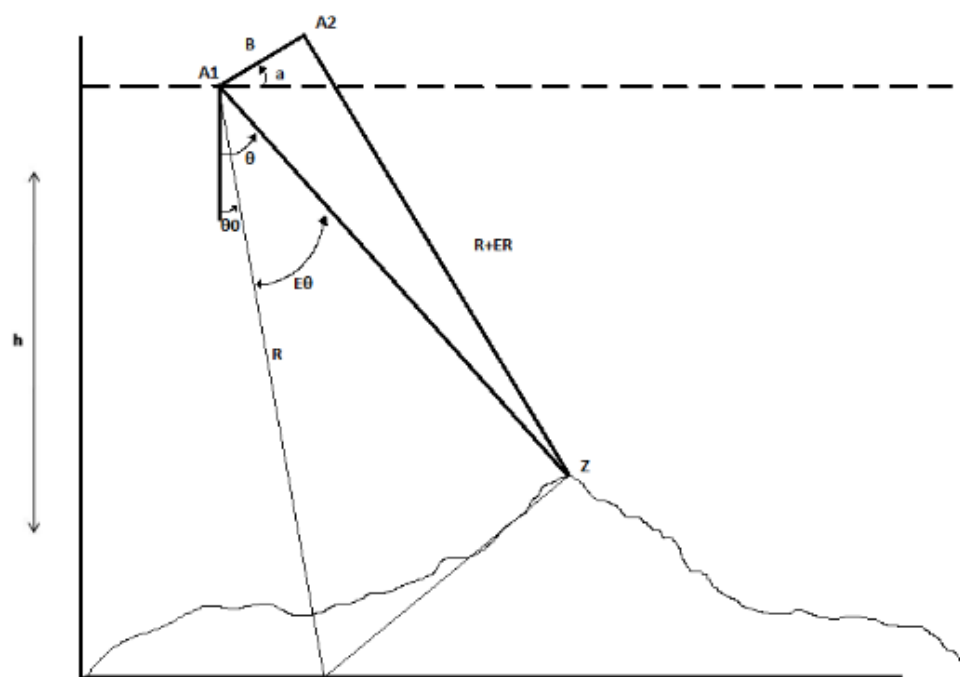


Fig. 8. Geometría básica de un par interferométrico derivada entre dos antenas A1 y A2: h: altura de la antena R: alcance inclinado (rango), ER: diferencia de longitud de la trayectoria entre las dos antenas, θ : ángulo de vista, α : ángulo de la línea de base con respecto a su horizontal (cuando el ángulo es formado entre R y el vector de línea de base corresponde al ángulo de depresión B). (Fuente Elachi y Van Zyl, 2006).

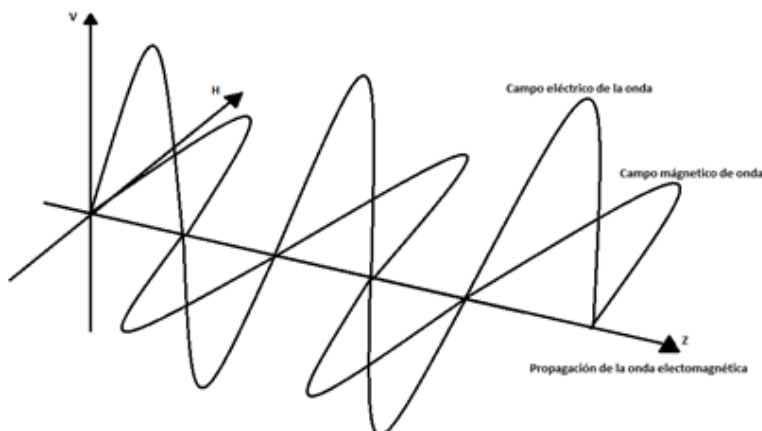


Fig. 9. Polarización de una onda electromagnética la cual está conformada por un campo-vector eléctrico y un campo-vector magnético, dando lugar a ángulos rectos entre los dos campos y transversos a la dirección de propagación (modificado de Elachi, 1988).

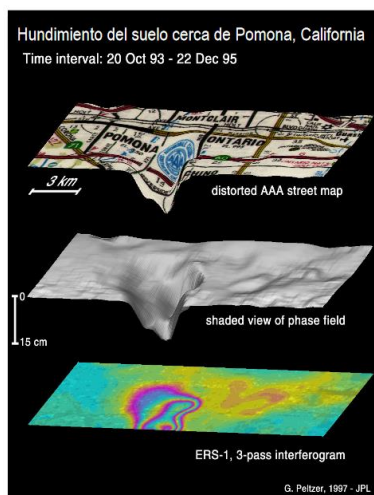


Fig.. 7 Aplicación de la Técnica InSAR en Pomona, California, tomando datos de octubre de 1993 a diciembre de 1995. Fuente: NASA,s Applied Remote Sensing Training Program.

CALCULO DE HUNDIMIENTO CON INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL USANDO LA TÉCNICA DOUBLE-PASS

Para el cálculo del hundimiento se utilizaron técnicas de percepción remota aplicada: una fue la descarga de imágenes de satélite Sentinel 1, y la segunda fue la obtención de imágenes del servidor Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Primero se realizaron series de tiempo con la variante de interferometría diferencial SBAS (Small Baseline Subset), utilizando el software Envi 5.0 y su módulo SARSCAPE 5.2, obteniéndose patrones de desplazamiento vertical (Fig. 10). Para verificar los alcances de

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 13 de 37



esta técnica, se había considerado hacer una comparación de resultados utilizando las nivelaciones topográficas realizadas como parte de los trabajos del Comité de Grietas para la Reconstrucción de la Ciudad de México; sin embargo, dichos levantamientos no fueron proporcionados al CENAPRED, lo cual hubiera sido punto de comparación con una técnica directa de medición, utilizando el software antes mencionado.

Dada la restricción de información, se optó por usar una variación de la metodología conocida como Interferometría Diferencial en pares. Para ello, se utilizó otro software distribuido de manera gratuita por la Agencia Espacial Europea llamado Sentinel Application Platform (SNAP), versión 6.0. (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>).

De la plataforma digital Copernicus Acces Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>), se descargaron las imágenes para la generación del interferograma. Las imágenes utilizadas son:

- **Master: SIA_IW_SLC_ISDV_20181123T122545_20181123T122612_024715_02B7D4_BEC8**
- **Esclava: SIA_IW_SLC_ISDV_20200105T122549_20200105T122616_030665_0383BE_D596**

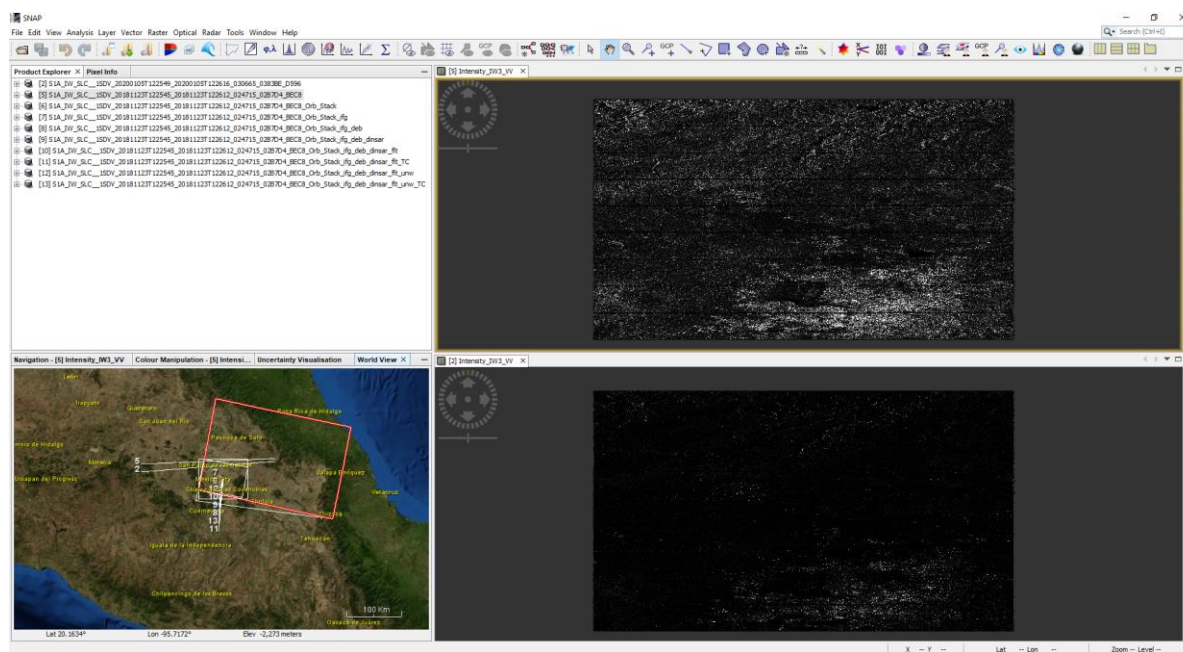


Fig. 10. Se muestra la intensidad de la señal de las dos imágenes utilizadas. Los valores de la intensidad visualmente no expresan grandes datos debido a la geometría de adquisición del satélite, además de la señal.

Como parte del procedimiento se genera un interferograma (Fig. 11), del cual tiene que ser eliminado el bandeo generado en la adquisición de la imagen utilizando el comando “DEBURST”. Adicionalmente se tiene que eliminar la fase topográfica del interferograma y

remover el ruido de fase para conservar los bordes marginales utilizando el filtro Goldstein Phase Filtering.

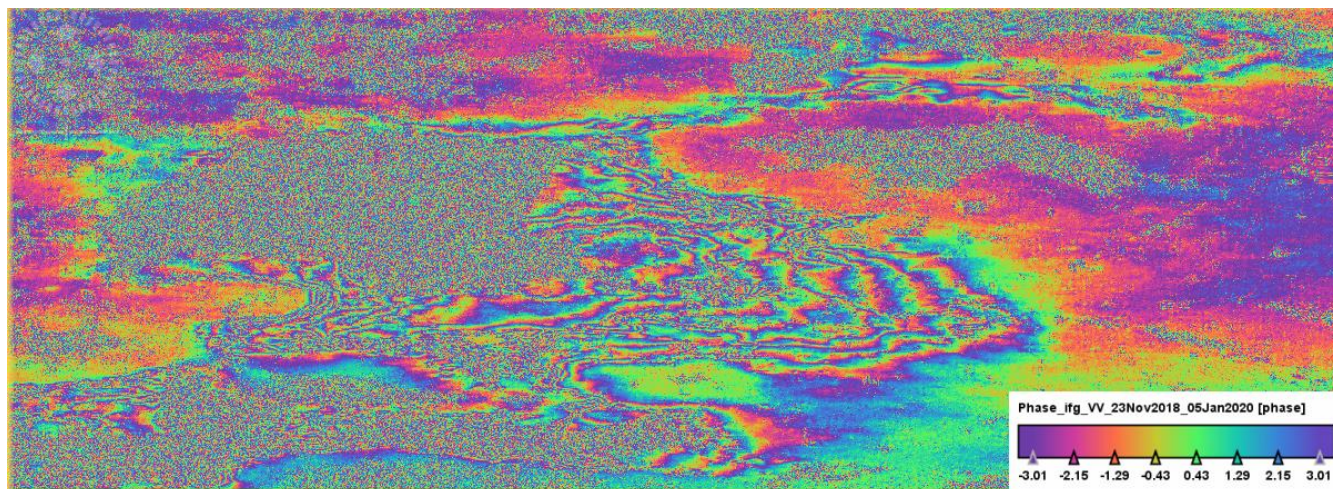


Fig. 11. Se muestra el interferograma sin la fase topográfica y con la aplicación del filtro Goldstein Phase Filtering. Este interferograma se encuentra con la fase envuelta y se expresa en valores de 2π . Sobre este procesamiento aún no se aplica la corrección geométrica, por lo que no tiene un sistema de coordenadas definido.

En la siguiente Fig. 12, se muestra el interferograma de la Fig. 11, pero ahora con corrección geométrica.

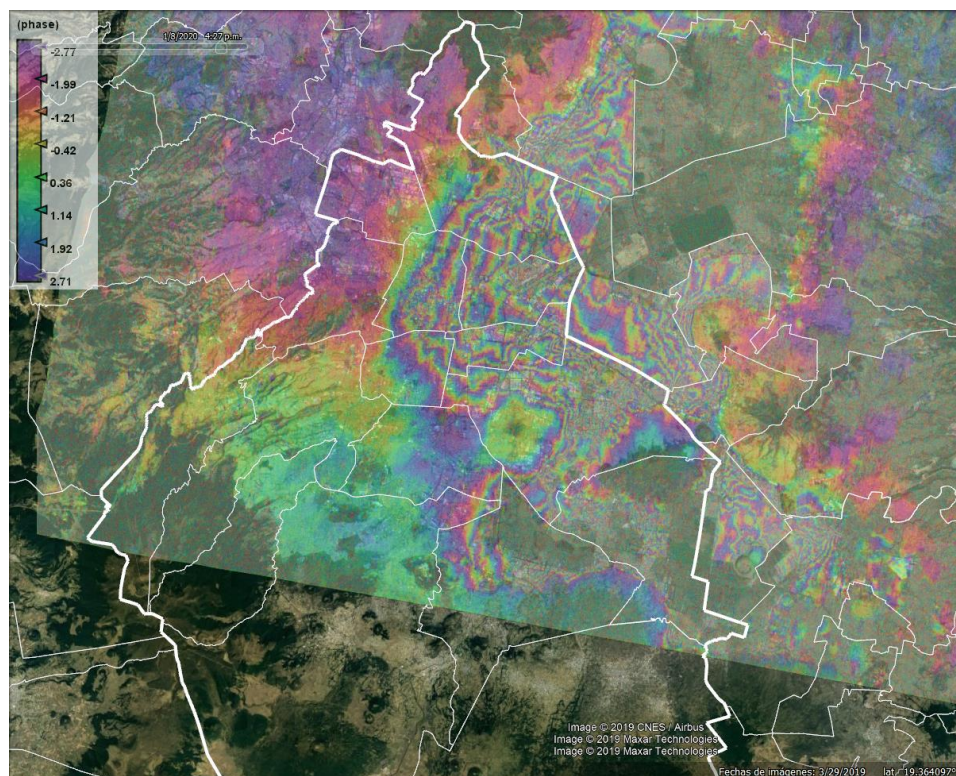


Fig. 12. Se muestra el interferograma con corrección geométrica sobre el software Google Earth.

Dentro de la imagen se pueden visualizar una serie de colores que en algunas zonas que forman “franjas”, relacionadas con las zonas de mayor tensión por el hundimiento regional. En la Fig. 13, se muestra el mismo interferograma de la Fig. 4, en el cual también se muestra los agrietamientos detectado en el trabajo de Dora Carreón.

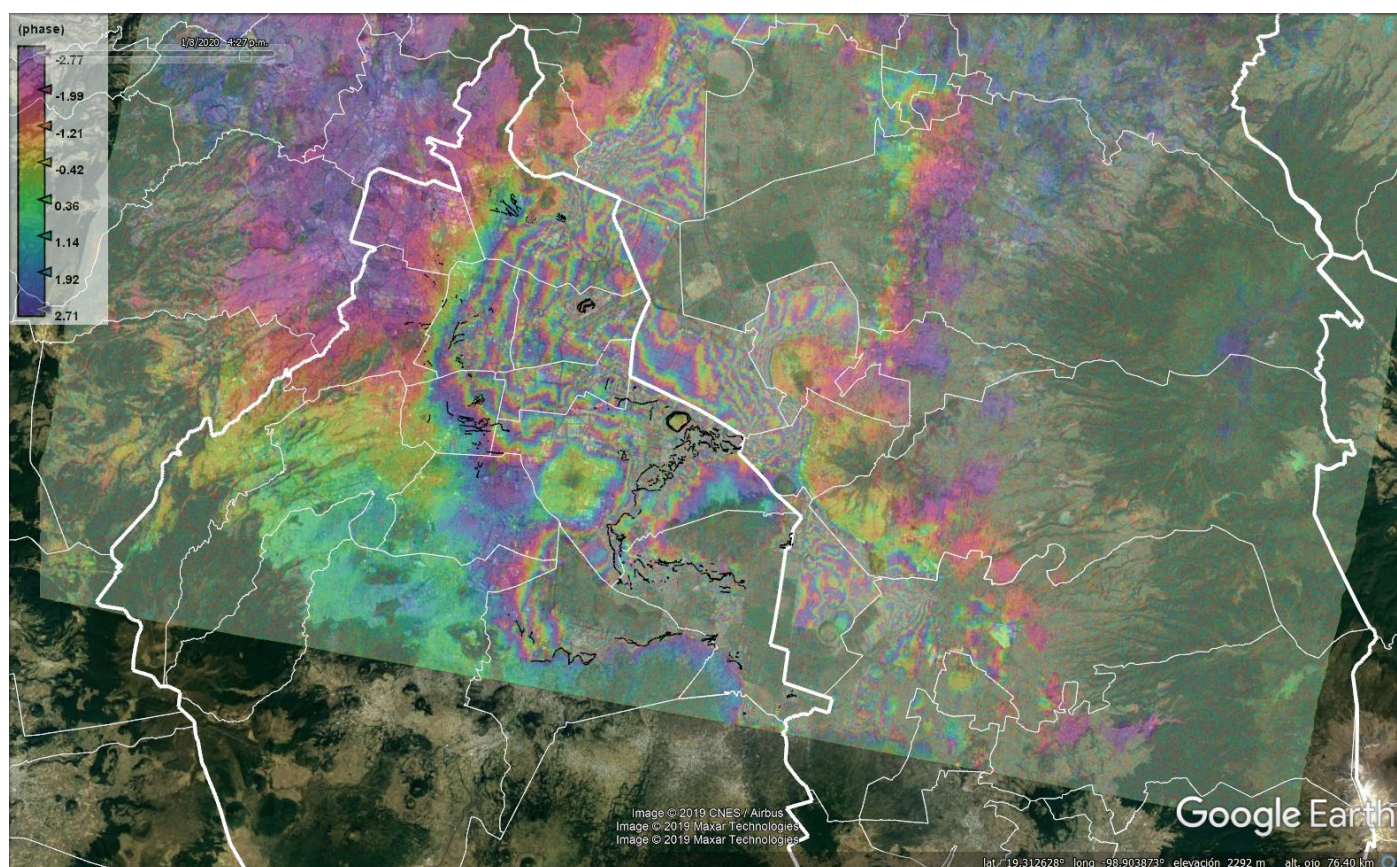


Fig. 13. Se muestra el interferograma y la sobre posición de las grietas identificadas en el trabajo de la Dra. Dora Carreón.

En un acercamiento sobre el interferograma a la zona sureste de la Ciudad de México (Fig. 14 y 15), se pueden observar los desplazamientos descrito anteriormente, donde las grietas se concentran sobre la mayor acumulación de franjas.

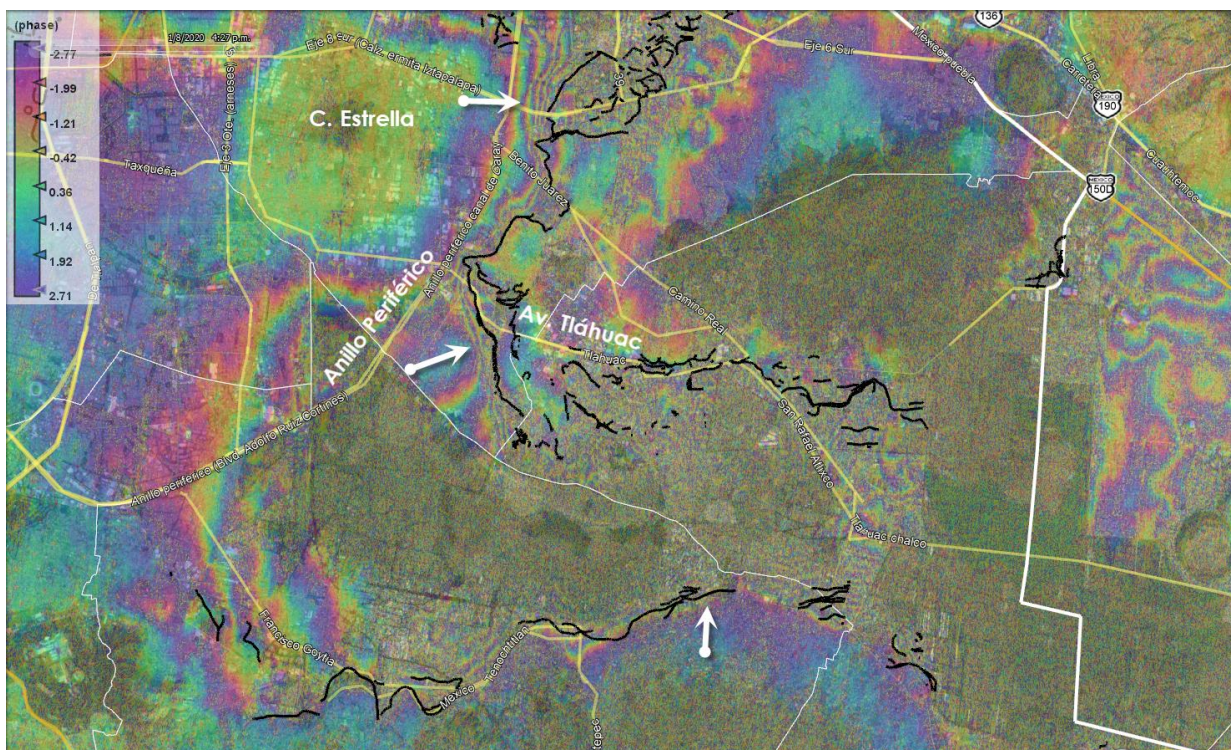
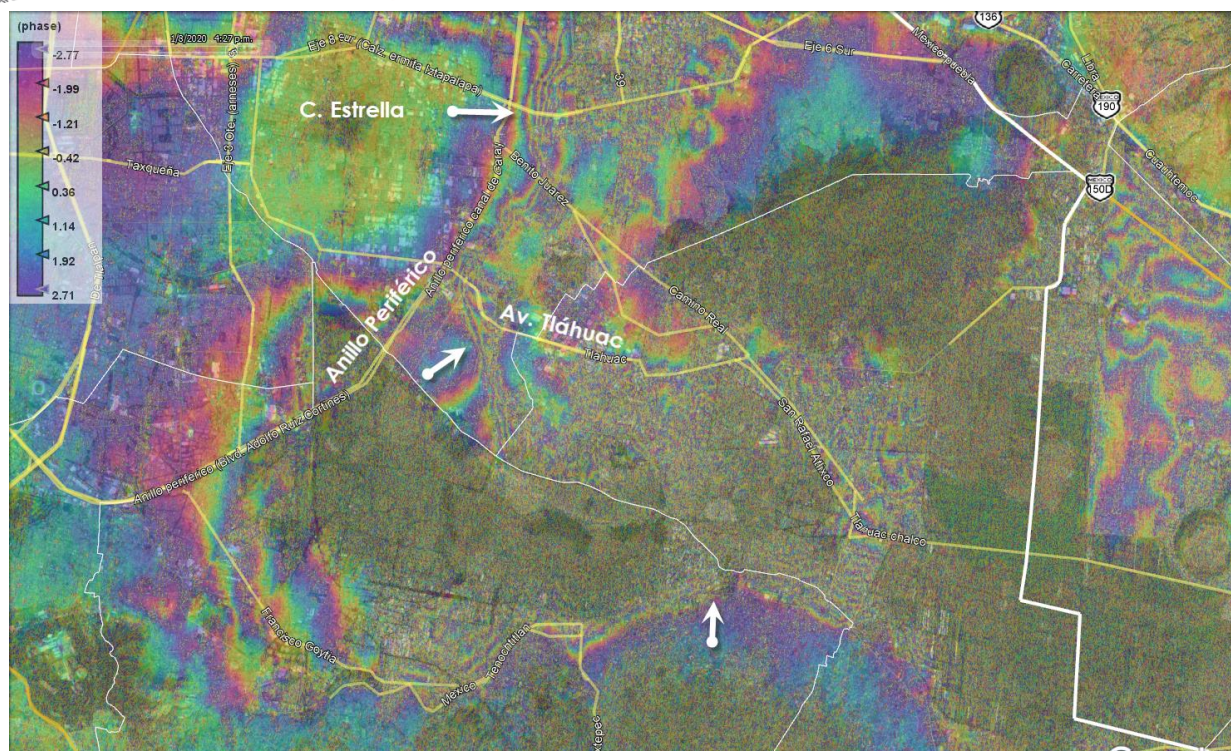


Fig. 14 y 15. En la imagen superior se muestran el interferograma y las “franjas” de colores, mientras que en la imagen inferior se muestra el mismo interferograma junto con las grietas (líneas negras) detectadas por la Dra. Dora Carreón. Las flechas en color blanco describen algunas zonas con alta concentración de “franjas”.

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 17 de 37



2020
LEONA VICARIO



Después de desenvolver la fase con el software SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping), creado por Chen y Zebker, 2002 (<https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>), se obtuvieron los valores de hundimiento los cuales se pueden visualizar en la Fig. 7. Para corregir el retraso atmosférico se utilizó el algoritmo “Generic Atmospheric Correction Online Service for INSAR” (GACOS) (Yi, et, al., 2018).

GACOS utiliza el modelo de descomposición troposférica iterativa propuesto por Yu et al., 2018, separa las señales estratificadas y turbulentas de los retrasos troposféricos, y genera mapas de retardo total de alta resolución espacial para corregir las mediciones InSAR y otras aplicaciones. Los conjuntos de datos utilizados en GACOS incluyen:

- Modelo meteorológico ECMWF de alta resolución con resoluciones de 0,125 grados y 6 horas;
- SRTM DEM (90 m, S60-N60);
- ASTER GDEM (90 m, N60-N83, S60-S83);

Finalmente se obtuvo el mapa de hundimiento el cual muestra valores de hundimiento que van desde cm, representados en colores azules, hasta los 30.63 cm (máximo), representados en color rojo. De acuerdo con el mapa, el hundimiento máximo se encuentra en el municipio de Nezahualcóyotl y la alcaldía Iztapalapa.





Hundimiento Regional de la Ciudad de México 2019 - 2020

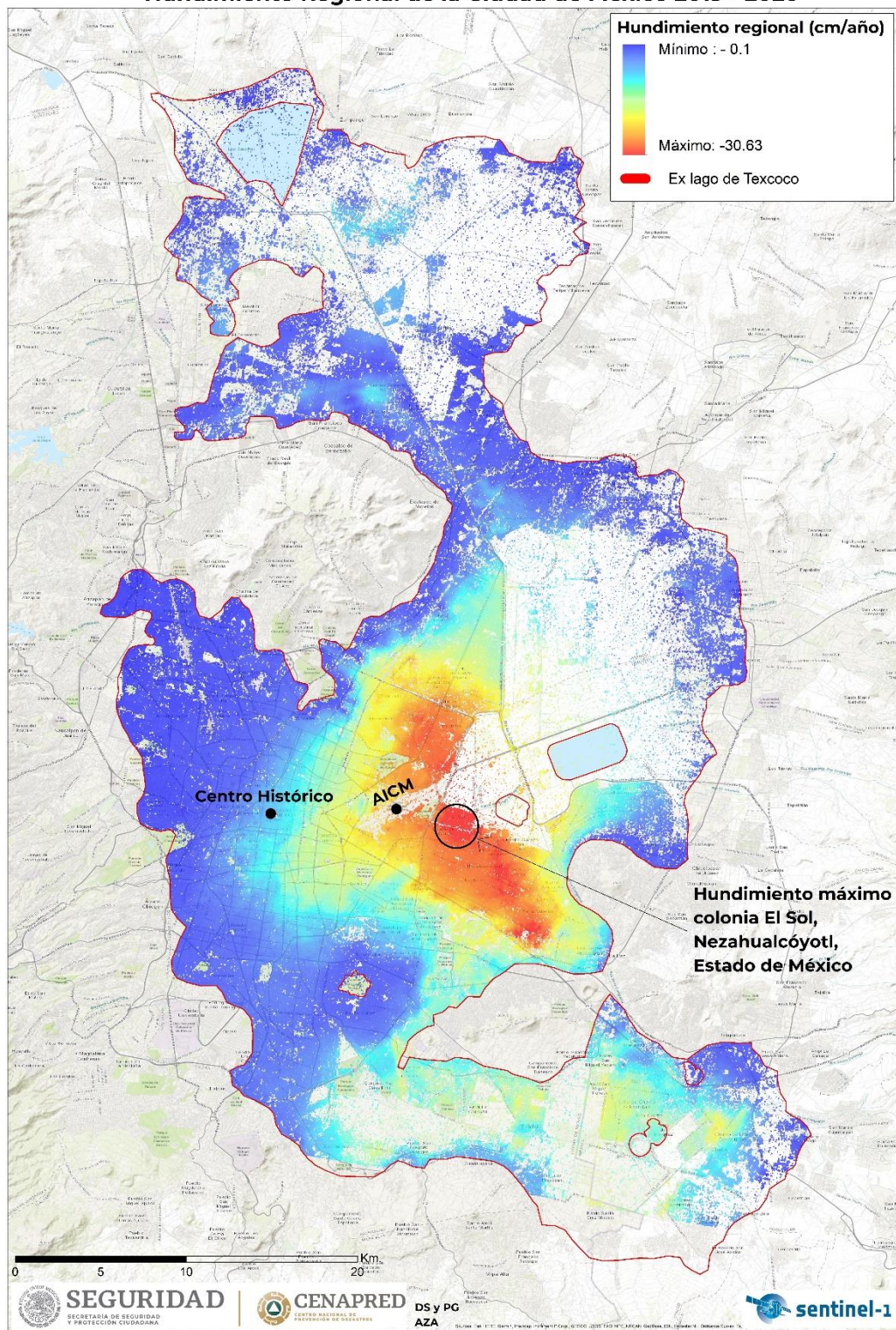


Fig. 16. Hundimiento regional de la Ciudad de México 2019-2020

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 19 de 37





En comparación con otros trabajos realizados se realizó una comparación encontraron los datos que se describen en la siguiente tabla:

PLATAFORMA	BANDA	Técnica	Temporalidad	Hundimiento anual (cm)	Autor
ENVISAT ASAR	C	SBAS	2002-2007	38.23	López, 2017
ENVISAT ASAR	C	PSI	Enero 2004 – mayo 2007	30	Yan, et al.,
ALOS PALSAR	L	SBAS	11 Feb 2007 - 07 Jan 2011	30	Chaussard, 2014
ENVISAT-ASAR		PSI	2002 - 2010	35.2	Poreh, et al., 2019
Sentinel 1	C	ISBAS	2014-2015	33	Sowter, et al., 2016
Sentinel 1	C	Dual Pair	Dic 2018 – Enero 2020	30.63	Este trabajo

USO DE EQUIPO VANT PARA EL ANÁLISIS DEL HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO

Hoy en día el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) en el ámbito civil, específicamente en el estudio de fenómenos naturales, está experimentando un notable aumento, debido a los grandes beneficios que aporta este tipo de sistemas. Y es que el empleo de estas aeronaves eleva sustancialmente el grado de eficiencia, mapeo y seguridad cuando se necesitan realizar misiones complejas. Gracias a los avances tecnológicos, reducción de costos y de tamaño de los sensores relacionados al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), vuelos pre-programados, IMUs (unidades de movimiento inercial) y auto-pilotos, esta tecnología puede llenar algunas vacíos del conocimiento, mejorando la resolución espacial y temporal de los sistemas de sensores remoto-actuales más comunes.

Los VANTs presentan varias ventajas con respecto al uso de los vehículos tripulados o los satélites, como tener acceso a zonas de geografía complicada a baja altura y obtener imágenes de alta resolución a muy bajo costo (Ojeda, et al. 2017d). La integración de sensores de imágenes con sensores de posición (Global Navigation Satellite System - GNSS) en la plataforma del VANT posibilita el georeferenciamiento directo, permitiendo los procesos de generación de Modelo Digital de Superficie (MDS) y de ortoimágenes,



herramientas utilizadas en esa investigación buscando la identificación de agrietamientos sobre en calles (Bento, 2008).

Para este trabajo se contó con un VANT, modelo Phantom 4 Pro perteneciente a la Subdirección de Riesgos Estructurales, el cual se utilizó para sobrevolar la zona limítrofe entre las alcaldías Iztapalapa y Tláhuac (Fig. 17). Con este VANT se adquirieron alrededor de 1000 imágenes para la generación de ortoimágenes y modelos digitales de superficie (MDS), con los cuales se generaron insumos cartográficos de muy alta resolución (MDS de 2 cm y ortoimágenes de 1.2 cm en el valor del pixel), lo que permitió estudiar espacialmente las grietas.

En las imágenes de la Fig 17. se pueden apreciar una ortoimagen de la Colonia del Mar, Tláhuac y una en la colonia Unidad Habitacional Cananea, alcaldía, Iztapalapa.

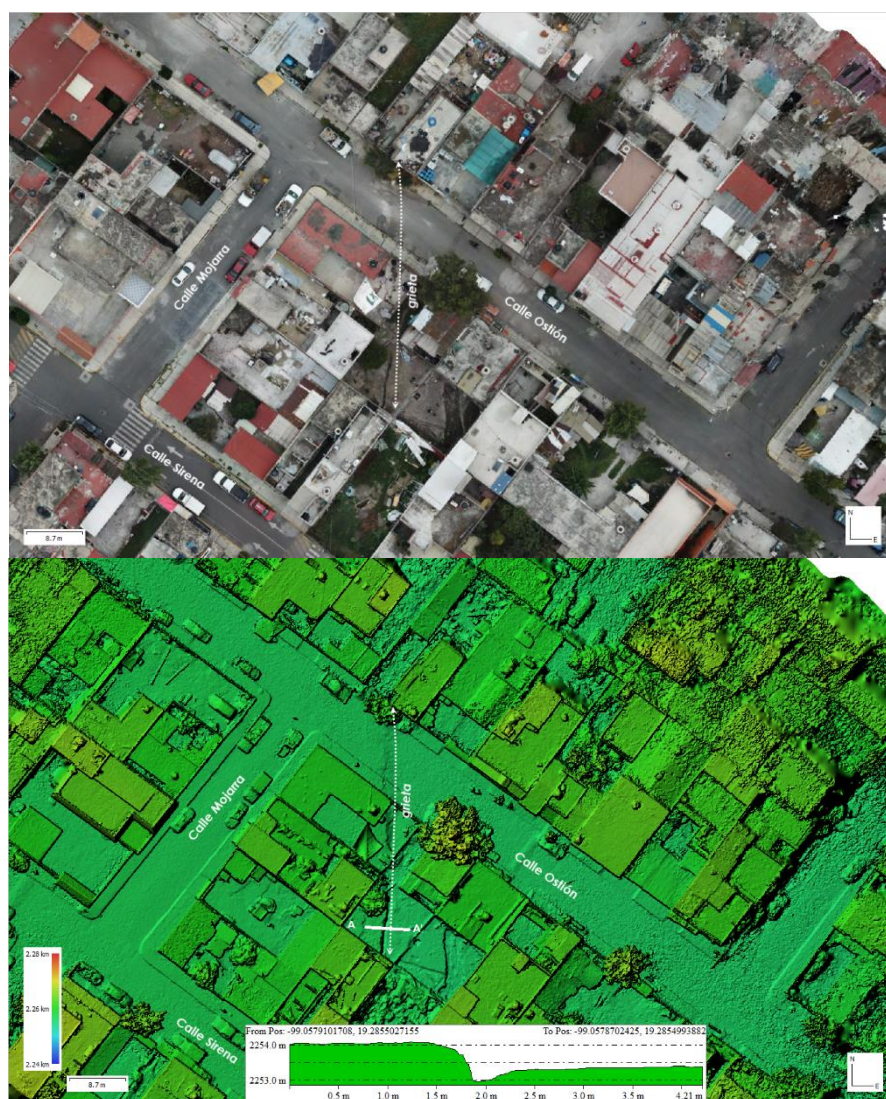


Fig. 17. Ortoimagen (superior) y MDS (inferior), de la Colonia del Mar, Tláhuac.

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 21 de 37

En la ortoimagen, compuesta de 89 imágenes y 1.92 cm de resolución espacial, se aprecia la dirección de la grieta. En el MDS de 1.92 de resolución se aprecia la misma grieta y visualmente se aprecian otros rasgos en comparación con la ortoimagen. Dentro del MDS se encuentra un perfil (A-A'), con dirección oeste-este el cual intersecta la grieta de un metro de escalón.

Otro caso de estudio fue el realizado en el Parque Cananea dentro del territorio de la Alcaldía Iztapalapa, en donde también se realizaban estudios geotécnicos contratados por el comité de Grietas para la Reconstrucción de la CDMX (Fig. 18).

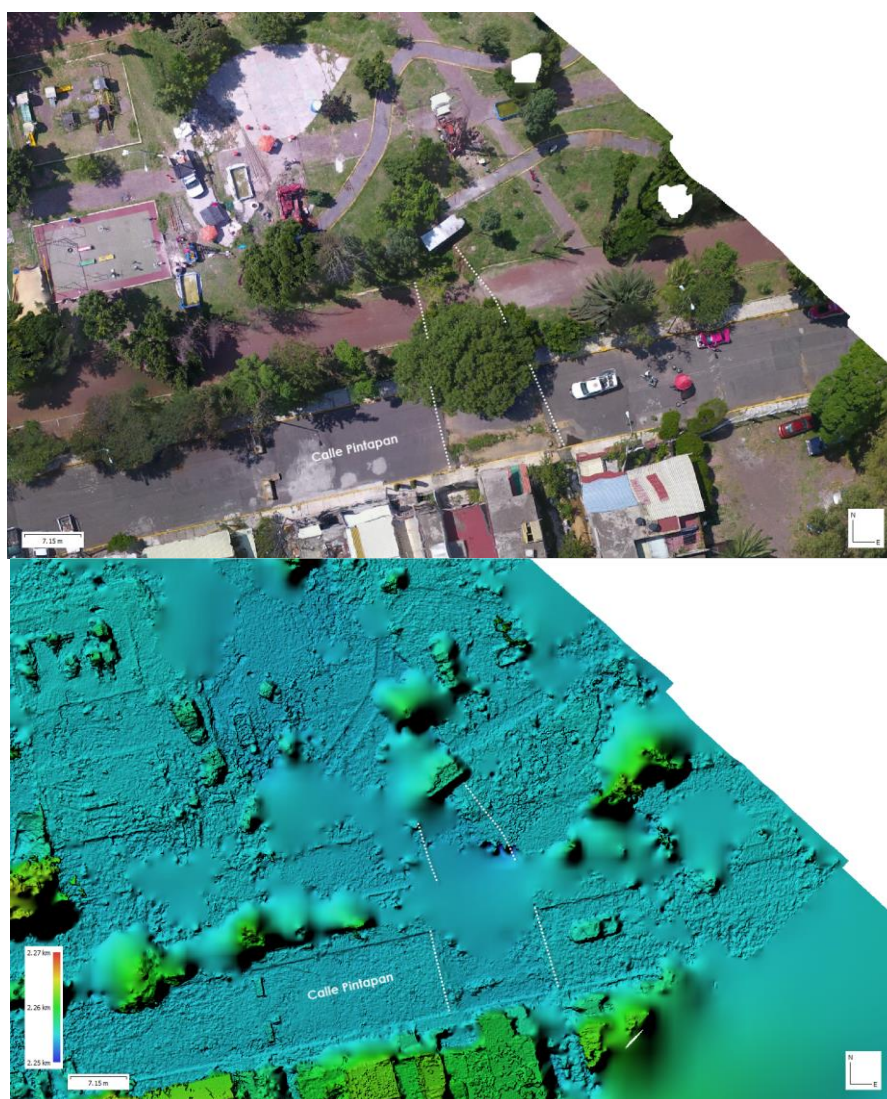


Fig. 18. Ortoimagen (superior) y MDS (inferior), de la Colonia del Mar, Tláhuac.

En la ortoimagen, compuesta de 89 imágenes y de resolución espacial de 2.4 cm, se aprecia la dirección de la grieta. En el MDS, de resolución 2.4 cm, se aprecia la misma grieta y visualmente se aprecian otros rasgos en comparación con la orto imagen. Dentro del MDS se encuentra un perfil (A-A'), con dirección oeste-este el cual intersecta la grieta de un metro de escalón.

Otro de los casos se presenta en la misma Colonia del Mar, Tláhuac



Fig. 19. Ortoimagen (superior) y MDS (inferior), de la Colonia del Mar, Tláhuac.

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 23 de 37

En la ortoimagen, compuesta de 691 imágenes y 2.17 de resolución espacial, se aprecian varios trazos de grietas punteadas en color blanco. En el MDS, de 8.68 cm de resolución espacial, se aprecian las mismas grietas y visualmente se aprecian otros rasgos en comparación con la ortoimagen.

PRUEBAS GEOTÉCNICAS CON EQUIPO PANDA EN LA ALCALDÍA TLÁHUAC

El Penetrómetro Dinámico de Energía Variable (PANDA por sus siglas en francés) es un dispositivo mecánico-electrónico-portátil que se utiliza para determinar, in situ, la variación de la resistencia del suelo en función de la profundidad. Se trata de un equipo compuesto por barras cortas de 50 cm de longitud, que se unen entre sí a una punta cónica. Las barras se hincan en la masa del suelo mediante golpes con un martillo en el cabezal eléctrico (Fig. 20), lo cual permite determinar, centímetro a centímetro, la resistencia del suelo.

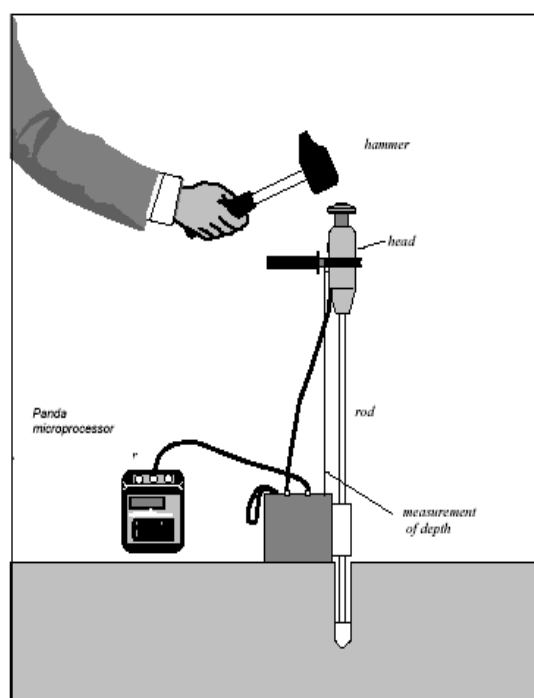


Fig. 20. Esquema de la operación del Penetrómetro Dinámico de Energía Variable (PAN

Una de las ventajas del equipo PANDA es la versatilidad para identificar capas de suelos en lugares de difícil acceso con maquinaria convencional, como pueden ser sótanos, interiores de viviendas, zonas con pendientes. También se puede usar para llevar a cabo estudios geotécnicos de diagnóstico y control de hundimientos, deslizamientos, etc.

Como parte del cálculo del hundimiento regional de la Ciudad de México, se realizaron 40 sondeos con PANDA en diferentes puntos de la alcaldía Tláhuac; con este dispositivo se determinó en los sitios la variación de la resistencia del suelo con la profundidad. A continuación se presenta el mapa de ubicación de los sitios seleccionados para dichas pruebas (Fig. 21).

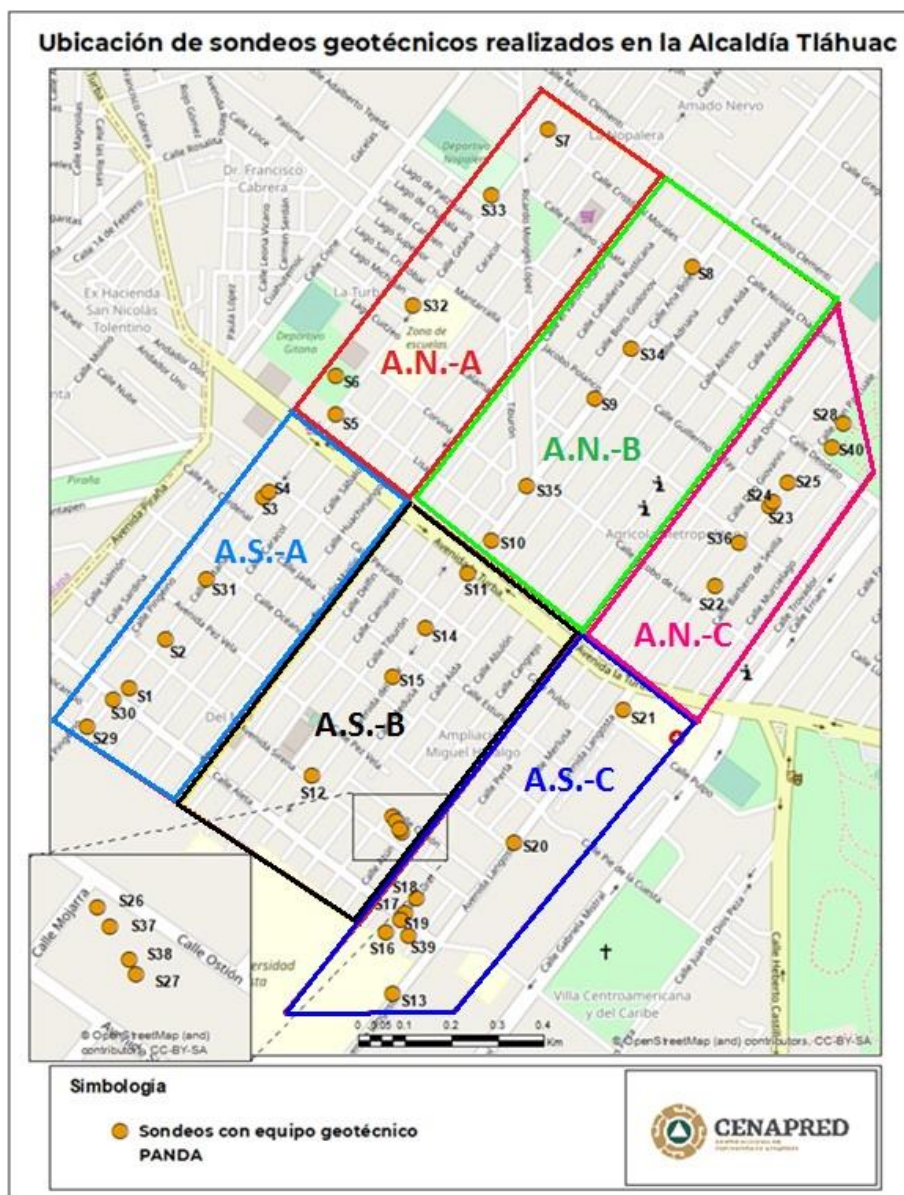
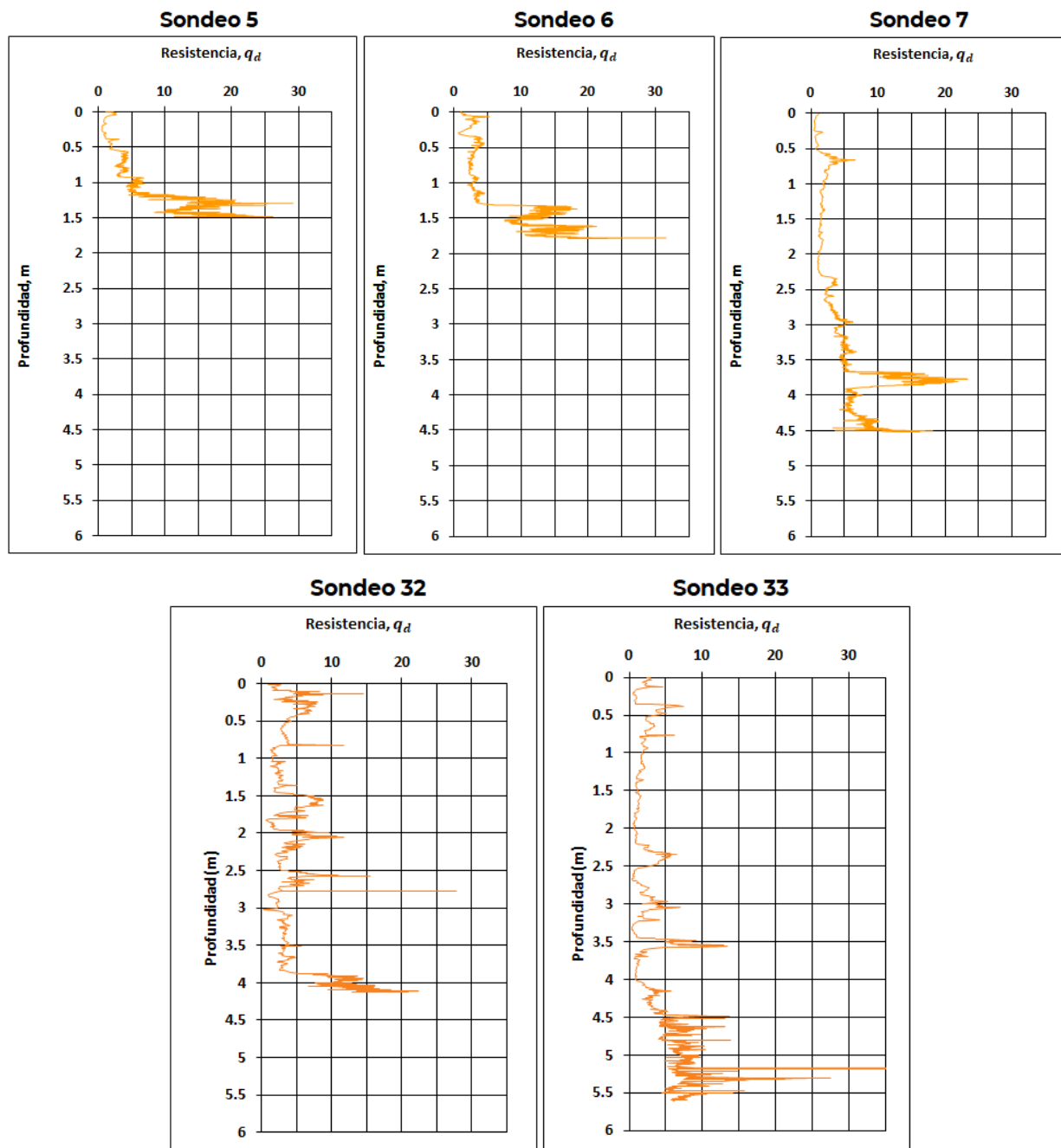


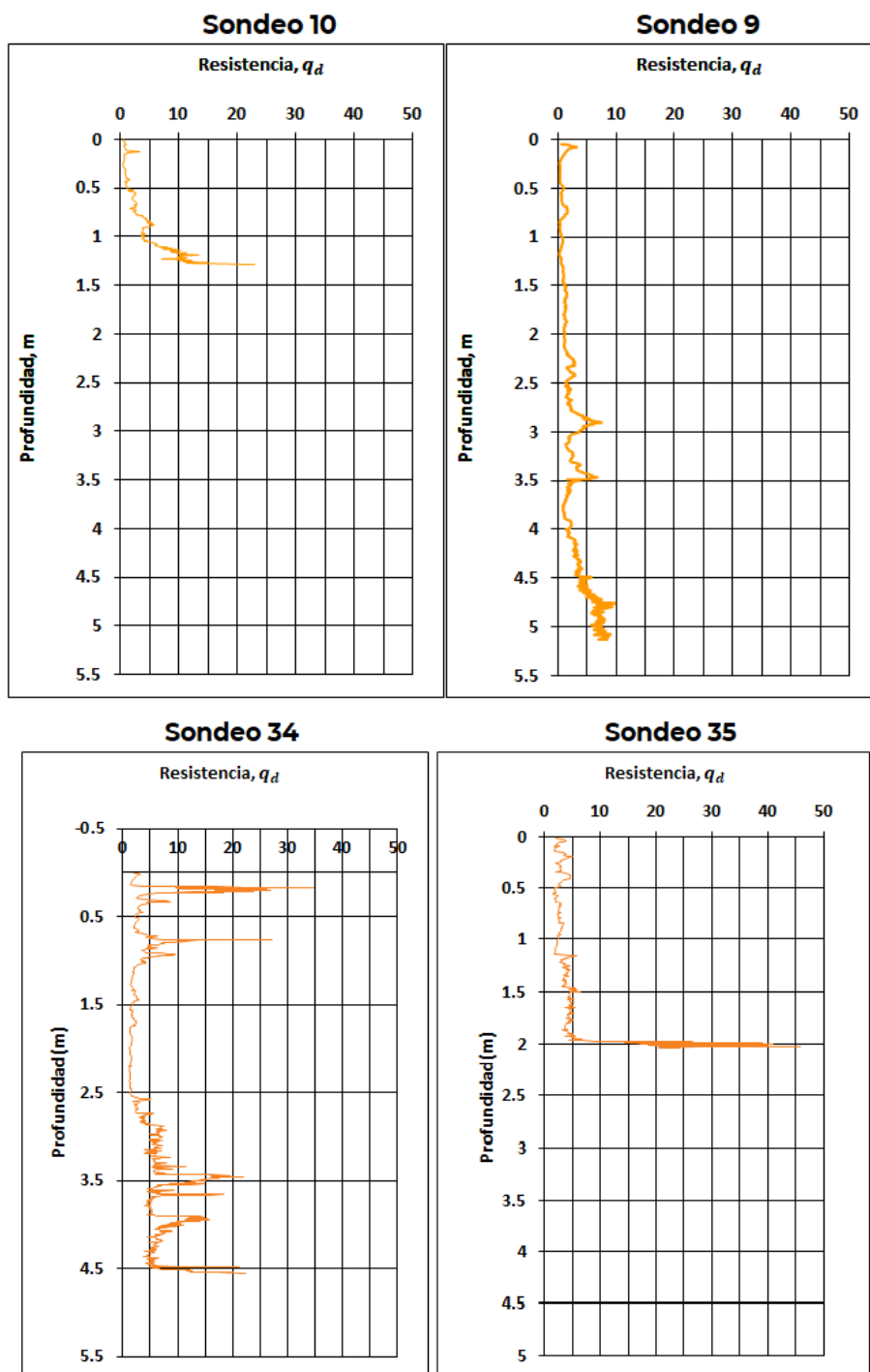
Fig.21. Se muestra el mapa de ubicación de los sitios donde se realizaron los sondeos geotécnicos con equipo PANDA.



PENETROGRAMAS Área Norte-A (A.N.-A)

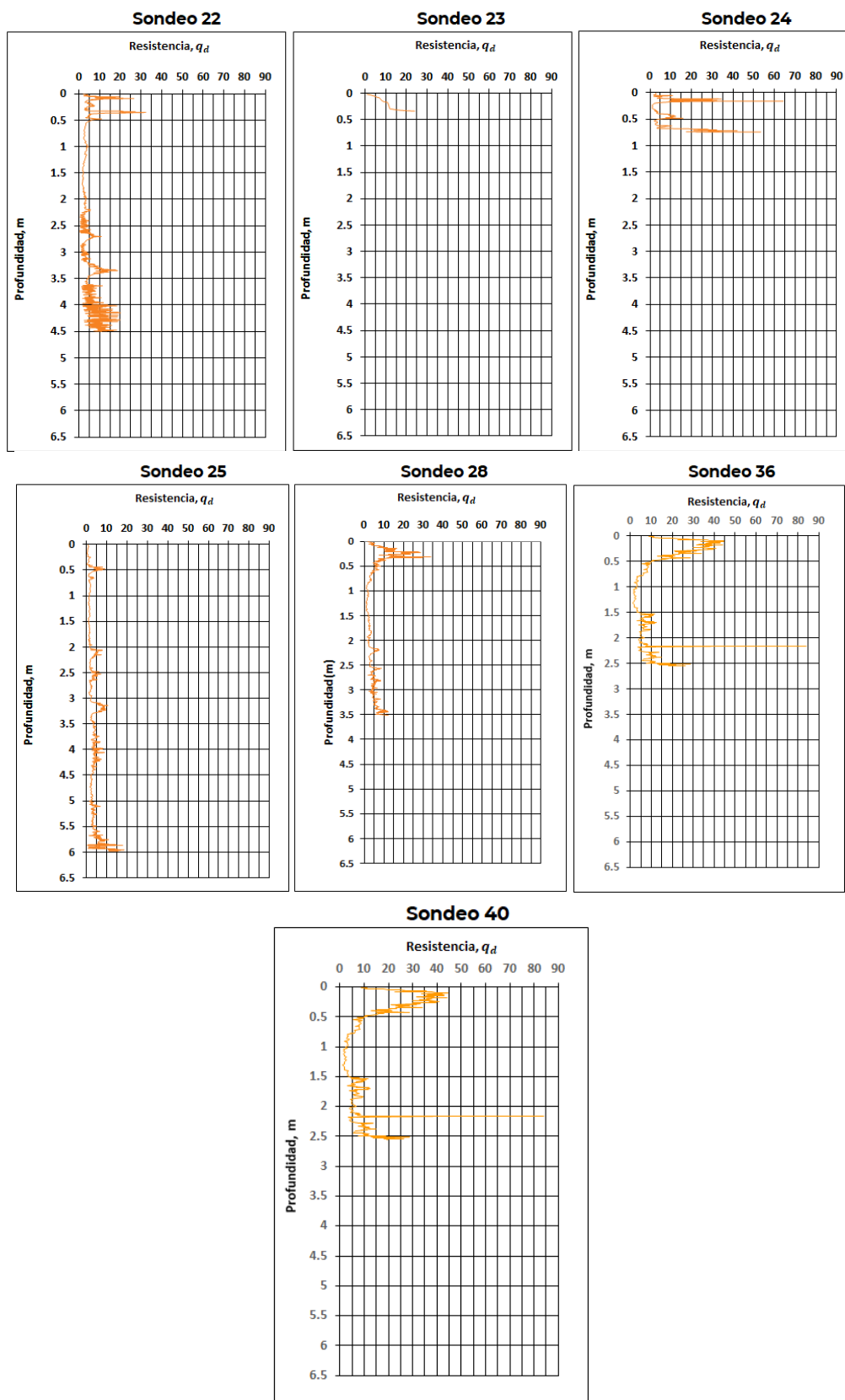


PENETROGRAMAS Área Norte-B (A.N.-B)





PENETROGRAMAS Área Norte-C (A.N.-C)



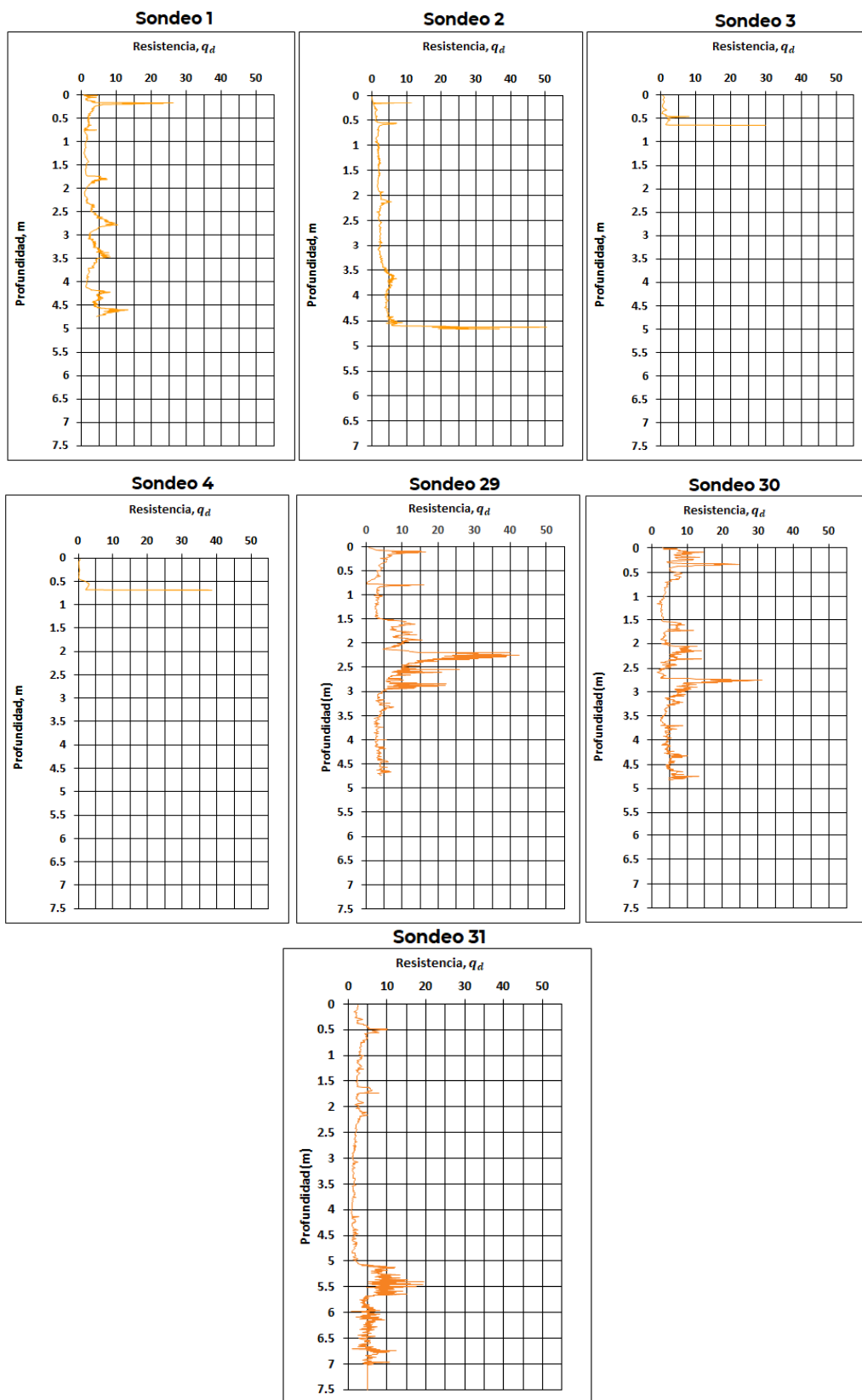
Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 28 de 37





PENETROGRAMAS Área Sur-A (A.S.-A)



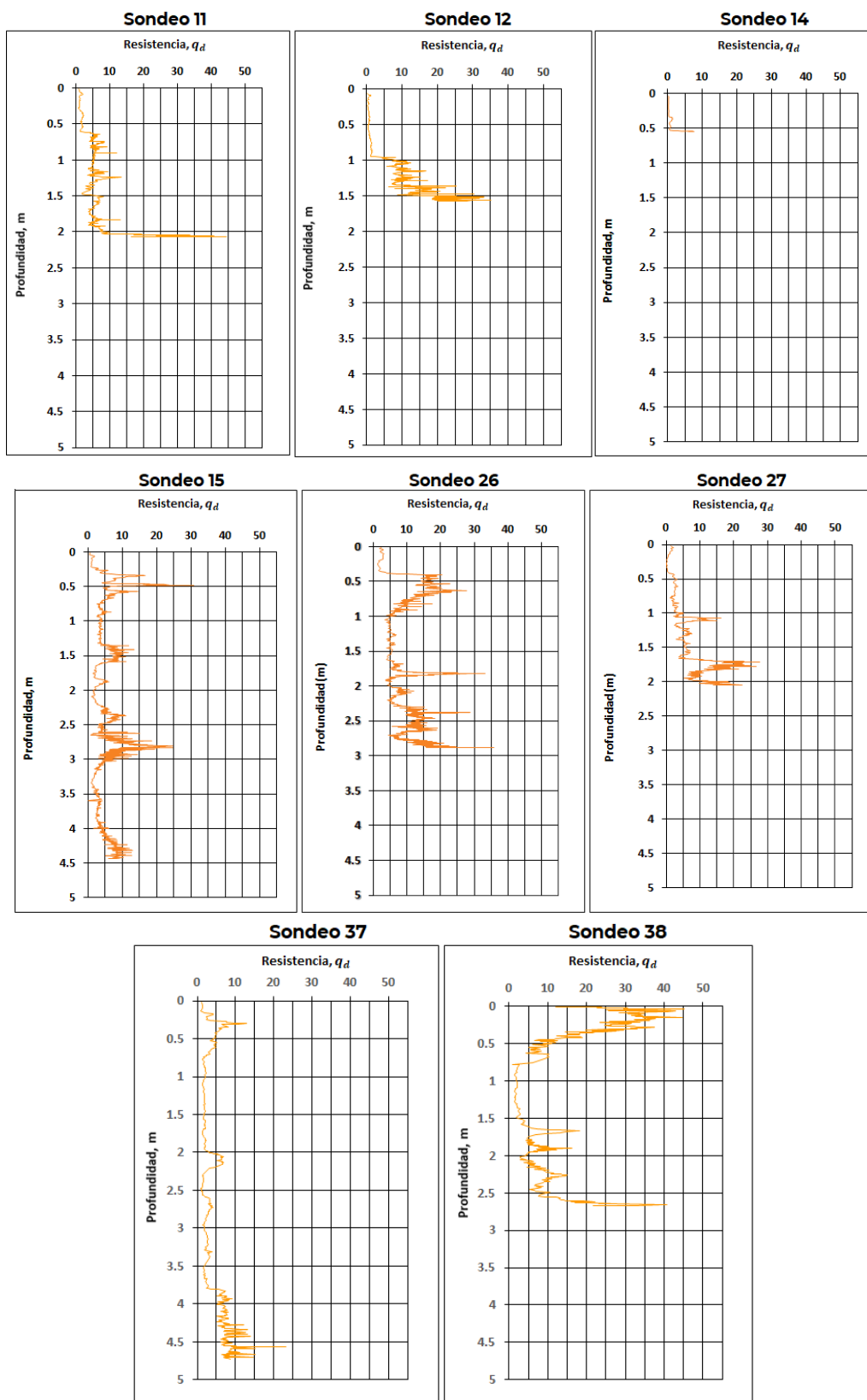
Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 29 de 37





PENETROGRAMAS Área Sur-B (A.S.-B)



Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

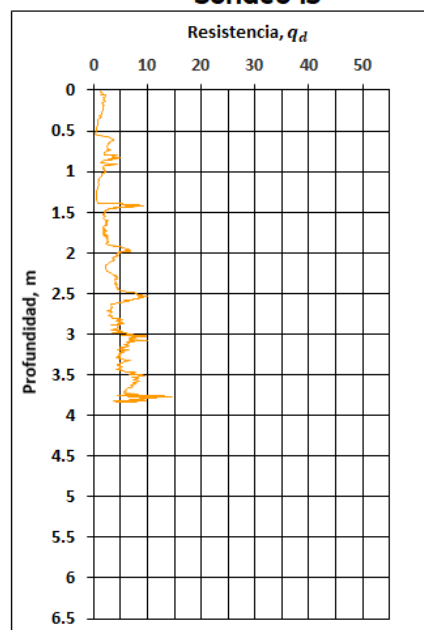
Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 30 de 37



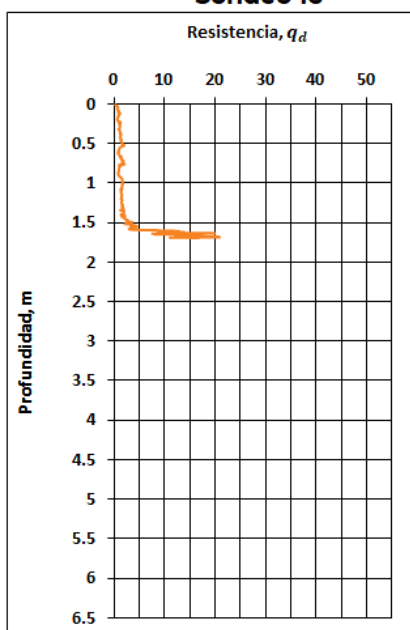


PENETROGRAMAS Área Sur-C (A.S.-C)

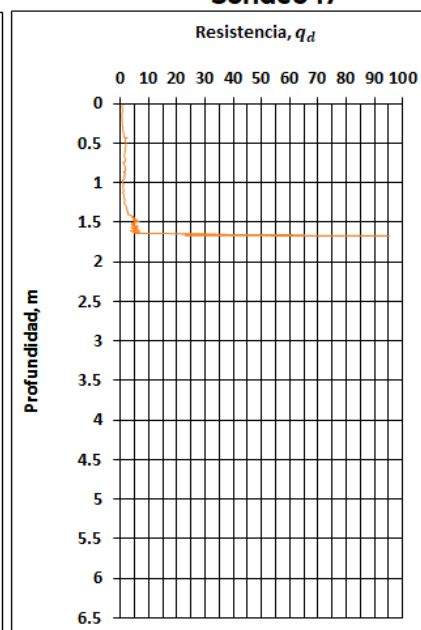
Sondeo 13



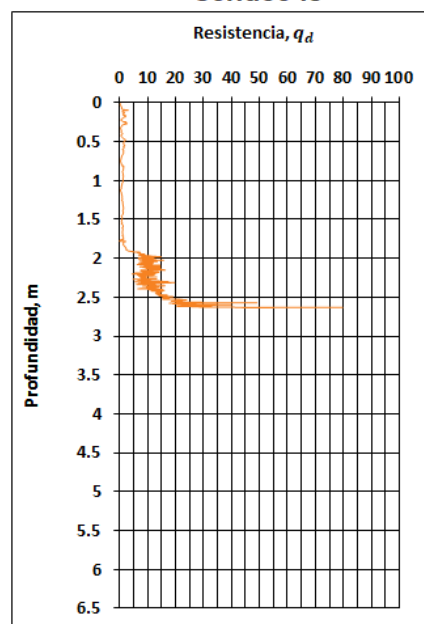
Sondeo 16



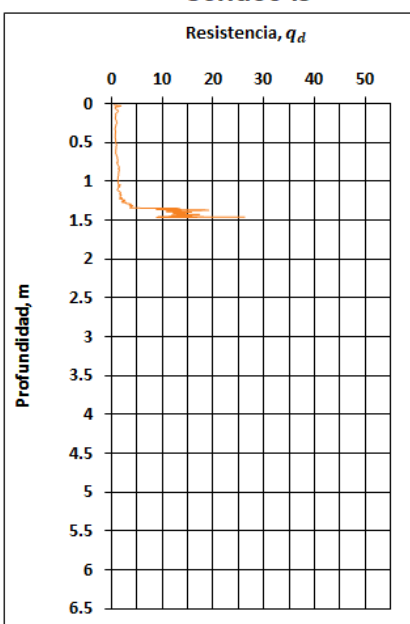
Sondeo 17



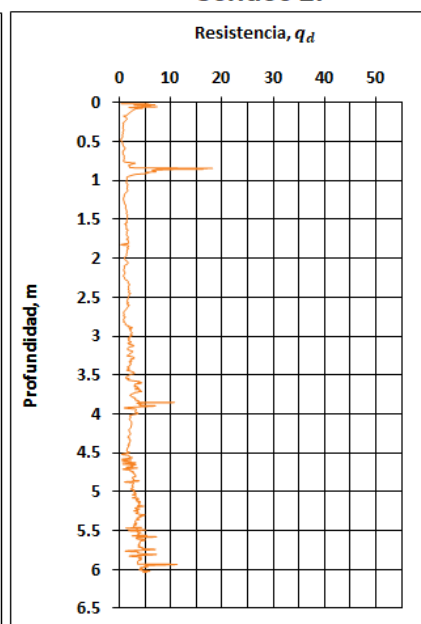
Sondeo 18



Sondeo 19



Sondeo 21





DESCRIPCIÓN DE LOS SONDEOS POR CUADRANTES

En el cuadrante **AREA SUR-A** se realizaron 8 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 12.125 Mpa, con profundidades que van desde los 50 centímetros y hasta los 7 metros. En cinco sondeos se llegó a la profundidad de 4.60 metros, es decir en la zona los materiales de estructura consolidada se encuentran aproximadamente a esa distancia. El sondeo 31 fue el que alcanzó la mayor profundidad con 7 metros.

En el cuadrante **AREA SUR-B** se realizaron 8 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 14.625 Mpa, con profundidades que van desde los 50 centímetros y hasta los 4.70 metros. En general los sondeos no rebasaron los tres metros a excepción de los sondeos 15 y 37 los cuales llegaron a los 4.50 metros y 4.70 respectivamente.

En el cuadrante **AREA SUR-C** se realizaron 6 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 46.5 Mpa, con profundidades que van desde 1.50 metros y hasta los 6 metros. En este cuadrante se identificaron en su mayoría sondeos donde su límite de profundidad era en los 1.50 metros. El sondeo que alcanzó la mayor profundidad fue el 21, con una profundidad de 6 metros.

En el cuadrante **AREA NORTE- A** se realizaron 5 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 15.33 Mpa, con profundidades que van desde 1.50 metros y hasta los 5.50 metros. En este cuadrante se observa como los sondeos que tienen las mayores profundidades comienzan con baja resistencia y es hasta los 3.5 y 4 metros donde rebasan la resistencia de 20 Mpa. El sondeo que alcanzó la mayor profundidad fue el 33, con una profundidad de 5.50 metros.

En el cuadrante **AREA NORTE- B** se realizaron 5 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 5.911 Mpa, con profundidades que van desde 1.30 metros y hasta los 5 metros. En este cuadrante se identificaron profundidades variadas. El sondeo 9 que fue el de mayor profundidad, también fue el que presento menor resistencia debido a que no rebaso los 10 Mpa en toda su ejecución en el sitio y hasta llegar a esa distancia.





En el cuadrante **AREA NORTE- C** se realizaron 7 sondeos, de los cuales se obtuvo una resistencia promedio de 12.50 Mpa, con profundidades que van desde 40 centímetros metros y hasta los 6 metros. En este cuadrante se identificaron profundidades escalonadas que van desde los 2.50 metros, 3.50 metros y 4.50 metros. El sondeo que alcanzó la mayor profundidad fue el 25, con una profundidad de 6 metros, el cual mantuvo una baja resistencia durante la realización de la prueba, no rebasando los 10 Mpa.





CONCLUSIONES

El hundimiento diferencial del terreno a pesar de no significar un fenómeno que ponga en peligro la vida de las personas, si representa una problemática muy costosa en la ciudad; el agrietamiento, fracturas en techos y muros, el rompimiento de tuberías, la separación de elementos estructurales, así como la afectación en carreteras y caminos son el ejemplo de los daños que se generan a consecuencia de este fenómeno.

Como consecuencia del hundimiento regional se han presentado registros de desplomes, fuertes asentamientos diferenciales y agrietamiento de suelos. Las consecuencias se manifiestan en todos los bienes de las comunidades, como infraestructura rural y urbana (viviendas, calles, edificios, tuberías de agua, gas drenaje, etc.). Se presentan desde agrietamientos ligeros por tensión diagonal en zonas con asentamientos diferenciales distribuidos, hasta rompimiento de estructuras por asentamiento abrupto en una zona de falla, grieta o como se defina el proceso. A causa del hundimiento regional algunas de las estructuras como las cimentaciones de varios edificios pueden presentar emersión aparente, afectando negativamente sus instalaciones teniendo como consecuencia riesgo en su estabilidad.

De acuerdo con los resultados de este trabajo, fue posible conocer que la Ciudad de México se hundió en promedio 12.48 mm en tres meses, con un valor máximo de hundimiento de 29.73 mm medido en 423 días, en las alcaldías de Iztapalapa, Iztacalco y Venustiano Carranza, además de municipios del estado de México como Nezahualcóyotl, Texcoco y Ecatepec.

Conocer las propiedades del suelo y del subsuelo, permite

Aunque actualmente existen diferentes técnicas para la estimación de los cambios en el terreno como la instrumentación geotécnica y la evaluación mediante el monitoreo GPS, destaca en este tipo de análisis el uso de sistemas de satélite tipo SAR. El uso de tecnología espacial se ha convertido en una herramienta imprescindible para la estimación del hundimiento regional a escala mundial, incluyendo a México, ya que los





satélites diseñados para la observación de la tierra y sus aplicaciones, contribuyen a la detección de cambios en los patrones de deformación del suelo. Sin embargo, como consecuencia del hundimiento, el fenómeno del agrietamiento de terreno no puede ser observado con el satélite SAR empleado para este trabajo, dada la resolución espacial de las imágenes. Por lo que el uso de VANT juega un papel importante en el estudio de este fenómeno, con el que en vuelos no mayores a los 80 metros, y técnica de fotogrametría digital, se pueden generar MDE de muy alta resolución (± 10 cm en resolución espacial) para generar perfiles topográficos, así como para entender la espacialidad del fenómeno.

Sin embargo, el agrietamiento es un problema que actualmente no está totalmente claro y aunque hay numerosos estudios al respecto, no se dispone de un modelo que tenga aceptación general y que esté debidamente contrastado experimentalmente. Con el estado actual de conocimiento resulta difícil predecir con certeza aspectos como el punto de inicio de una grieta, su dirección y profundidad, su interrelación con otras grietas verticales y horizontales, los efectos de las condiciones de contorno en el agrietamiento, el comportamiento ante ciclos de humedecimiento y secado, la velocidad de avance horizontal y vertical, etc.

La propuesta por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, se encuentra construyendo pozos de absorción en diferentes puntos de la Ciudad, para inyectar agua de lluvia previamente decantada y filtrada, a los acuíferos del sub- suelo. De esta forma se logrará que los efectos en superficie se den en menor proporción, generando así un equilibrio entre lo que se extrae y lo que se regresa a los mantos acuíferos.





REFERENCIAS

- Aguilar H. R., Galicia M., Pérez Rocha L., Avilés J., Vieitez L. y Salazar M. (2003). Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo. XII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Boston.
- Auvinet G. Y. (2009). El hundimiento de la ciudad de México. Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Auvinet G. Y. (2011). El ingeniero Roberto Gayol y Soto y el hundimiento de la Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México, A.C. 222: pp. 8-12.
- Auvinet G. Y. y Juárez M. (2009). Ingeniería geotécnica en zonas urbanas afectadas por hundimiento regional. Volumen preparado por el Comité Técnico, No. 36 de la ISSMGE. Instituto de Ingeniería / Universidad Nacional Autónoma de México / Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos, México.
- Bento, M. (2008). "Unmanned Aerial Vehicles: An Overview ", Inside GNSS, January/February, pp. 54-61.
- De Zan, F., Guarnieri, A.M., Rocca, F., 2008. Advances in SAR interferometry for sentinel-1 with TOPS. IEEE Radar Conf. RADAR 2008, 1-6.
- **Díaz Rodríguez, 1998**
- Díaz J. A. (1998). El subsuelo de la Ciudad de México. Conferencia Leonardo Zeevaert Wiechers. XXXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, pp. 1-39.
- **(DGCOH)**
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2014). "Informe Global Hundimiento Regional y Agrietamiento del Terreno". Secretaría de Gobernación.
- Elachi C. y Van Zyl J. (2006). Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. John Wiley & Sons Inc. Segunda edición. 584 pp.
- **Hanssen, 2001**
- **Henderson y Lewis, 1998**
- **Holzter et al. (1976)**
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., y Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. Geophysical research letters, 31(23).
- **Larson (1983)**





- Lira Chávez J. (2010). Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. 605 pp.
- López Quiroz, P., Doin M. P., Tupin F., Briole P., y Nicolas J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), pp. 1-15.
- Lugo H. J. (1990). El relieve de la República Mexicana. Instituto de Geología / Universidad Nacional Autónoma de México, Revista, vol. 9, núm. 1, pp. 82-111.
- Lugo H. J. (2011). Diccionario Geomorfológico. México, Instituto de Geografía / Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Mendoza et al., 2003**
- Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson, J. y Breen, B. (2016). "Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei - Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand", *Renewable Energy* 86, pp. 1256 - 1264.
- **Ojeda, et al. 2017d**
- **Pérez, 2007**
- Rodríguez C. R. y Rodríguez V. I. (2006). "Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana Tomo LVIII, núm. 2, Instituto de Geofísica, UNAM, México, pp. 265-269.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS) (2017). "Manual de cimentaciones Profundas",
- Sowter A., Amat M., Cignab F., Marsha S., Athaba A. y Alshammari A. (2016). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 52, October 2016, pp. 230-242.
- **Tuxpan, 2018**
- Velásquez Mazariegos S. (2002). Introducción a los Sensores Remotos y Procesamiento de Imágenes. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 21 pp.
- Yu C., Li Z., Penna N. y Crippa P. (2018). Modelo genérico de corrección atmosférica para observaciones de radar de apertura sintética interferométrica. *Revista de investigación geofísica: Tierra sólida*, 123. <https://doi.org/10.1029/2017JB015305>.

