

Nombre del proyecto	Análisis de vulnerabilidad física a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento en la Ciudad de México.
Institución Ejecutora	Centro Nacional de Prevención de Desastres
Reporte de Actividades	4.1, 4.2

SUBCUENTA DE INVESTIGACIÓN PARA LA PREVENCIÓN
DEL FOPREDEN

Análisis de la Vulnerabilidad Física a la Subsidencia y Agrietamiento en la Ciudad de México

Reporte de Actividades
Actividad 4
Mayo 2017

Centro de Geociencias
Universidad Nacional Autónoma de México



CONTENIDO

4.1. Identificación y georreferenciación de los sistemas de fracturamiento	3
Elementos previos para el desarrollo de la Cartografía del Fracturamiento del Subsuelo..	4
Análisis Morfométrico	4
Mapa Altimétrico	4
Mapa de Pendientes.....	5
Recopilación Bibliográfica	7
Análisis Interferométrico (Gradiente de Subsidencia)	8
Técnica In-SAR.	8
Procesamiento del interferograma.....	10
Metodología para el levantamiento cartográfico en zonas de fracturamiento.....	12
Resultados del levantamiento cartográfico en zonas de fracturamiento y hundimiento en la Ciudad de México.....	15
4.2. Análisis de la distribución espacial del fracturamiento	17
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
Anexo 1. Diccionario de Datos	¡Error! Marcador no definido.

4.1. Identificación y geo-referenciación de los sistemas de fracturamiento

El fenómeno de fracturamiento asociado a subsidencia es dinámico, con el tiempo aparecen nuevas fracturas o se reactivan las ya existentes, provocando cambios en las condiciones iniciales de estabilidad mecánica del material. De ahí que se pueden diferenciar factores generadores y disparadores del fracturamiento que se interrelacionan de manera variable y provocan que la propagación de fracturas en el subsuelo sea una problemática compleja.

Para conocer con detalle la distribución y características del fracturamiento, se llevo a cabo un levantamiento cartográfico a escala 1:20,000. Estos levantamientos consisten en documentar información básica de las fracturas, es decir, determinar sus características principales como son la orientación e inclinación, desplazamiento vertical, área de influencia, tipo de material geológico presente. Para el desarrollo de estos levantamientos se emplea un GPS, Brújula tipo Brunton, Cinta Métrica y la información obtenida se vierte en un sistema de información geográfica (SIG).

La finalidad de la ubicación de las fracturas dentro de un espacio geográfico es elemental para el entendimiento del fenómeno de fracturamiento y entender las relaciones espaciales entre distintas entidades que coexisten dentro del territorio de la Ciudad de México. Para el desarrollo de las actividades 4.1 y 4.2, se inicio con la compilación de las trazas superficiales, puntos de hundimientos documentadas en trabajos previos (tesis, atlas de riesgo y artículos), de manera complementaria se realizo la búsqueda de notas periodísticas donde se mencionan afectaciones por la presencia de este fenómeno geológico. Esta información se incorporo dentro de un sistema de información geográfica, para su visualización.

Otros elementos que sirvieron como referencia para el desarrollo de este trabajo fue un análisis interferométrico además de un análisis morfométrico para la delimitación de las tres principales unidades del relieve: zona de montaña, zona de piedemonte y planicie lacustre; estas dos últimas de gran importancia porque en ellas se desarrolla con gran intensidad el fenómeno de hundimiento y fracturamiento.

Una vez obtenida esta información se delimitaron zonas de estudio donde se incluían reportes de fracturamiento pero que no se habían cartografiado anteriormente para ampliar la información disponible, o en su caso extender los sistemas de fracturamiento ya reportadas, además excluir reportes de fracturas no existentes. La cartografía presentada no incluye fracturas debidas a fallas estructurales en la infraestructura urbana (fallas de cimentación, efectos de raíces, cambios térmicos en el asfalto, drenaje, etc).

Elementos previos para el desarrollo de la Cartografía del Fracturamiento del Subsuelo

Análisis Morfométrico

Debido a la deformación continua del terreno, uno de los elementos más frecuentes asociados a la subsidencia diferencial es el fracturamiento del subsuelo. Este rasgo presenta diferentes características, las cuales dependerán principalmente de las condiciones geológicas del terreno asociado a otros factores (extracción de agua, cargas estáticas y dinámicas) y donde su intensidad y magnitud dependerá de su zona geomorfológica.

Uno de los principales elementos a considerar para el desarrollo de la cartografía de fracturamiento es la delimitación de unidades del relieve: zona de montaña, piedemonte y planicie lacustre, estas dos últimas, son de gran importancia porque en ellas se desarrollan gran parte del fenómeno de fracturamiento y/o hundimiento.

Los primeros elementos a desarrollarse fueron la elaboración de un mapa altimétrico y un mapa de pendiente del terreno. Para su realización se utilizó una base topográfica 1:20,000 con equidistancias de las curvas de nivel a cada metro, además de un modelo digital del terreno generado de un modelo LiDAR con una precisión de 5 metros.

Mapa Altimétrico

En este tipo de mapa se representa a través de franjas las variaciones en altitudes esto permite delimitar unidades de relieve como es *planicie*, *piedemontes* y *montañas*, este tipo de límites tienen una relación con la génesis, litología y los procesos de modelado ([Mapa 1](#) y [Tabla 1](#)).

Tabla 1. Delimitación de las unidades de relieve en función de su elevación.

Elevación (m.s.n.m.)	Unidad de Relieve
<2,235	Planicie Lacustre
2,235-2,255 2,255-2,350	Piedemonte Volcánico Inferior Piedemonte Volcánico Superior
>2,350	Zona de Montaña

Zona de Montaña

Esta zona comprende las altitudes mayores a los 2,350 m.s.n.m. en esta se pueden apreciar morfologías de edificios volcánicos y estructuras volcánicas como coladas de lava, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, además de flujos de escoria. La inclinación del terreno en esta zona tiene valores superiores a los 15° en promedio.

Piedemonte

Esta zona se extiende de los 2,235 a los 2,350 m.s.n.m. y es considerada como una rampa acumulativa de material volcánico, que tiene un continuo desarrollo derivado del acarreo y sedimentación de estos materiales hacia la periferia de las sierras (*Sierra de Guadalupe, Sierra de las Cruces, Sierra de Santa Catarina y Sierra de Chichinautzin*) y de las estructuras volcánicas localizadas al dentro de la planicie lacustre (*Cerro de la Estrella, Peñón de los Baños y Peñón del Marques*).

La morfología característica de esta superficie es escalonada, convexa y ondulada, además de presentar una inclinación del terreno de 3 a 20°. Para el desarrollo de este estudio se considero una subdivisión: El piedemonte volcánico superior (2,255 a 2,350 m.s.n.m.) y un piedemonte volcánico inferior (2,235 a 2,255 m.s.n.m.) donde se tiene valores de inclinación del terreno entre 3 -15°, esta zona tiene una composición heterogénea de materiales de acarreo, depósitos volcánicos y materiales limo-arcillosos.

Planicie Lacustre

Esta zona se localiza en las elevaciones menores al 2,235 m.s.n.m., esta presenta una superficie subhorizontal de inclinación menor a los 3°, el origen de esta planicie se encuentra relacionada con la formación y evolución geológica de la Sierra de Chichinautzin; esta estructura modifico y obstaculizo el sistema de drenaje natural, de tal manera que el fondo de la cuenca se relleno debido a la acumulación paulatina del material de acarreado por la acción fluvial. Los materiales que integran esta unidad son de tipo aluviales y lacustres conformados principalmente por secuencias limo-arcillosas intercaladas con depósitos volcánicos (deposito de caída y cenizas).

Mapa de Pendientes

Este mapa nos sirve para caracterizar el relieve a partir de su ángulo de inclinación, información que nos permitió lograr un mejor detalle en los límites de las unidades de relieve ([Mapa 2 y Tabla 2](#)).

Tabla 2. Delimitación de las unidades de relieve y su correspondencia con la pendiente.

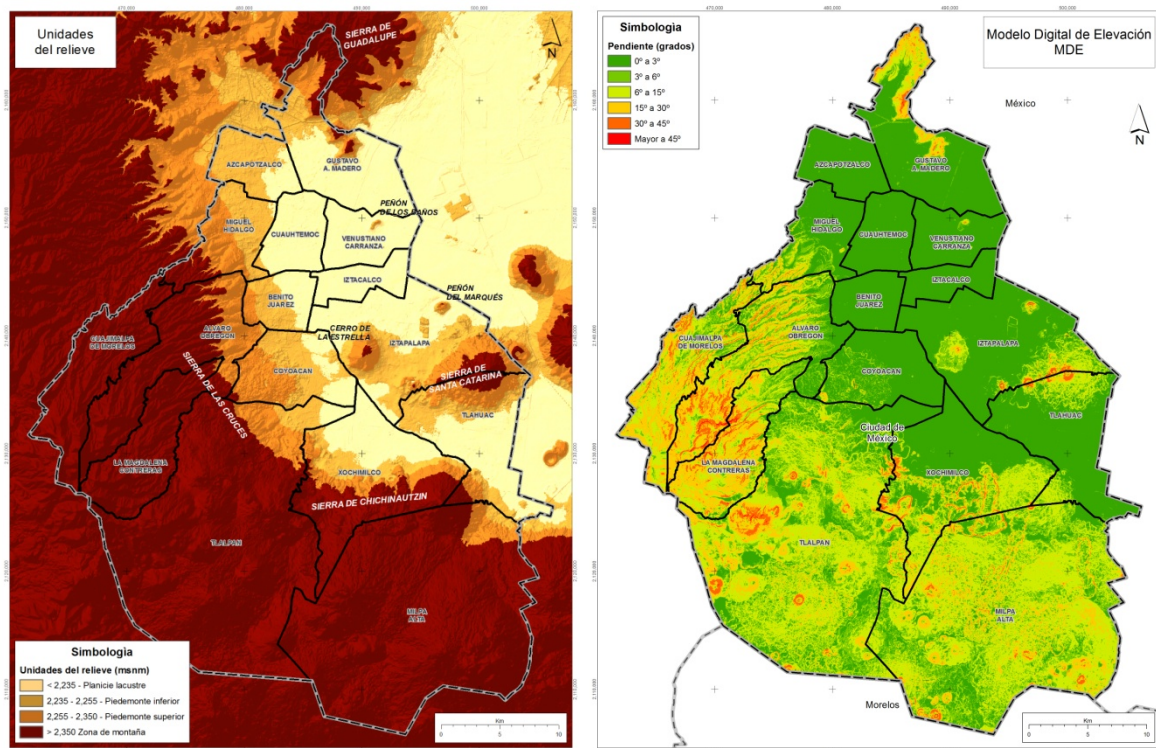
Pendiente (°)	Unidad de Relieve
0-6°	Planicie Lacustre
6-12°	Piedemonte Inferior
12-30°	Piedemonte Superior
>30°	Zona de Montaña

Zona de Montaña. Esta zona se caracteriza por pendientes superiores a los 30° y sus procesos dinámicos están asociados a problemas de inestabilidad de laderas.

Piedemonte. Presenta una inclinación del terreno de 6 a 30°, en esta zona es común la sobreposición de depósitos volcánicos o materiales de arrastre que se interdigitan con la planicie lacustre.

Planicie Lacustre. Presenta una inclinación que varía de 0 a 6°, esta superficie es semi horizontal, presentándose ondulaciones. Esta zona está ligada a los procesos dinámicos del relieve (Hundimiento Diferencial del terreno).

El análisis morfométrico realizado delimitó dos principales zonas: la planicie lacustre y el piedemonte volcánico inferior. Esta delimitación permitió establecer sitios prioritarios para la revisión del fracturamiento del subsuelo en la Ciudad de México. A continuación se muestra un diagrama donde se muestra la correlación de zonas de relieve y los fenómenos geológicos presentes (Figura 1).



Mapa 1 y 2. En el primero (izquierda) se muestra el mapa altimétrico correspondiente a la zona de estudio, en el segundo (derecha) se muestra la pendiente del terreno.

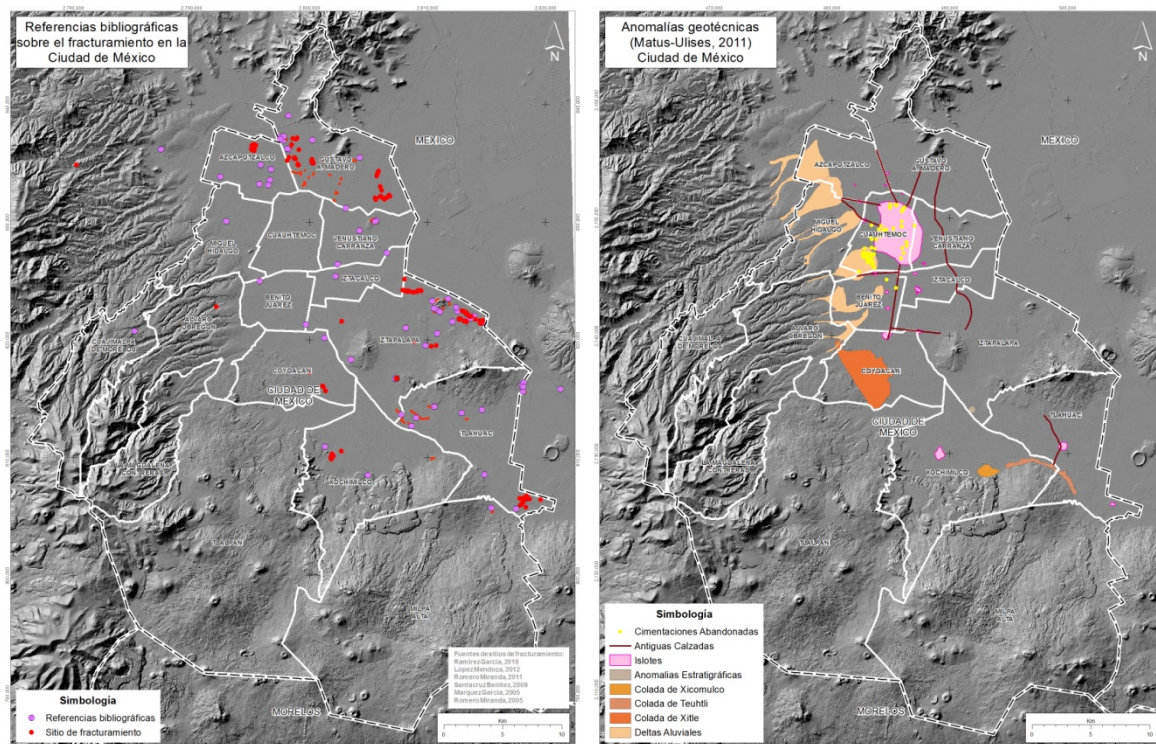


Figura 1. Correlación de las unidades del relieve y el desarrollo de los fenómenos geológicos en cada sitio.

Recopilación Bibliográfica

En este apartado se tomaron como referencia trazos superficiales, puntos de hundimiento documentados en trabajos previos (tesis, artículos y atlas de riesgos) además de notas periodísticas que hicieran referencia a la existencia de este fenómeno; esta información fue concentrada dentro del Sistema de Información Geográfica y se incorporó dentro de los mapas que sirvieron para el levantamiento cartográfico. De los trabajos de mayor interés resaltan los elaborados por: López Mendoza (2012), Márquez García (2005), Ramírez García (2016), Romero Miranda (2005) y Santacruz Benítez (2009), Atlas de Riesgo de la Delegación Iztapalapa (2011) en estos trabajos se mapearon algunas de las fracturas indicando su dirección y espaciamiento, en algunos casos se daba referencia de sitios donde se desarrollaba este fenómeno; de manera complementaria se buscó información en algunas notas periodísticas que hicieran referencia sobre zonas afectadas, posteriormente se ubicaron de manera espacial (Mapa 3).

Otro antecedente importante para en el desarrollo de este trabajo fue el elaborado por Matus-Ulises en el 2011, donde se presenta la ubicación de una serie de “anomalías geotécnicas” dentro de la planicie lacustre, debido a que en estos sitios se está generando una serie de deformaciones que están afectando al terreno (Mapa 4).



Mapa 3 y 4. En el primero (izquierda) se muestra la distribución de los sitios de fracturamiento reportados por otros autores, en la parte (derecha) se muestran un mapa modificado de Matus 2011 donde se muestran una serie de “anomalías geotécnicas” localizadas dentro de la llamada planicie lacustre.

Análisis Interferométrico (Gradiente de Subsidencia)

Técnica In-SAR.

La técnica de Interferometría Synthetic Aperture Radar (InSAR) identifica las diferencias de fase contenidas en un interferograma a partir de dos o más escenas. Para la realización de los interferogramas se requieren tomas ya sea con una ligera diferencia o en la misma posición pero en tiempos distintos. Las imágenes obtenidas se presentan mediante isolíneas de diferencia de fase entre ambas escenas. Si entre ambas imágenes se registra una variación en la superficie de la tierra, se registra como una diferencia de fase, esto es, deformación del terreno (Figura 2).

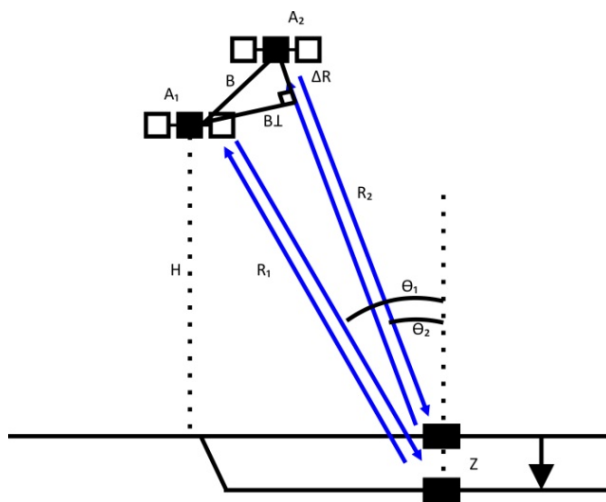


Figura 2. Principio de InSAR para medir la deformación. (Fuente: Modificado de Rosen, P., et. al., 2004: Elaboración propia)

En la figura 2 se aprecia la geometría de la técnica InSAR, donde H es altitud de la primera antena a partir de la superficie; Θ_1 y Θ_2 corresponden a los ángulos de incidencia del radar en las posiciones A_1 y A_2 respectivamente; R_1 y R_2 son las distancias del satélite al mismo punto en tiempos distintos. La letra B corresponde a la distancia entre ambas antenas (línea base); mientras que su proyección perpendicular a la línea de vista se representa con BL (línea de base perpendicular). La técnica InSAR se ha aplicado en: medición de deformaciones terrestres (subsidencia y emersión), construcción de modelos digitales de terreno, deformación cosísmica y postsísmica, acumulación de nieve, movimientos glaciales, estimaciones de biomasa.

Un interferograma se define como la resta o diferencia entre las matrices de fase. La fase contenida en un interferograma o fase interferométrica contiene varias componentes: orbital, topográfica, desplazamiento, atmósfera y ruido (López-Quiroz, 2011). La precisión puede ser milimétrica (de la componente topográfica o desplazamiento) y depende de la capacidad para lograr estimar el resto de las contribuciones. Para lograr calcular la componente asociada a la deformación existen metodologías que permiten estimar y eliminar o reducir la contribución orbital, topográfica y las contribuciones atmosféricas, esta última suele ser más imprecisa. En cuanto a la componente asociada al ruido se puede reducir mediante la estimación de la línea de base temporal (tiempo de

adquisición) y perpendicular (asociada a la distancia entre orbitas). La magnitud de ambas afecta la calidad de la señal, por ende del interferograma (Figura 3).

$$\varphi_{int} = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}$$

Figura 3 Componentes de la fase contenida en un interferograma.

La contribución o aportación de señal de cada uno de los componentes que constituye al interferograma se detalla a continuación (Tabla 3):

Tabla 3. Descripción de los componentes que conforman al interferograma

FASE	DESCRIPCIÓN	FORMULA
φ_{orb} Fase orbital	Es la fase derivada de la diferencia de la trayectoria de la órbita entre ambas imágenes, es decir la variación (ΔR) de la línea de vista del satélite de un punto. Ver Fig. 33	$\varphi_{orb} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \Delta r}{R \tan \theta}$ <p>Donde: λ: Long. onda del radar R: Dist. al objetivo θ: Angulo de incidencia de la radiación respecto a la superficie B: Línea de base perpendicular</p>
φ_{topo} Fase topográfica	<p>Es el residuo topográfico de la fase por error del DEM (Hooper, 2004). Esta es proporcional a B. y los cambios topográficos (Δh). La mayor parte de las ocasiones de utiliza un DEM para eliminar esta fase.</p> <p>La altitud de ambigüedad se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase 2π. Esta es inversamente proporcional a B. Es decir, mientras mayor B. mayor sensibilidad topográfica, teniendo un valor optimo donde no se pierde correlación.</p>	$\varphi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \Delta h}{R \sin \theta}$ <p>Donde: λ: Long. onda del radar R: Dist. al objetivo θ: Angulo de incidencia de la radiación respecto a la superficie B: Línea de base perpendicular</p>
φ_{def} Fase deformación o desplazamiento	Es el cambio de fase debido al movimiento del pixel en la dirección line-of-sight (LOS) o línea de visión del satélite. Esta contribución es la relacionada con un cambio de posición (subsidencia, emersión, movimiento glaciario, etc.)	
	Es el desfase de la señal debido a las condiciones de la atmosférica en cada imagen. Los retrasos se reflejan como franjas en el ifgs. Existen dos clases de contribuciones	

Φ_{atm} Fase atmosférica	atmosféricas: -Turbulentas (derivadas de las condiciones atmosféricas del lugar) -Verticalmente estratificadas: ocasionados por la reflectividad vertical asociadas con la topografía.	
Φ_{noise} Fase de ruido	Incluye los factores difíciles de modelar, aquí se encuentran la contribución atmosférica turbulenta, variaciones temporales (cambios de estación), contenido de vegetación, contenido de agua en la superficie de la tierra.	

Procesamiento del interferograma

El interferograma base utilizado para la realización del gradiente de subsidencia es el presentado por López-Quiroz, et. al. (2009) (ver capítulo 2.2.1), el cual fue construido a partir del uso de archivos ENVISAT, correspondientes a cuatro años en 38 imágenes adquiridas entre noviembre de 2002 y marzo de 2007. Se utilizó como límite una línea de base temporal menor a nueve meses y de base perpendicular menor a 500 metros (Mapa 5). Para la realización de las imágenes se utilizó el software JPL/CalTech Repeat Orbit Interferometry Package (ROI_PAC) (Rosen et. al., 2004). El procesamiento que deriva en la obtención de del interferograma base de ilustra en la Figura 4:

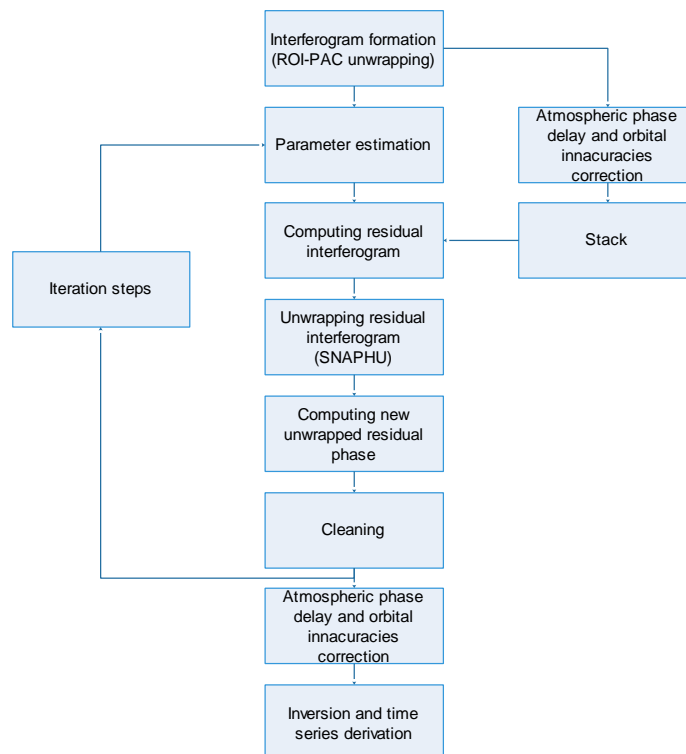
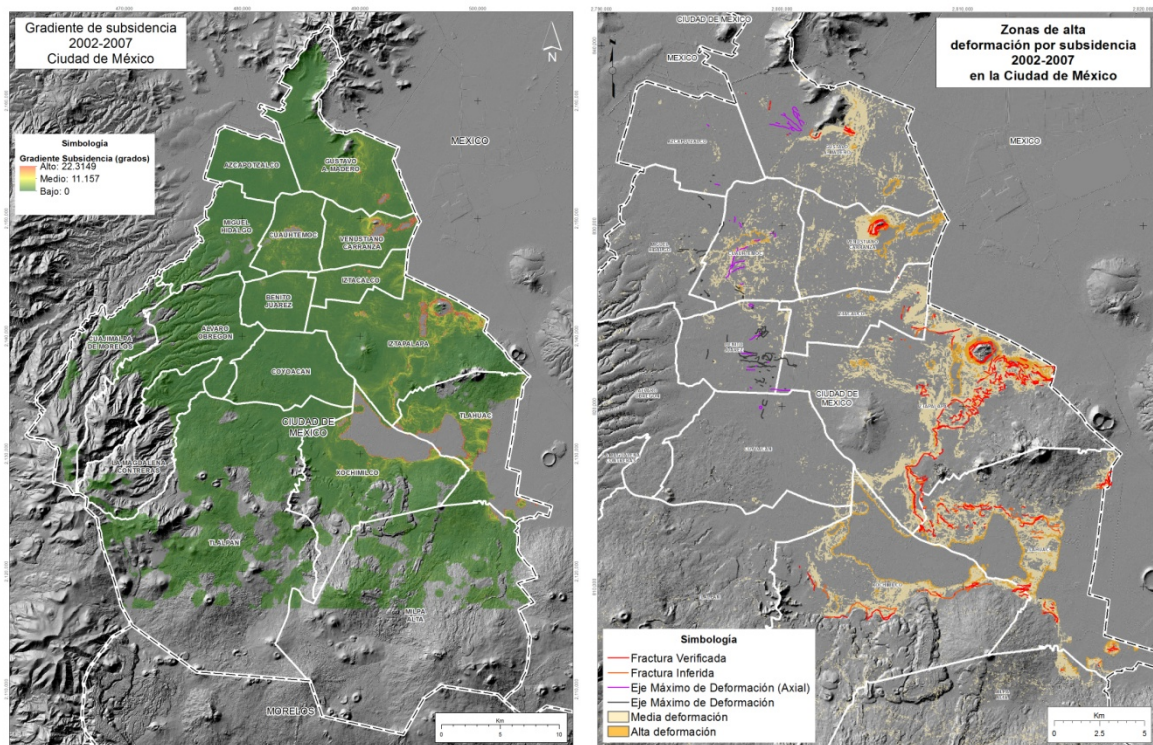


Figura 4. Proceso de elaboración de interferogramas. (Fuente: Modificado de López-Quiroz, et. al., 2009: Elaboración propia)

A partir de la imagen obtenida de promedio de subsidencia anual para el periodo de 2002-2007 (**Mapa 5**), se integro en un SIG para calcular la tasa máxima de cambio de valor de esa celda a sus vecinas, esto es la pendiente. Para ello se empleo el modulo de *3D Analyst Tools/Raster Surface/Slope*. Por default, la herramienta ajusta un plano a los valores de Z (para el procesamiento se utilizan los valores promedios de subsidencia anual representados en centímetros), de una vecindad de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento o central (<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>).

El raster resultante se obtiene en grados, siendo los valores más altos de pendiente (gradiente de subsidencia) en donde se tienen los máximos cambios en una celda con respecto a sus vecinas (3 x 3). El resultado muestra que la velocidad de hundimiento anual es variable, siendo la zona oriente donde se obtienen la variación en el gradiente más notable.

En el **mapa 6** se muestran los valores máximos de gradiente correspondiente a los 22.31 grados (zonas de color rojo), las cuales se encuentran en zonas de transición principalmente. En las zonas de los lagos de Xochimilco, Tláhuac, y Texcoco, así como en el AICM se encuentran zonas de variaciones atmosféricas, lo que propicia decorrelación del interferograma original por lo cual no se cuenta con información referente a subsidencia y gradiente.



Mapa 5 (izquierda). Gradiente de subsidencia obtenido a partir del interferograma de subsidencia promedio anual para el periodo 2002-2007. **Mapa 6** (derecha). Clasificación del gradiente de subsidencia a partir de la magnitud de la pendiente.

Se realizó la clasificación del gradiente de subsidencia, ya que existe una relación con la presencia de deformación y/o Fracturamiento, esto a partir de la recopilación de datos en campo. Por lo que se utilizó la herramienta *Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify* para reclasificar los valores obtenidos en dos categorías: pendientes mayores a los 0.5 grados y menores a los 2 grados; y,

pendientes mayores a los 2 grados. La relación que mantienen las variables de Fracturamiento y gradiente de subsidencia se muestra en el [mapa 6](#), teniendo en las zonas mayores a los 2 grados presencia de Fracturamiento superficial, y en las zonas de 0.5 grados a 2 grados zonas con deformación.

Metodología para el levantamiento cartográfico en zonas de fracturamiento

En base a la consulta bibliográfica y reportes técnicos, hasta el momento no se cuenta con una clasificación y/o metodología adecuada para el desarrollo de la cartografía de fracturamiento del subsuelo en zonas de materiales arcillosos de alta compresibilidad.

La aplicación de una metodología de trabajo para la identificación y monitoreo de las fracturas que se generan en suelos que afectan la infraestructura urbana (banquetas, guarniciones, pavimentos), es un elemento importante que ayuda en la obtención de parámetros cinemáticos que servirán como elementos para la explicación del desarrollo y evolución del fenómeno de fracturamiento.

La metodología aplicada comienza con la recolección de información del fracturamiento, de donde se obtiene la siguiente información: georeferenciación, rumbo, geometría y desplazamiento vertical, posteriormente se procede a marcar la fractura con una nomenclatura, a continuación se muestra un ejemplo de una ficha de trabajo empleada para el desarrollo del trabajo ([Tabla 4](#)).

Tabla 4. Ficha para levantamiento de datos estructurales en zonas de fracturamiento

LEVANTAMIENTO CARTOGRAFICO DE FRACTURAMIENTO						
Localización:				Coordenadas		Observaciones
				X	Y	
Numero de Estación	Tipo	Rumbo	Desplazamiento Vertical	Área de Influencia	Geometría del Fracturamiento	Numero de Fotografía

Procedimiento de levantamiento cartográfico

- 1) Al llegar al sitio de estudio se debe de realizar un recorrido por calles y avenidas para identificar el o los **sistemas principales de fracturamiento** y sistemas de fracturamiento secundarios asociados al principal y/o en su caso deformaciones diferenciales del terreno de manera puntual.

Se realizó el levantamiento cartográfico de fracturamiento dentro de un mapa a escala 1:20000, y donde se propone la siguiente clasificación:

A) **Fractura Verificada:** Este término se empleó cuando los sistemas de fracturamiento y/o fracturas sea visible en superficie y donde las condiciones geológicas del terreno determinaran sus características.

B) **Fractura Inferida:** Se utilizó este término cuando los sistemas de fracturamiento no sean claros, pero pueden encontrarse leves rasgos de fracturamiento o en su caso una ligera

deformación del terreno; otro elemento para inferir la presencia de fracturas se deberá a una posible continuación de sistemas de fracturamiento cercanos al sitio pero debido a las características geológicas del terreno y/o una posible reparación de las calles no son totalmente evidentes estos rasgos; para ello se deberá de tomar en cuenta otros elementos como la altimetría, pendiente del terreno, geología del sitio y fracturas en 45° sobre las viviendas.

C) **Eje de Deformación Máximo:** Este término se utilizó cuando en superficie se muestre una deformación del terreno originada a la emersión aparente de elementos estructurales de origen natural y/o antropogénico. Esta deformación del terreno provoca zonas con una ligera pendiente, dando origen a geometrías en el terreno que pueden tener una o dos direcciones (axial).

- 2) Para la medición del **Rumbo de fracturamiento** se utilizó la Brújula Brunton (Figura 5). Para realizar esta medición y se pueda obtener el rumbo de la fractura, es necesario identificar el principal sistema de fracturas, posteriormente la persona se colocó en uno de los extremos y alineó la brújula con una dirección preferencial del sistema de fracturas y se midió el rumbo general, en caso de ser necesario se tomaron las mediciones de las fracturas secundarias asociadas a la principal.



Figura 5. Empleo de la Brújula Brunton para la medición de la orientación.

- 3) Para el caso del **Desplazamiento Vertical**, esta lectura se obtuvo cuando una fractura muestre en superficie un desplazamiento en sentido vertical dando origen a un bloque alto y uno bajo parecido a una “falla normal”, para ello se empleó como referencia una lectura promedio, debido a que a lo largo de la longitud del fracturamiento este muestra un desplazamiento irregular. Para la obtención de esta lectura se pueden emplear dos técnicas: una es empleando un flexómetro considerando como referencia el bloque alto y el bloque bajo; la segunda técnica es empleando un nivel electrónico donde se obtuvieron lecturas con espaciamientos pequeños para obtener un detalle exacto del desnivel y en su caso establecer su ángulo de inclinación, este último se recomienda emplearlo para estudios

puntuales y/o el establecimiento de un monitoreo continuo a lo largo de un sistema de fracturamiento (Figura 6).



Figura 6. Desplazamiento vertical en zonas de fracturamiento empleando cinta métrica y flexómetro

- 4) La obtención del **área de influencia** se determinara a partir del plano de fracturamiento principal y hacia sus extremos, que serán delimitados por rasgos como deformación del terreno (ondulaciones) y/o sistemas de fracturas secundarios; estos elementos se forman a partir del continuo desplazamiento sobre la trayectoria principal originados por la continua subsidencia del terreno (Figura 7).



Figura 7. Medición de la apertura de fracturamiento, este se realizó de manera perpendicular a la dirección de fracturamiento.

- 5) Para la determinación de la **geometría del fracturamiento** se propone la siguiente clasificación (Figura 8):

- a) *Echelón*: Este tipo de fracturamiento presenta un arreglo paralelo entre sí pero presenta un escalonamiento en ambos lados.
- b) *Abanico*: Esta geometría presenta una fractura principal donde en unos de sus extremos puede separarse formando una serie de pequeñas fracturas originando un arreglo en forma de abanico.
- c) *Curvilínea*: Este tipo de geometría presenta una serie de curvaturas pero a lo largo de su traza puede cambiar su dirección (recta).
- d) *Anamostoso*: Es un arreglo trenzado de las fracturas
- e) *Conjugadas*: Forman un ángulo diedro entre $30-60^\circ$
- f) *Perpendiculares*: Forman un ángulo diedro de 90°
- g) *Escalonadas*: Esta geometría origina escalones a partir del desplazamiento vertical de la trayectoria principal de fracturamiento y donde las trayectorias secundarias empiezan a mostrar desplazamientos en menor dimensión.
- h) *Radial*: Esta geometría origina un arreglo concéntrico del sistema de fracturas.
- i) *Lineal*: las fracturas forma un arreglo en línea continua.



Figura 8. Ejemplos de diversas geometrías del fracturamiento en diversos sitios de la Delegación Tlahuac.

- 6) Por último se obtuvieron las coordenadas con **GPS** del sitio para tener la referencia y se tomaron **fotos** del sistema de fracturas, en estas fotos se mostrara un panorama general de la zona de estudio y otra en la dirección de la fractura.

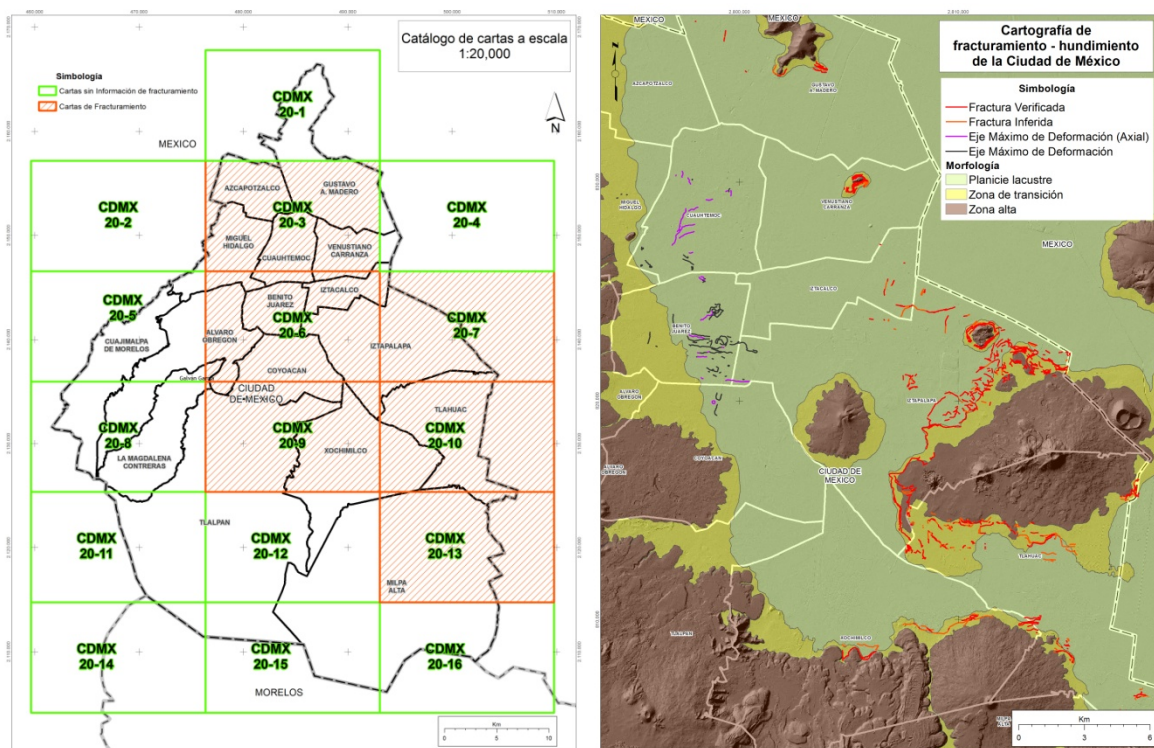
Resultados del levantamiento cartográfico en zonas de fracturamiento y hundimiento en la Ciudad de México

Para el desarrollo de esta actividad se visitaron alrededor de 591 puntos de verificación obtenidos a lo largo de 3 etapas de trabajo en 37 días de trabajo, estos puntos están distribuidos en las zonas mayormente afectadas por fracturamiento del subsuelo y deformación del terreno. Los datos recabados incluyen la posición geográfica en coordenadas Cónico Conforme de Lambert 2008 (proyectadas al datum D_ITFR_2008).

Una vez obtenida la información de los trazos de los sistemas de fracturas y los puntos de verificación, la información se digitalizó en un sistema de información geográfica y se ubicaron dentro de una serie de cartas en escala 1:20000 diseñados para la cartografía de fracturamiento y rasgos de hundimientos identificados; para este caso solo fueron empleadas 6 de las 16 cartas, debido a que en estas se concentra este fenómeno geológico estas cartas (Mapa 7) son: la carta CDMX-3 cubre parte de las delegaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Cuauhtemoc y Venustiano Carranza, la carta CDMX-6 cubre parte de las delegaciones Álvaro Obregón, Benito Juárez, Iztacalco, Coyoacán e Iztapalapa, la carta CDMX-7 las delegaciones Iztapalapa y Tlahuac, la carta CDMX-9 las delegaciones Tlalpan, Coyoacán y Xochimilco, la carta CDMX-10 las delegaciones Xochimilco, Iztapalapa y Tlahuac y la carta CDMX-13 las delegaciones Milpa Alta, Tláhuac y Xochimilco.

Durante el mapeo de rasgos de fracturamiento y deformación fueron cartografiados 854 elementos, dando una longitud total de 197304.52 metros de los cuales el 56% pertenecen a sistemas de fracturamiento verificados, el 23% a patrones de fracturamiento inferidos y el 21% a ejes máximos de deformación.

A continuación se muestra la cartografía de fracturamiento de la Ciudad de México (Mapa 8).



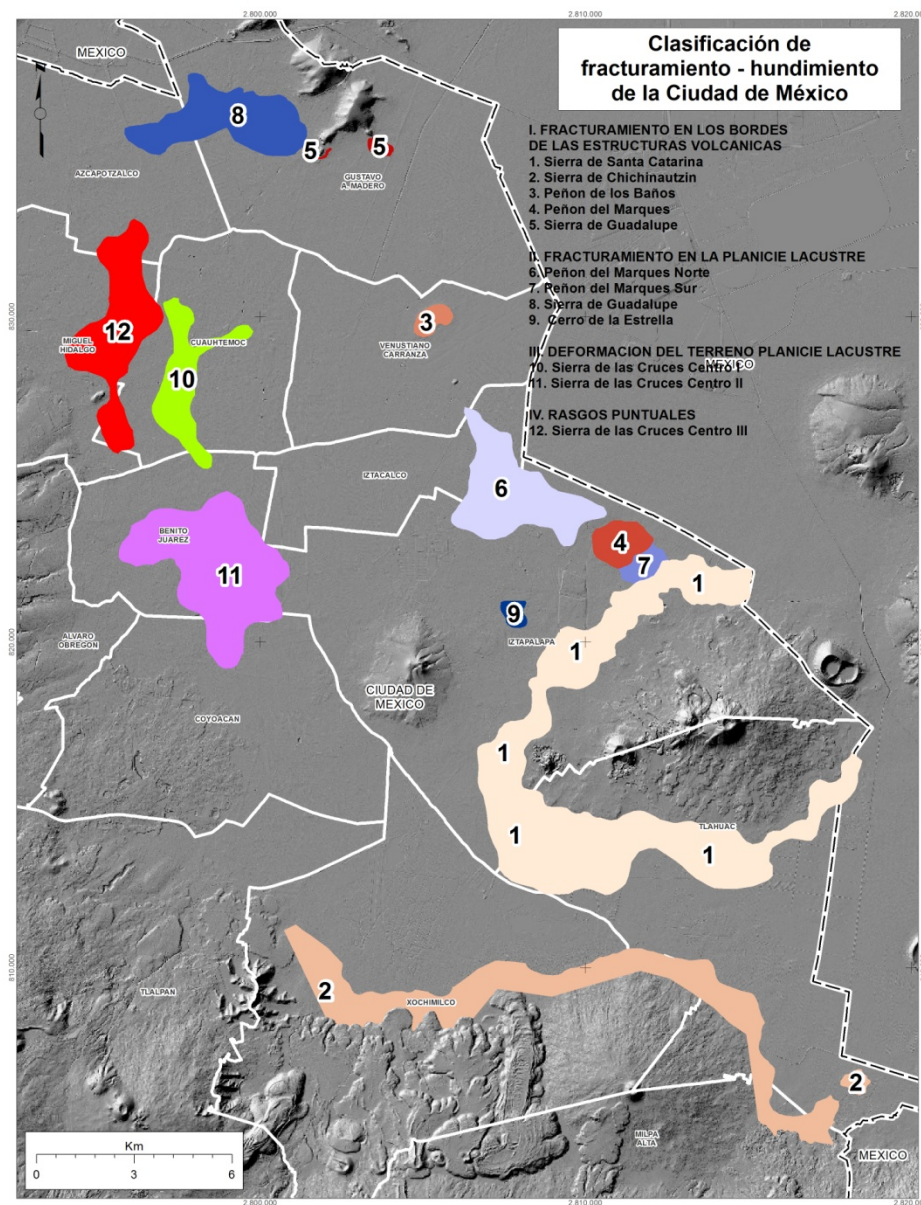
Mapa 7 y 8. En el primero (izquierda) se muestra la distribución de las cartas a escala 1:20,000 en las que se presenta el problema de fracturamiento, en la parte (derecha) se muestra la distribución del fracturamiento según las cartas referidas.

En función de la información obtenida se muestra a continuación las Delegaciones con mayor afectación en función de la concentración de fracturamiento y deformación del terreno en su territorio: Iztapalapa 45.5%, Tláhuac 22.3%, Benito Juárez 10.5%, Xochimilco 7.9%, Venustiano

Carranza 4.6%, Cuauhtémoc 4.3%, Gustavo A. Madero 2.3%, Iztacalco con el 1.5% Coyoacán 1%, Milpa Alta 0.2% y Miguel Hidalgo 0.1%.

4.2. Análisis de la distribución espacial del fracturamiento

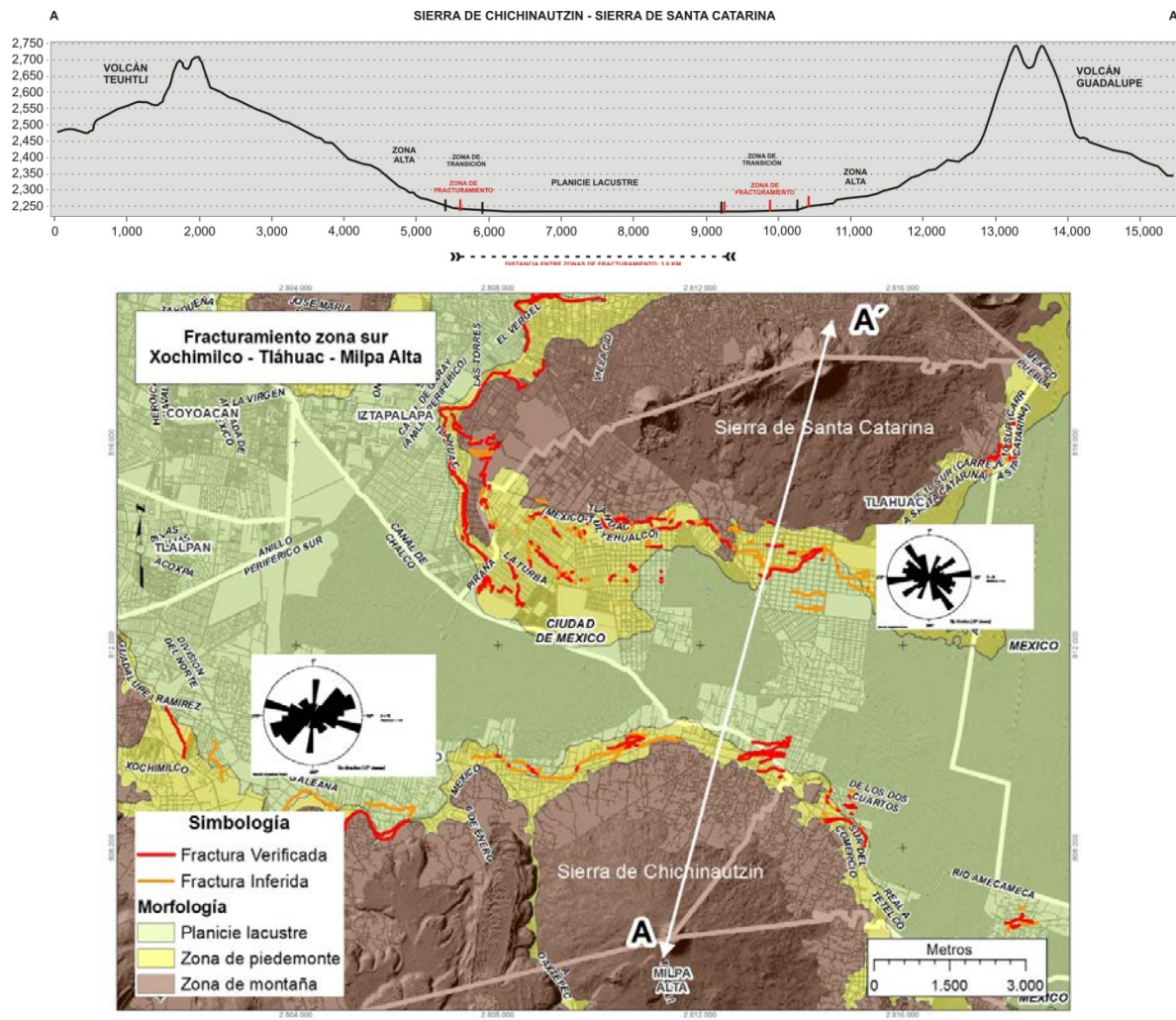
A partir de los datos estructurales obtenidos a lo largo de los sistemas de fracturamiento y zonas de deformación del terreno, se realizó una clasificación de las fracturas y deformación del terreno, cuyas delimitaciones están en función de las características morfométricas del terreno y la localización de los sistemas de fracturamiento y deformación del terreno identificada en cada sitio (Mapa 9).



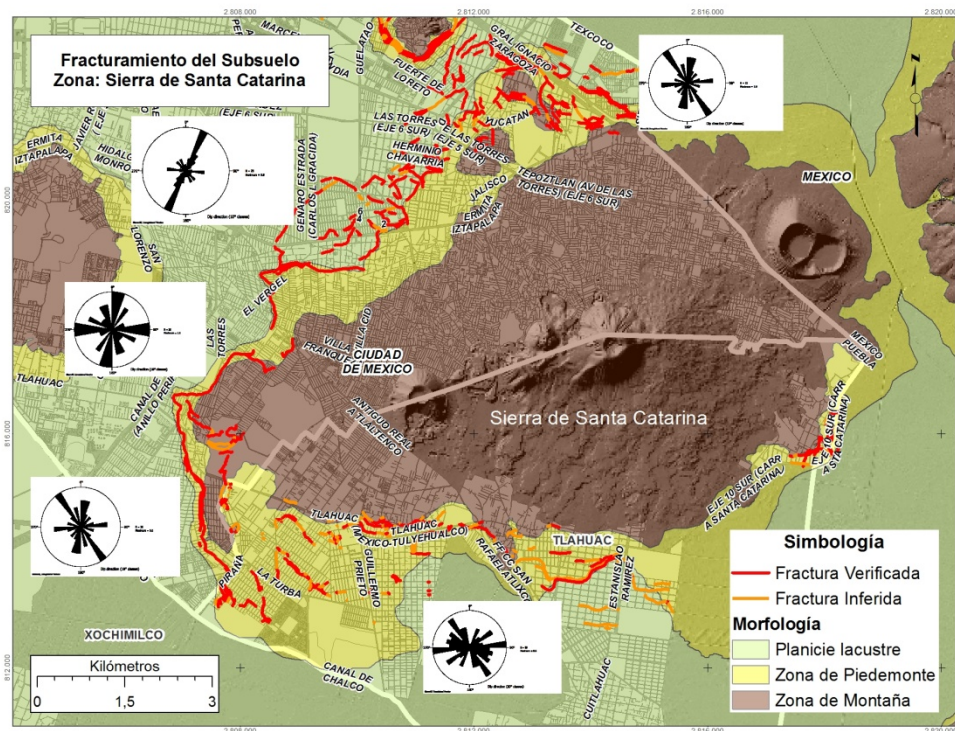
Mapa 9. Delimitación de los sistemas de fracturamiento y hundimiento en la Ciudad de México.

1) *Fracturamiento en los Bordes de las Estructuras Volcánicas.* En estas zonas se muestra que la mayoría de las fracturas están asociadas a patrones de fracturamiento y geometrías que zigzaguean la periferia de la Sierra de Santa Catarina, Sierra de Chichinautzin, Peñón de los Baños, Peñón del Marques y la Sierra de Guadalupe. Las fracturas muestran direcciones preferenciales NW-SE y en menor escala NE-SW, la similitud entre los rasgos volcánicos de las sierras y su variación en la orientación de las fracturas muestran que el desarrollo de este fenómeno en escala regional se encuentra controlado por el borde de estas estructuras volcánicas y no por la presencia de un fallamiento activo. El fenómeno de fracturamiento en esta zona se encuentra asociado a la línea de costa del antiguo lago y a los contactos entre depósitos volcánicos sepultados con los sedimentos lacustres (arcillas y limos), estos contactos originan desplazamientos verticales diferenciales con geometrías de fracturamientos escalonados, lineales y radiales principalmente.

Un ejemplo de fracturamiento se presenta entre los bordes de la Sierra de Catarina y la Sierra de Chichinautzin (Mapa 10) donde se muestra un sistema de fracturamiento preferencial con orientación NE-SW que este es más frecuente en el borde de la Sierra de Chichinautzin y dos sistemas de fracturamiento secundarios con orientación NW-SW y E-W estos últimos parecen predominar en el borde de la sierra de Santa Catarina; la geometría del fracturamiento son principalmente lineales, escalonadas y circulares, estos están asociados a frentes de lava y depósitos de flujos de escoria.

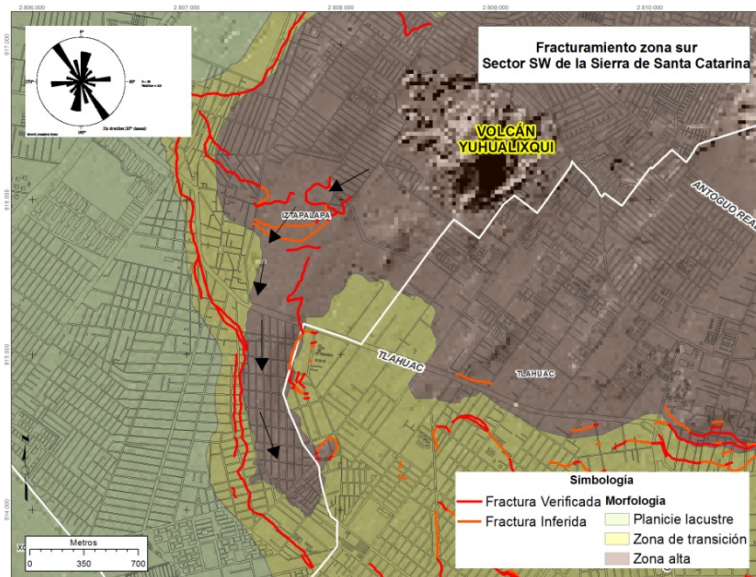


En el caso de los bordes de la Sierra de Santa Catarina ([Mapa 11](#)) los sistemas de fracturamiento muestran que en la parte SW se muestra una orientación general NW-SE, mientras que para el sector NW la orientación cambia ligeramente hacia el NE-SW, mientras que para la parte norte su orientación cambia al NW-SE. Estos cambios obedecen principalmente a distintos frentes de depósitos volcánicos que fueron cubiertos por secuencias arcillosas, la geometría del fracturamiento en esta zona es de tipo escalonada y curvilínea.



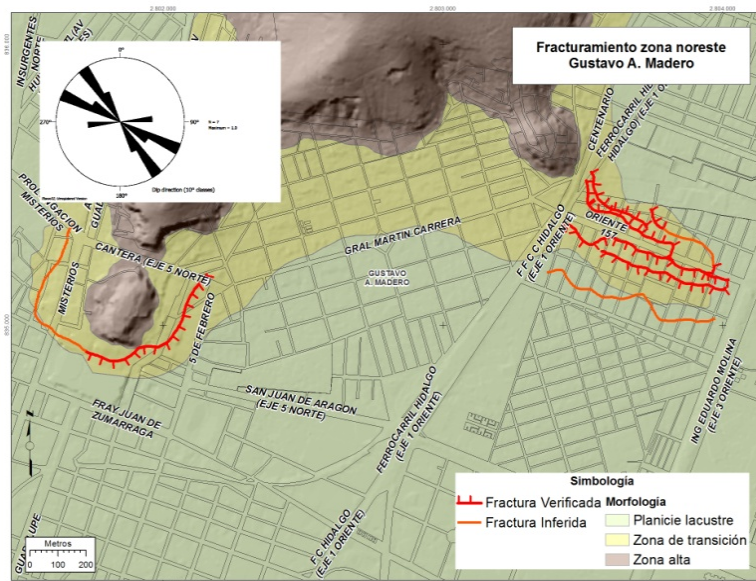
Mapa 11. Zona de fracturamiento en la periferia de la Sierra de Santa Catarina y rosetas de fracturamiento obtenidas en cada sitio.

Uno de los rasgos más significativos identificados dentro de las zonas de fracturamiento en la Sierra de Santa Catarina en la parte SW y la Sierra de Guadalupe hacia el sector SE (Mapa 12) es la presencia de estructuras volcánicas sepultadas, en el primer caso corresponde a una secuencia de lava emitida del volcán Yuhualixqui que es un cono de escoria localizado en el extremo oeste de la Sierra de Santa Catarina, en este caso el sistema de fracturas que rodea a esta secuencia muestra un patrón de fracturamiento con orientación preferencial NW-SE, sin embargo el sistema de fracturamiento se muestra con mayor intensidad hacia el lado oeste que hacia el otro extremo, esto se debe a que parte de esta estructura se encuentra cubierta por mayores depósitos volcánicos.



Mapa 12. Zona de fracturamiento sobre depósito volcánico del Volcán Yuhualixqui en el sector SW de la Sierra de Santa Catarina y su roseta de fracturamiento obtenida.

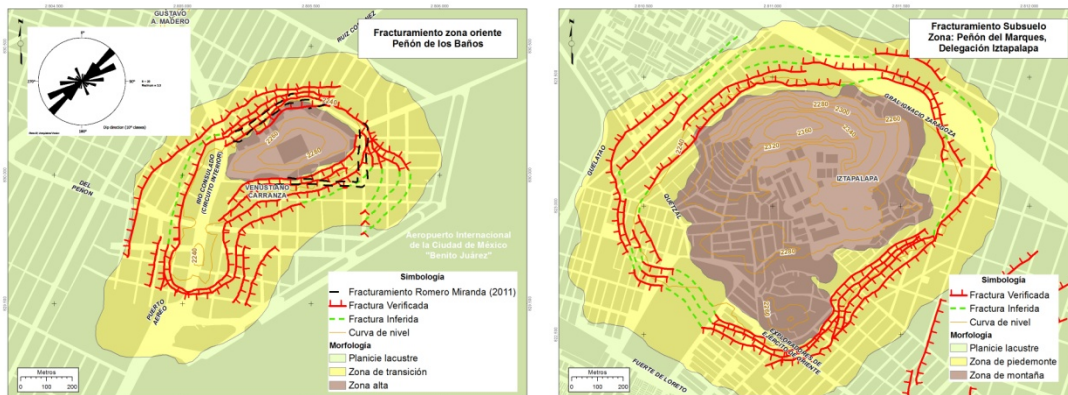
En el segundo caso ([Mapa 13](#)), se trata de una secuencia volcánica cubierta por depósitos arcillosos, y que en superficie solo se muestra patrones de fracturamiento con geometrías escalonadas, lineales y curvilíneas, con una orientación preferencial NW-SE y alcanzando un desnivel del terreno de aproximadamente 4 metros, todos estos elementos en conjunto dibujan un contorno similar al frente de una secuencia volcánica localizada en uno de los extremos SE de la Sierra de Guadalupe.



Mapa 13. Zona de fracturamiento sobre el flanco SE de la Sierra de Guadalupe en la colonia Salvador Díaz Mirón en la Delegación Gustavo A. Madero y su roseta de fracturamiento obtenida.

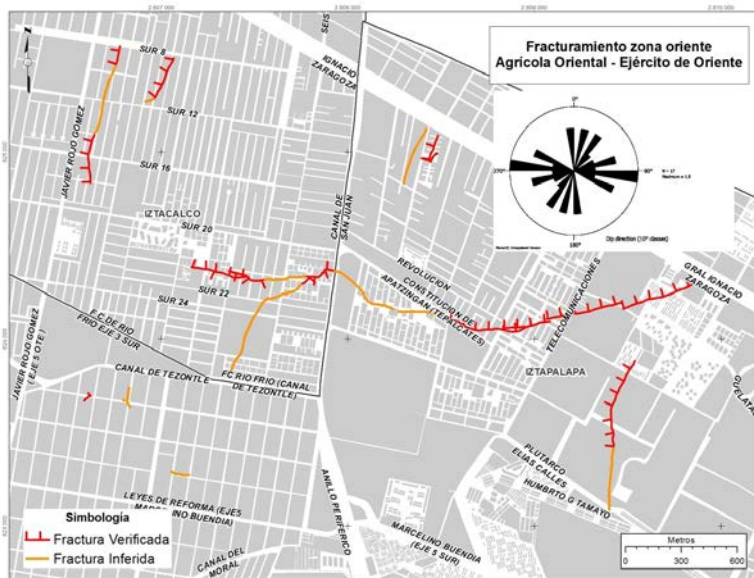
Otros sistemas de fracturamiento particulares son los identificados en las periferias de las estructuras volcánicas del Peñón de los Baños y el Peñón del Marques ([Mapa 14 y 15](#)) forma donde la geometría del fracturamiento son preferentemente radiales y escalonadas y donde la dirección

preferencial es NE-SW, en estas zonas la mayor parte de la deformación se localiza alrededor de estas estructuras volcánicas debido al contacto abrupto entre los depósitos volcánicos y el relleno sedimentario. A pesar de que en estos sitios los desplazamientos sobre la trayectoria de las fracturas es preferencialmente vertical, se puede observar en algunos casos una deformación del terreno en sentido horizontal de menor magnitud.



Mapa 14. Fracturamiento del subsuelo en la periferia del Peñón de los Baños (Izquierda) y **Mapa 15** donde se muestra el fracturamiento en la zona del Peñón del Marques.

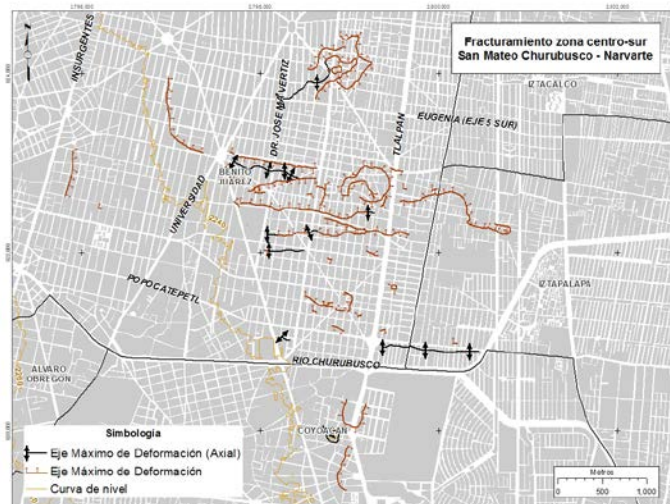
II) Fracturamiento en la Planicie Lacustre. En estas zonas se muestran sistemas de fracturamiento aislados que no muestran una continuidad a lo largo del sistema de fracturamiento, en estas zonas se presentan geometrías preferentemente lineales con una orientación preferencial NE-SW (Mapa 16) y en menor proporción NW-SE. La secuencia de materiales geológicos presentes en esta zona corresponde a secuencias arcillosas y limosas de grandes espesores y que en algunos casos pueden presentar intercalaciones de materiales volcánicos.



Mapa 16. Sitio de ejemplo de fracturamiento en la planicie lacustre, en la zona de Agrícola Oriental en Iztacalco y Ejército de Oriente en la Delegación Iztapalapa.

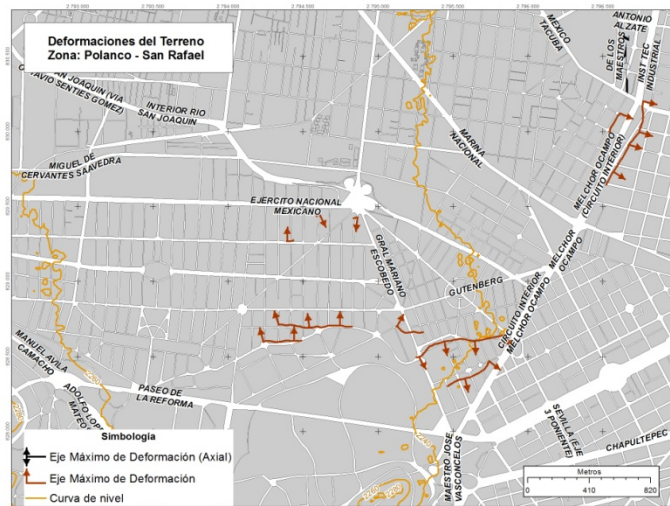
III) Deformación del Terreno en la Planicie Lacustre. En estas zonas se presenta una continua deformación del terreno asociada a la emersión aparente de estructuras cuyo origen puede obedecer a la presencia de antiguos depósitos de materiales, antiguos islotes formados en la época prehispánica o estructuras antropogenicas (cimentaciones, etc.). Esta acción provoca que debido al

continuo hundimiento diferencial del terreno, en superficie se puedan observar ondulaciones sobre el terreno con geometrías cóncavas o convexas (Mapa 17).



Mapa 17. Ejemplo de deformación del terreno en la zona comprendida entre San Mateo Churubusco en Coyoacán y Narvarte en la Delegación Benito Juárez.

IV) Deformaciones Puntuales. En estas zonas se muestran ligeras deformaciones (ondulaciones) en el terreno asociados a depósitos de material aluvial y su posible su frontera o ángulo de incidencia con la planicie lacustre generan una variabilidad en la pendiente en el terreno. Este tipo de deformaciones pueden ser muy locales o pueden abarcar algunos metros; la mayoría de estas zonas se localizan en los bordes de la Sierra de las Cruces en su sector centro. Este tipo de zonas son susceptibles al desarrollo de fracturamiento del subsuelo (Mapa 18).



Mapa 18. Ejemplo de deformaciones puntuales en el tramo comprendido entre Polanco y San Rafael en la Delegación Miguel Hidalgo.

BIBLIOGRAFIA

Castañeda Leonides F. (2011). *Análisis de peligros por procesos de remoción en masa en estructuras volcánicas. Peñón de los Baños y Peñón del Marques, Distrito Federal.* Tesis para obtener el grado de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).

López Mendoza E. (2012). *Análisis del fracturamiento de las zonas de topografía baja del Distrito Federal para evaluar áreas vulnerables a la contaminación de los acuíferos.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

López Miranda E. (2006). *Estudio para la evaluación de causas de agrietamiento en diversas regiones de la Delegación Tláhuac.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1-15.

Rosen, P.A., Hensley, S., Peltzer, G., Simons, M., 2004. Updated repeat orbit interferometry package released. *EOS Transactions - American Geophysical Union* 85