

Convenio de colaboración entre el Centro de Geociencias de la UNAM y
la Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal



Estudio Geológico de Grietas y Zonas de Hundimiento en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano, Delegación Iztapalapa.

Responsable del Proyecto:

Dra. Dora Celia Carreón Freyre,
Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG).
Centro de Geociencias, UNAM.

Duración: 19 de Noviembre al 3 de Diciembre de 2013

Equipo de trabajo:

- Geóg. Raúl I. Gutiérrez Calderón, Responsable del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG) de la Delegación Iztapalapa (DI)
- Pas. Ing. Marcos González Hernández, Encargado de Geología. Tesista UNAM.
- Ing. Félix Antonio Centeno Salas. Encargado de Prospección Geofísica. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- Pas. Lic. Geóg. Carlos Felipe Alcántara, Encargado Cartografía Digital. Tesista UNAM.
- Pas. Ing. Walter Antonio Flores García, Sísmica. Tesista UNAM.
- Dr. Mariano Cerca Martínez, Modelo de deformación. LAMG-UNAM.

Fecha de Entrega: 3 de Diciembre de 2013



Actividades realizadas

1. Mapeo de grietas
2. Mapa de dirección de movimientos
3. Levantamiento de predios afectados geo-referenciados
4. Mediciones geoelectricas geo-referenciadas
5. Mediciones georadar geo-referenciadas
6. Procesado y modelación de datos
7. Integración de resultados
8. Elaboración de informe final.

Estudios complementarios:

- Estudio geológico local y regional
- LiDAR e InSAR
- Levantamiento por sísmica de ondas superficiales en sitios selectos
- Propuesta de un modelo conceptual de deformación

Objetivo Principal:

Identificar y caracterizar la existencia de grietas y/o socavaciones del terreno, en la superficie y en el subsuelo en la Colonia Consejo Agrarista como apoyo para la definición de la desocupación del suelo.

Metas:

- Determinar las características geológicas y estructurales de los materiales que conforman el subsuelo en la zona de estudio.
- Identificar mecanismos disparadores naturales y/o antropogénicos de la deformación del terreno.
- Identificar el origen de grietas y fracturamiento para evaluar sus condiciones de evolución.
- Identificar los sitios en los que esté presente o exista la posibilidad de fracturamiento del terreno que constituya un riesgo.
- Proporcionar información confiable que permita salvaguardar la integridad física de los habitantes de la zona de estudio.



Resumen Ejecutivo

El objetivo principal de este estudio es identificar y caracterizar la existencia de grietas, fracturas y/o socavaciones del terreno, en la superficie y en el subsuelo en la Colonia Consejo Agrarista como apoyo para la definición de la desocupación del suelo. Entre las metas se considera la (1) Determinación de las características geológicas y estructurales de los materiales que conforman el subsuelo en la zona de estudio, (2) la identificación de los elementos disparadores naturales y/o antropogénicos de la deformación del terreno, (3) la identificación del origen de grietas y fracturamiento para evaluar sus condiciones de evolución, (4) la identificación de los sitios en los que esté presente o exista la posibilidad de fracturamiento del terreno que constituya un riesgo para la integridad física de los habitantes de la zona de estudio.

La zona de estudio se localiza en el sector suroeste de la Delegación Iztapalapa, sobre una franja de transición entre secuencias de material limoso y arcilloso depositados en un ambiente lacustre de lo que formaba el ex lago de Texcoco y una planicie piroclástica del flanco noreste del volcán Yuhualixqui o San Nicolás, el cual es un aparato volcánico (Cono Cinerítico de Escoria) que forma parte del Complejo Volcánico Monogénico de la Sierra de Santa Catarina. Gran parte de estos materiales volcánicos emitidos por este aparato volcánico hacia la zona de estudio se encuentran intercalados con depósitos vulcano-sedimentarios (lahares), secuencias fluvio-lacustres y con depósitos de origen lacustre de diferentes espesores cuyas áreas de extensión son variables y controlados por una paleo-topografía.

A partir del trabajo de campo y cartografía de fracturamiento se identificaron cinco sitios de deformación crítica en el Colonia Consejo Agrarista. Dos de ellos se ubican en los márgenes del polígono identificado como zona de alta recurrencia, los alrededores de la calle Insurgentes y de la Avenida Benito Juárez, por lo que se llevó a cabo un estudio detallado de prospección del subsuelo para identificar sus condiciones de deformación. Para la caracterización de la estructura del subsuelo, se requirió de la aplicación de diversas técnicas que permitan obtener la respuesta eléctrica, electromagnética o mecánica de los materiales del subsuelo, y con base en la caracterización de sus propiedades poder inferir la presencia de fracturas, discontinuidades o cambios litológicos. Para este trabajo se aplicaron los métodos de Radar de Penetración Terrestre en su modalidad de multifrecuencia y representación tridimensional; la prospección geoeléctrica en arreglo dipolo-dipolo, también llamado Tomografía Eléctrica, y de Sondeo Eléctrico vertical (SEV) y el método de Sísmica de Ondas Superficiales, conocido por MASW por sus siglas en inglés (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

En la zona de estudio se llevó a cabo la inspección y el levantamiento de un total de 539 viviendas, de las cuales algunas se desplantan directamente sobre los sistemas de fracturamiento cartografiados. Al estudiar con detalle el origen y las condiciones de propagación de los sistemas de fracturamiento identificados fue posible hacer una



propuesta de viviendas en riesgo potencial, es decir que podrían presentar afectaciones debido a que se localizan en zonas en donde ya se tienen evidencias de vulnerabilidad física y/o de deformación.

Para la elaboración del mapa de dirección de movimientos se utilizaron los siguientes criterios indicativos de desplazamiento: (1) Se indica con una flecha a la proyección del vector resultante en la dirección del desplazamiento; (2) Se presenta como un círculo con una cruz a los sitios en donde se identificó el cruce de varios sistemas de fallas o rasgos estructurales mayores y que ocasionan la localización de la deformación en los materiales granulares y generan planos de fracturamiento bien definidos y de profundidades importantes; (3) Se marca con círculo negro a los sitios en donde se ha identificado un desplazamiento vertical principalmente asociado a la compresibilidad de los materiales granulares finos, común en las zonas de planicie lacustre, o en zonas que presentan un gradiente de deformación vertical importante con una probable componente gravitacional. De esta manera en el mapa de desplazamiento los sitios críticos del polígono de recurrencia (Calles Insurgentes y Av. Benito Juárez) presentarían un mecanismo de fracturamiento por rasgos estructurales y en los sitios de la Calle Palmas y de la 3ra Cerrada de Fresno se podrían indicar los vectores de desplazamiento hacia la planicie lacustre y zonas de menor pendiente. A partir de la cartografía detallada en la zona de estudio se infiere que el comportamiento mecánico de los materiales es variable a lo largo de los sistemas de fracturamiento y que está condicionado por las características geológicas y la topografía de cada sitio.

Con el trabajo desarrollado en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano se estableció la relación directa entre el fracturamiento y la variabilidad de las condiciones geológicas del subsuelo. Se identificaron como elementos detonadores: la topografía con pendientes mayores a los 10° y la subsidencia asociada a la extracción del agua subterránea. Otros elementos antropogénicos que aceleran este proceso se asocian a la ruptura de las tuberías de agua que en esta zona son en su mayoría rígidas. Esta zona es susceptible a la erosión debido a la ruptura de las tuberías ya que gran parte del agua se infiltra de manera directa sobre los materiales volcánicos (depósitos de caída, flujos piroclásticos) los cuales están pobremente cementados, lo que provoca hundimientos asociados al colapso y/o socavamientos puntuales en la zona.

En la zona de estudio se identificaron varios sistemas de fracturamiento asociados a las condiciones de emplazamiento de los depósitos volcánicos. Las diferentes emisiones volcánicas (explosivas y efusivas) provenientes de la sierra de Santa Catarina dieron origen a una variedad de formas del relieve que pueden sobreponerse, generando rasgos estructurales característicos que localizan la deformación de los materiales granulares que lo sobreyacen. Tal es el caso de las zonas de la Calle Insurgentes localizada entre Braulio Maldonado y Arroyo Frío, Calle Luna entre Palmillas y José López Portillo y la Cerrada de Jesús Araujo esquina Benito Juárez. Cabe remarcar que estas zonas son las que presentan los mayores problemas con el equipamiento y la infraestructura urbana. La



zona de estudio es que corresponde a una zona de contacto entre los materiales volcánicos del Yuhualixqui y materiales fluviales y lacustres, como es el caso de la 3ª. Cerrada de fresnos entre Cedros y Encinos y la Avenida Palmas entre Braulio Maldonado y Jesús Garibay. Para el desarrollo de este trabajo se llevo a cabo una combinación de métodos geofísicos con diferentes grados de penetración y resolución, que combinados con las técnicas más avanzadas de percepción remota InSAR permitieron la identificación y delimitación confiables de las zonas afectadas por fracturamiento y las zonas de potencial afectación.

De manera complementaria se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales que permitirán crear una cultura de prevención y mitigación de estos fenómenos a mediano y largo plazo:

- (1) Realizar estudios de detalles geológicos, geofísicos e hidrogeológicos con el fin de diseñar las medidas de mitigación adecuadas a las condiciones específicas de zonas vulnerables. Una mitigación efectiva y la prevención del riesgo asociado requiere el conocimiento de los factores que originan las fracturas y su evolución. Se debe dar especial atención al análisis de los efectos que puede tener un evento natural extraordinario, como lluvia torrencial o evento sísmico, en sitios particularmente;
- (2) Destinar los sitios de alto riesgo como áreas verdes con espacios utilizados para monitoreo de los movimientos del subsuelo. De esta forma se obtendrá información para crear modelos de deformación que ayudaran a evaluar la vulnerabilidad física del sitio;
- (3) Diseñar estrategias para enfrentar la problemática existente en las zonas vulnerables al fracturamiento que deben formar parte fundamental de los planes de Desarrollo Urbano;
- (4) Llevar a cabo la valoración y monitoreo estructural de la infraestructura civil afectada para conocer la evolución de los daños y sugerir las acciones a ejecutar;
- (5) Llevar a cabo una valoración de vivienda en riesgo para decidir la medida de mitigación adecuada o la reubicación de las familias afectadas por este tipo riesgo geológico;
- (6) Promover la sustitución de redes hidráulicas con materiales flexibles de alta resistencia en las zonas de alta concentración de fracturamiento y de mayor deformación diferencial del subsuelo;
- (7) Promover la utilización de técnicas de mejoramiento del suelo y relleno de fracturas en vialidades en zonas afectadas y en áreas comunes de unidades habitacionales o equipamientos colectivos afectados. Es importante remarcar que el relleno de fracturas debe ser diseñado específicamente para las condiciones de la zona afectada, el relleno debe presentar las mismas propiedades físicas de los materiales naturales del subsuelo para evitar que un contraste de comportamiento mecánico propicie la propagación del fracturamiento;
- (8) Implementar medidas urbanas para restringir el paso a vehículos pesados en zonas donde la concentración del fracturamiento sea muy alta o que se tengan materiales susceptibles al colapso, como deposito volcánicos de caída. Estas medidas de prevención también deben formar parte de de los planes de Desarrollo Urbano;
- (9) Crear una cultura prevención zonas vulnerables y de convivencia con los fenómenos de fracturamiento y subsidencia capacitando a la población para identificar sus riesgos, monitorear la deformación y definir las posibles medidas de mitigación.



TABLA DE CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	
1. Contexto geológico	1
1.1 Condiciones geológicas regionales	1
1.2 Condiciones geológicas en la zona de estudio	4
1.3 Mapeo de grietas. Cartografía del fracturamiento	6
2. Cartografía Digital	10
2.1 Modelos de Elevación Digital (MED)	10
2.2 Percepción Remota. Método InSAR	13
2.3 Manejo del Sistema de Información Geográfica (SIG)	15
3. Prospección Geofísica	19
3.1 Método Radar de Penetración Terrestre (RPT)	19
3.2 Métodos Geoeléctricos	24
3.3 Método de Sísmica de Ondas Superficiales (MASW-2D)	32
4. Estudios de detalle en sitios de deformación crítica	34
4.1 Sitio 1. Calle Insurgentes	35
4.2 Sitio 2. Avenida Benito Juárez	41
4.3 Sitio 3. 3ra Cerrada de Fresno	46
4.4 Sitio 4. Calle de Luna	49
4.5 Sitio 5. Calle de Palmas	50
5. Integración de Resultados	52
5.1 Levantamiento de predios afectados geo-referenciados	52
5.2 Mapa de dirección de movimientos	54
5.3 Modelo conceptual de deformación en la zona de estudio	55
6. Conclusiones y Recomendaciones	59

ANEXO CARTOGRÁFICO



1. Contexto geológico

1.1 Condiciones geológicas regionales

La Delegación Iztapalapa como parte de los valles volcánicos que integran la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

La Faja Volcánica Transmexicana es el nombre con que se conoce una provincia geológica de México que se caracteriza por la presencia de edificios volcánicos y que atraviesa el país de poniente a oriente desde las cercanías de Guadalajara Jalisco hasta Jalapa Veracruz. Como su nombre lo indica es una faja o cinturón de aproximadamente 1000 km de longitud y con un ancho en superficie variable entre 50 y 200 km. El proceso de emisión volcánica que ha dado origen a esta cadena de estructuras se ha mantenido al menos durante los últimos 16 millones de años (Ma), durante ese tiempo se ha acumulado un gran volumen de productos volcánicos sobre un basamento rocoso. Las acumulaciones volcánicas, así como las fallas y fracturas conforman en superficie conjuntos de elevaciones y depresiones, a estas últimas se les llama valles volcánicos. Algunos ejemplos de estas depresiones son: la laguna de Chapala, el lago de Cuitzeo, el Valle de Morelia, la depresión del Bajío, el Valle de Toluca y por supuesto el Valle de México.

Como los procesos de formación de los valles son muy lentos (duran millones de años) y ocurren en escalas de longitud grandes (cientos de km), otros procesos asociados a la erosión causada por los ríos y acumulación de agua en superficie han tenido lugar en las mismas zonas. Así, en los valles volcánicos se presentan materiales geológicos que evidencian actividad volcánica, intercalados con materiales acarreados y depositados que varían desde bloques y cantos hasta los limos y arcillas más finos, además de las cenizas volcánicas y otros materiales piroclásticos que se emitían y depositaban de manera quasi-contemporánea a la sedimentación. La Cuenca del Valle de México (CVM) se mantuvo como una sola unidad hidrológica hasta los últimos 10,000 años.

La Cuenca de México (que forma parte de la CVM) está a su vez constituida por cinco subcuencas lacustres que se han diferenciado durante los últimos cientos de años a medida que ha descendido el nivel de agua (Figura 1), de Norte a Sur (1) la sub-cuenca del lago de Zumpango, (2) la sub-cuenca de la Ciudad de México, (3) la sub-cuenca del lago de Texcoco, (4) la sub-cuenca del lago de Xochimilco y (5) la sub-cuenca del lago de Chalco. La zona topográficamente mas baja de la cuenca corresponde al lago de Texcoco, es por esto que los sedimentos de esta cuenca presentan un contenido de sales mayor que las demás. La sub-cuenca lacustre de la Ciudad de México fue la primera en ser habitada en tiempos prehispánicos. Desde que los mexicas fundaron su ciudad, en 1325, construyeron calzadas y diques para moderar el flujo de las aguas de lagos y ríos, con el fin de prevenir inundaciones y evitar que los lagos de Chalco y Xochimilco se mezclaran con las aguas saladas del de Texcoco.

La mancha urbana de la Ciudad de México está actualmente desplantada sobre las diversas estructuras naturales y antropogénicas de la región.

En la parte nor-oriental de la Ciudad de México se localiza la Delegación Iztapalapa. Como se puede observar en el mapa de relieve de la Figura 2, la zona de la Delegación tiene características geológicas particulares que se deben resaltar.



Figura 1. Morfología de la Cuenca de México con diferenciación de las subcuencas lacustres que la constituyen.

Condiciones geológicas de la Delegación Iztapalapa

Los rasgos geológicos que pueden observarse en superficie en la delegación Iztapalapa corresponden a tres zonas morfológicas principales: las elevaciones que corresponden a edificios volcánicos, el piedemonte con materiales gruesos de depósitos de río (fluviales) y la zona de planicie lacustre que está constituida por sedimentos finos principalmente. Dentro del ambiente lacustre generalizado (que se estableció en la Cuenca de México cuando se formó la Sierra Chichinautzin), se pueden diferenciar por su relieve los eventos

volcánicos que prevalecieron durante y después de formada la cuenca, el Cerro de la Estrella, el Peñón del Marqués y la Sierra de Santa Catarina (Figura 2). Esto indica que es en el territorio esta Delegación en donde coincidieron en tiempos geológicos relativamente cortos (algunos miles y cientos de años) los procesos volcánicos y sedimentarios que dieron origen a los materiales que se localizan en el subsuelo de la demarcación, es decir es la zona con más heterogeneidad de los materiales del subsuelo.

En la Figura 2 se muestra el mapa geológico de la Ciudad de México preparado en conjunto por el Servicio Geológico Metropolitano y la Secretaria de Protección Civil del Distrito Federal. La versión que se presenta fue accesada el día 23 de agosto de 2010 en la página web: http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html. En este mapa se observa que la geología de la ciudad de México puede dividirse en dos grandes áreas: 1) área de las sierras hacia el occidente y al sur donde predominan las rocas volcánicas (colores en tonos café), 2) área de planicie lacustre en color verde.

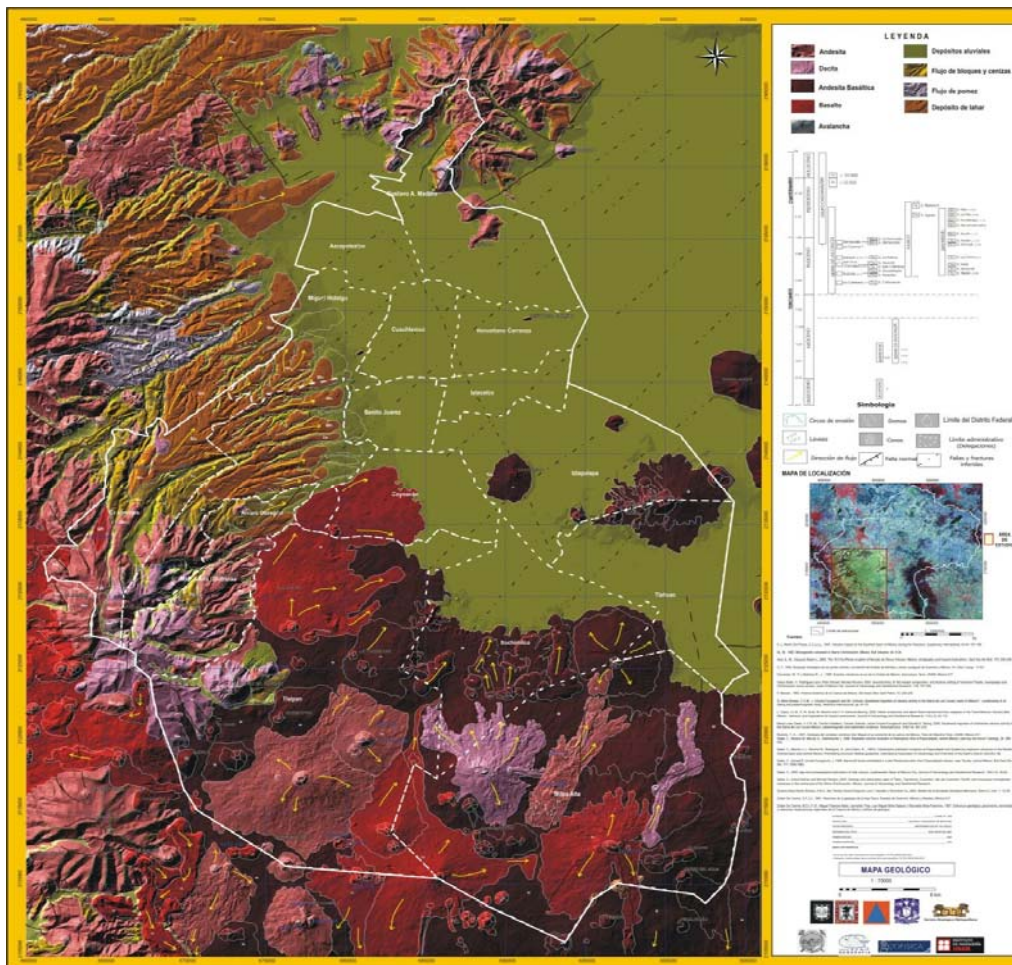


Figura 2. Mapa Geológico de la Ciudad de México y alrededores (Servicio Geológico Metropolitano y Secretaria de Protección Civil del D. F)

1.2 Condiciones geológicas en la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el sector suroeste de la Delegación Iztapalapa, se ubica sobre una franja de transición entre secuencias de material limoso y arcilloso depositados en un ambiente lacustre de lo que formaba el ex lago de Texcoco y una planicie piroclástica del flanco noreste del el volcán Yuhualixqui o San Nicolás, el cual es un aparato volcánico (Cono Cinerítico de Escoria) que forma parte del Complejo Volcánico Monogenético de la Sierra de Santa Catarina (Figura 3). Dentro de las principales características que presenta este cono cinerítico se puede mencionar que tiene un diámetro aproximado de 1 km y una altura promedio de 120 m sobre el nivel del valle; el aparato volcánico está constituido por una serie de depósitos volcánicos entre los que destacan las secuencias de flujos piroclásticos de escoria, bloques y cenizas, secuencias de oleadas piroclásticas y depósitos de caída, bajo esta cubierta piroclástica se ha inferido la presencia de lavas de composición basáltica-andesítica, la exposición de estos materiales se encuentra principalmente hacia el flanco norte como resultado de la extensiva extracción de materiales utilizados en la construcción, en estos cortes se pueden apreciar las secuencias de estos materiales y su heterogeneidad y los espesores promedios de cada uno de los depósitos.

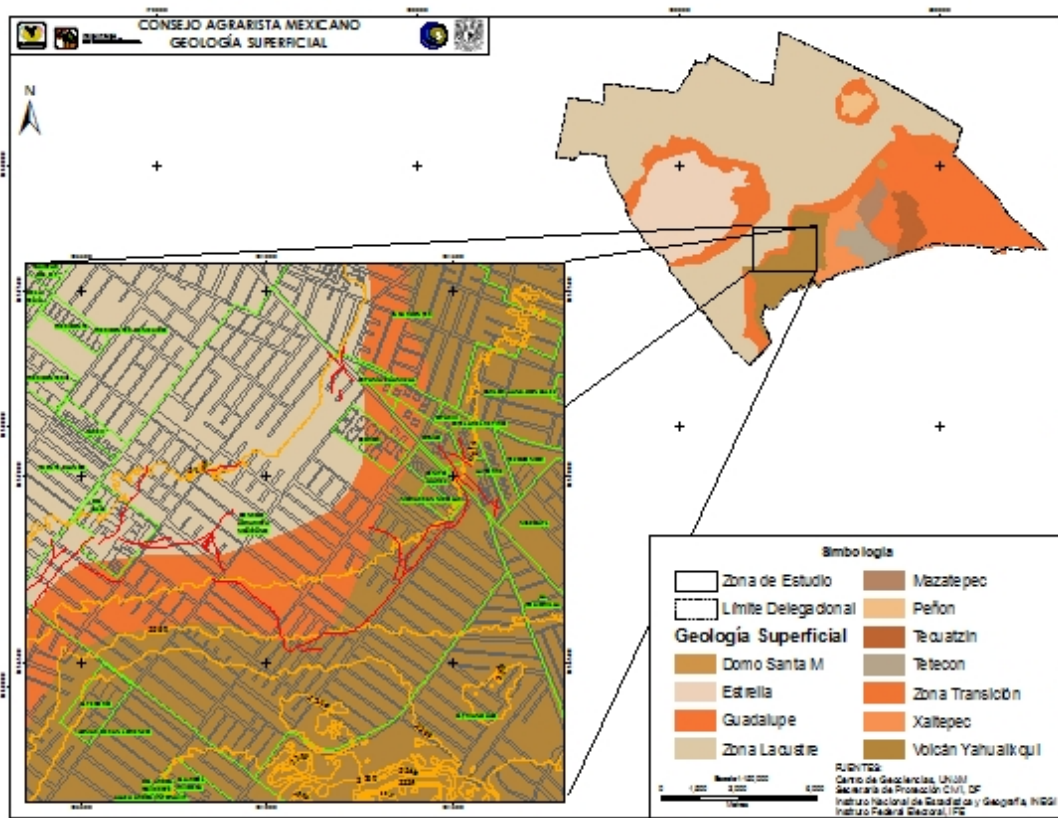


Figura 3. Condiciones geológicas de la Delegación Iztapalapa y ubicación de la zona de estudio con la geología superficial de detalle.

Gran parte de estos materiales volcánicos emitidos por este aparato volcánico hacia la zona de estudio se encuentran intercalados con depósitos vulcano-sedimentarios (lahares), secuencias fluvio-lacustres y con depósitos de origen lacustre de diferentes espesores cuyas áreas de extensión son variables y controlados por una paleotopografía (Figura 4). Otra característica de los materiales volcánicos y lacustres es la alta heterogeneidad de sus propiedades físicas y mecánicas las cuales, al estar sujetas a factores como la extracción de agua, cargas estáticas y dinámicas, determinaran el comportamiento mecánico diferenciado en la zona de estudio y en consecuencia el fracturamiento..

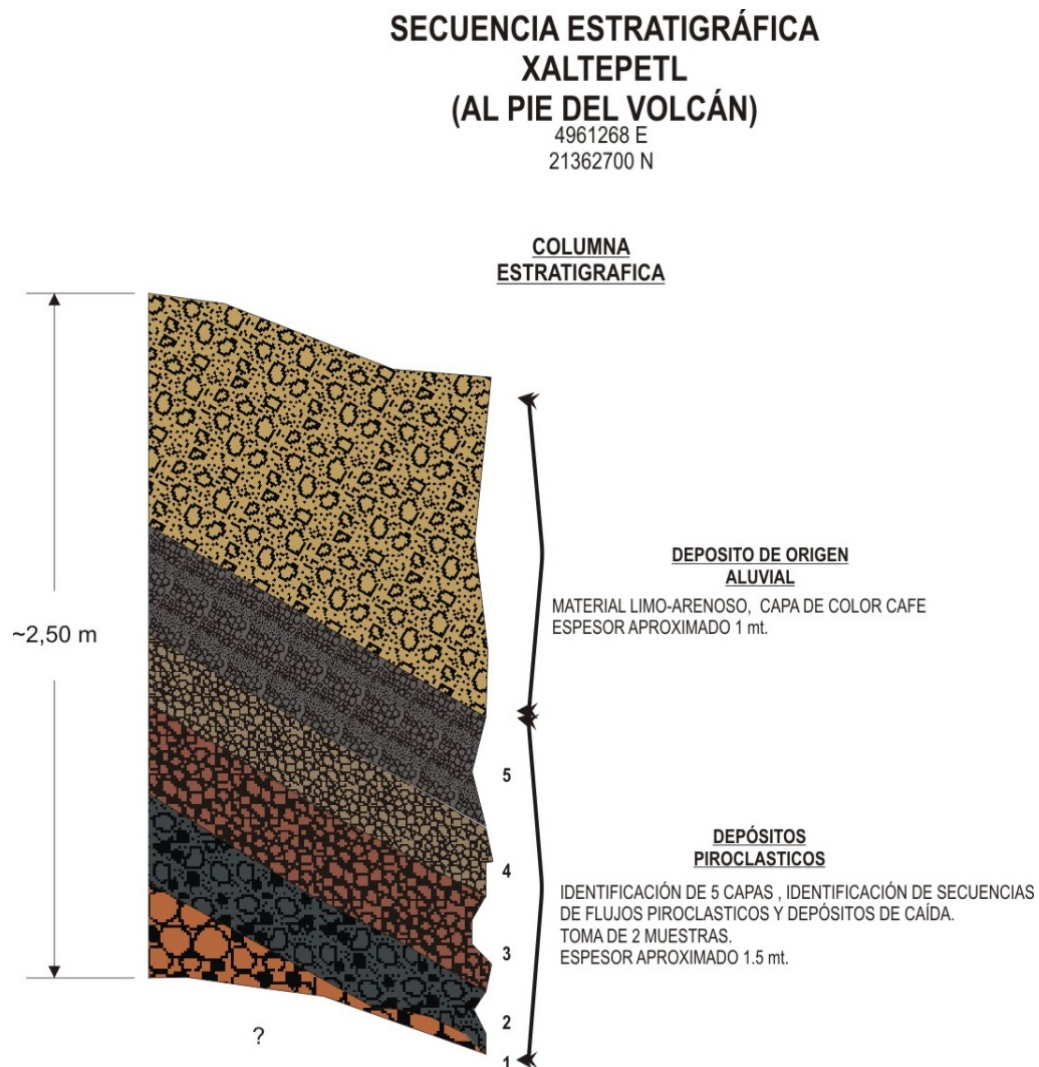


Figura 4. Estratigrafía observada en el sector suroeste del Volcán Yuhualixqui.

1.3 Mapeo de grietas. Cartografía del fracturamiento

Para la elaboración de la cartografía de fracturamiento en la Colonia Congreso Agrarista Mexicano se llevo a cabo un recorrido en todas las calles de la Colonia, identificándose principalmente los rasgos para definir la trayectoria principal de fracturamiento a partir de esta se estima el radio de influencia, orientación y desnivel, así mismo se describen otros rasgos morfométricos como es la geometría del fracturamiento y/o otras fracturas secundarias, estos elementos son fundamentales para la descripción de la causa del fracturamiento del subsuelo (Figura 5)..

En la Colonia Consejo Agrarista se identificaron dos principales sistemas de fracturamiento el primer sistema tiene una orientación NE-SW, el segundo NW-SE, como se observa en el mapa de fracturamiento de la Figura 6. Cada sistema tiene una traza en superficie mayor a los 500 metros, los desniveles en ambos sistemas son irregulares manteniéndose principalmente un rango entre 0-35 centímetros.

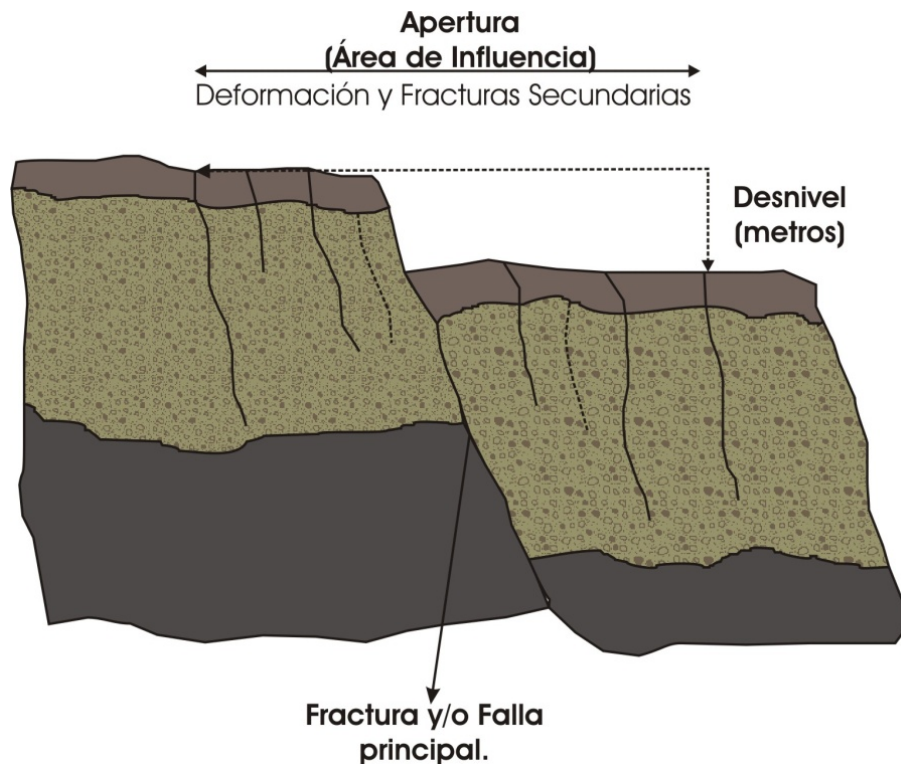


Figura 5. Elementos para la elaboración de la cartografía de fracturamiento.

A partir del trabajo de cartografía del fracturamiento en la zona de estudio se identificaron cinco sitios de deformación crítica que fueron caracterizados a detalle en campo:

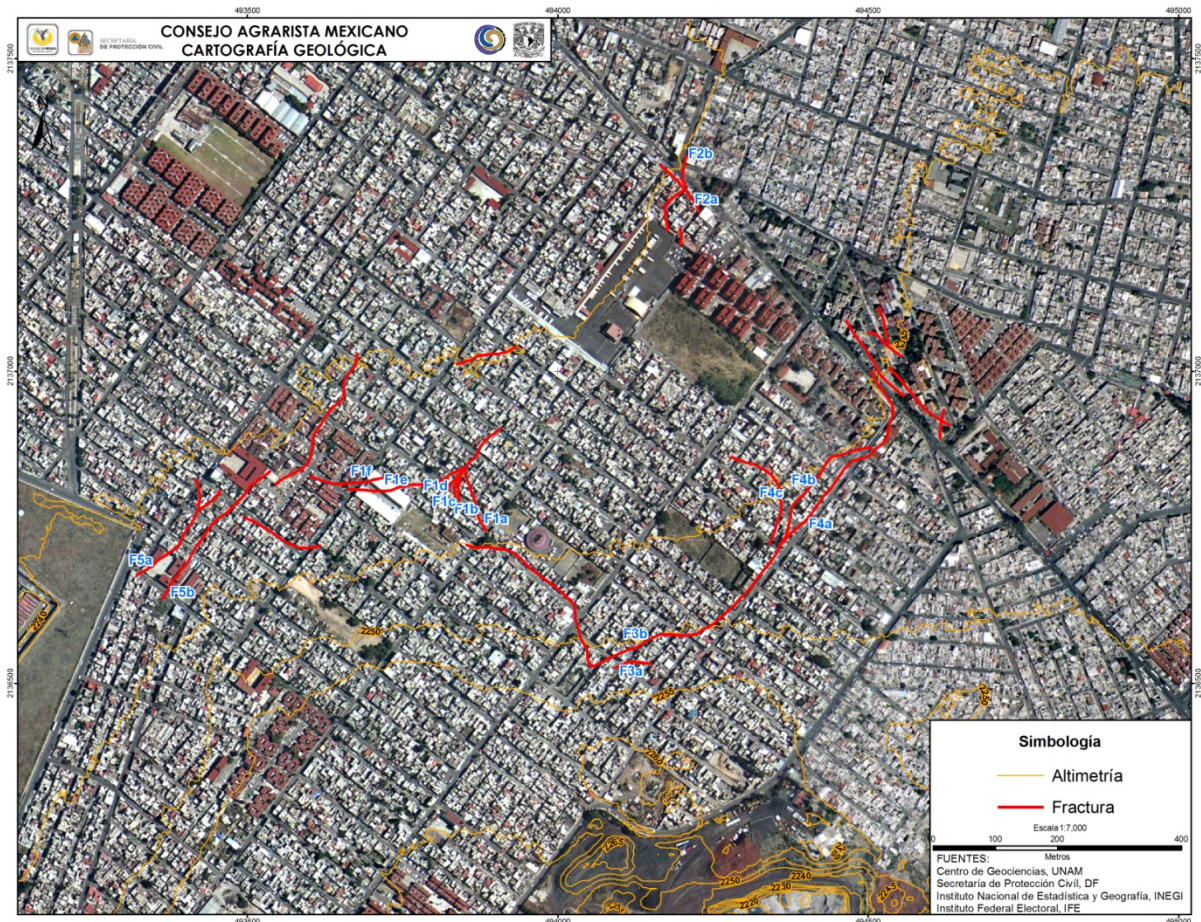


Figura 6. Mapa de fracturamiento de la zona de estudio. Se indican los números de identificación de las fracturas para su referencia en los estudios de prospección geofísica.

Sitio 1. Calle Insurgentes entre Arroyo Frio y Braulio Maldonado

En el sitio se observan una serie de fracturamiento con una longitud de aproximadamente 120 metros con una orientación preferencial NE-SW y NW-SE formando una geometría curvilínea, lineal y en escalón, este sistema de fracturamiento muestra una bifurcación a partir de la trayectoria principal, sus fracturas secundarias no se propagan en superficie a una mayor distancia además sus rasgos observados sobre el terreno muestran que se encuentran en una etapa inicial (Figura 7).

Los datos obtenidos de manera directa en campo muestran un área de influencia entre 2 y 5 metros en promedio a lo largo del todo el sistema de fracturamiento por otro lado los datos de apertura muestran una magnitud entre 10 y 30 centímetros en promedio. El sitio tiene una pendiente aproximada de 8°.



Figura 7. Fracturamiento del subsuelo en la Calle de Insurgentes esquina Encino.

Sitio 2. Calle 3ª Cerrada de Jesús Araujo esquina Avenida Benito Juárez.

En el sitio se observa un sistema de fracturamiento con orientación NE-SW y NW-SE formando un sistema cruzado mostrando una geometría lineal y curvada, este sistema tiene una longitud promedio de 200 metros.

El área cartografía inicio en la Cerrada Del Río y sus efectos del fracturamiento llegan a la Calle Esther Zuno de Echeverría siendo la Cerrada de Jesús Araujo la de mayor afectación tanto en su infraestructura y equipamiento ya que a lo largo de la calle se observa la trayectoria principal del fracturamiento (Figura 8).

El área de influencia a lo largo del sistema de fracturamiento se estimo entre 3 y 6 metros con una apertura errática con una magnitud entre 20 y 40 centímetros en promedio y el desnivel obtenido es entre 0 y 30 centímetros. En la zona se muestra una pendiente aproximadamente de 10°.



Figura 8. Fracturamiento del Subsuelo en la Cerrada de Jesús Araujo, la cual es paralela a lo largo de toda la calle

Sitio 3. Calle 3ª. Cerrada de Fresno entre Fresno y Cedro.

El sistema de fracturamiento que cruza esta zona tiene una orientación preferencial NE-SW la longitud de este sistema alcanza los 300 metros, tiene un área de influencia de aproximadamente de 5 m tomando como eje la trayectoria principal. Las fracturas secundarias se muestran paralelas entre si y la geometría formada en este sitio es lineal y escalonada, las aperturas mostradas en la traza de algunas fracturas alcanzan los 0.30 metros y se observa en algunos segmentos de la traza del fracturamiento una serie de socavamientos de diversas magnitudes (Figura 9). El desnivel promedio es de 0.80 metros, en esta zona es donde se han presentado una recurrencia de colapsos de material provocando socavamientos de diferentes magnitudes.

La pendiente de esta zona oscila entre los 5 y 12°, esta zona de estudio se localiza en una zona de transición entre los depósitos volcánicos y la acumulación de materiales volcánicos retrabajados.



Figura 9. Fracturamiento del subsuelo y sus efectos sobre la infraestructura y equipamiento urbano.

Sitio 4. Calle Luna entre Palmillas y Jesús Araujo

El fracturamiento en esta zona tiene una orientación NE-SW y NW-SE y tiene una longitud mayor a los 350 metros. Se presenta una geometría en forma curvada y lineal, los elementos cartografiados son segmentados ya que en algunos casos no se muestra una misma continuidad pero se puede asociar o inferir por algunos otros elementos, las fracturas identificadas muestran algunos rasgos que podrían delimitar parte de una paleotopografía volcánica asociada a frentes de depósitos volcánicos. El radio de influencia de las fracturas principales es de 2.5 metros y su apertura es de 0.70 metros en promedio (Figura 10).

Las fracturas secundarias observadas en campo son paralelas a la trayectoria principal; otro de los rasgos observados es que en un segmento se muestra la intersección de los

dos sistemas de fracturamiento asociados a los límites de los posibles depósitos volcánicos, en esta zona se tiene una pendiente que oscila entre los 5 y 12°.



Figura 10. Calle Luna, propagación del fracturamiento.

Sitio 5. Calle Alcanfor entre Braulio Maldonado y Jesús Garibay (Cercano a la Esc. Prim. José María Velasco)

El fracturamiento en este sitio tiene una orientación preferencial NE-SW y es parte de la continuación de un sistema de fracturamiento que viene desde la colonia Lomas de San Lorenzo y que finaliza en este sitio. Con la elaboración de la cartografía en este sitio se delimitaron dos trayectorias principales de fracturamiento las cuales son paralelas entre si y tiene un espaciamiento entre ellas de 20 metros aproximadamente, estas dos trayectorias forman un escalonamiento que se propaga en superficie a una distancia mayor a los 250 m. Este sistema se localiza en una zona de transición entre los depósitos volcánicos del Yuhualixqui y secuencias limo-arcillosas. A lo largo de la trayectoria de estas fracturas y se tiene desniveles de 0.60 metros en promedio mientras que el área de influencia es de 5 metros y su apertura es de 0.80 metros.

2. Cartografía Digital

Para este estudio se incluyen las siguientes de cartografía digital remota y de campo.

2.1 Modelos de Elevación Digital (MED)

La técnica de teledetección llamada *Light Detection and Ranging (LiDAR)* emite pulsos de la luz polarizada entre el violeta y el infrarrojo cercano. En la mayor parte de los sistemas, un laser de pulso se emplea como transmisor y la radiación laser es colimada y transmitida a la atmosfera. Esta señal interactua con las partículas atmosféricas, causando su dispersión en función del tipo de elemento encontrado (Chuvieco, 1990).

La principal aplicación de la tecnología LiDAR que al ser un método indirecto que realiza levantamientos topográficos mediante la obtención de nubes de puntos, se presenta como una alternativa de la topografía y fotogrametría tradicional (Figura 11).

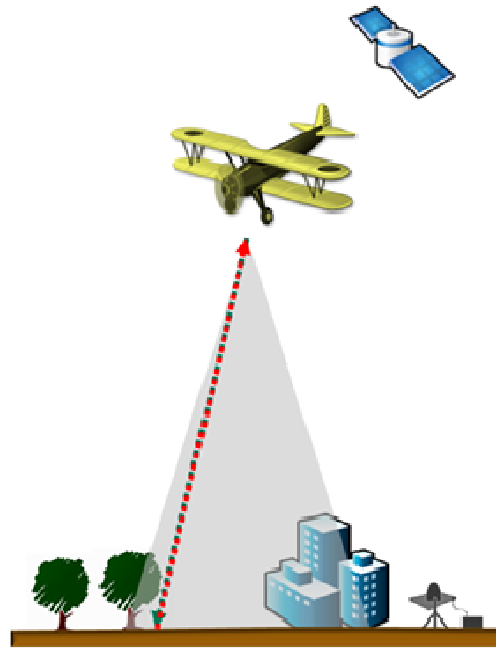


Figura 11. Levantamiento topográfico mediante la técnica LiDAR

Los modelos digitales de elevación de alta resolución LiDAR, escala 1:10,000, se obtiene de la nube de puntos ajustada al terreno mediante procesos geodésicos, de la que se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, generando una "nube de puntos clasificada" a la que se le aplica una interpolación a los puntos clasificados del último retorno y habiendo eliminado aquellos puntos que no pertenecen al terreno como los reflejados por infraestructura, vegetación y objetos aéreos como nubes o pájaros, de esta manera se puede generar un modelo digital de elevación de tipo terreno con una resolución horizontal de 5 m. (INEGI: 2013)

La información LiDAR referente a la Colonia Consejo Agrarista Mexicano se obtuvo a partir de los levantamientos de INEGI, en la cual se observa la zona más baja correspondiente a los 2213.4 msnm al interior de la mina a cielo abierto que se encuentra en la ladera norte del Volcán Yahualixqui. En lo que respecta a la topografía de la colonia los bajos topográficos se presentan en la zona noroeste (que tienen correspondencia con los sitios que presentan mayor subsidencia en la colonia), el sur de la colonia corresponde a altitudes entre los 2260 y 2280 msnm, donde la subsidencia promedio anual es casi nula (Figura 12).

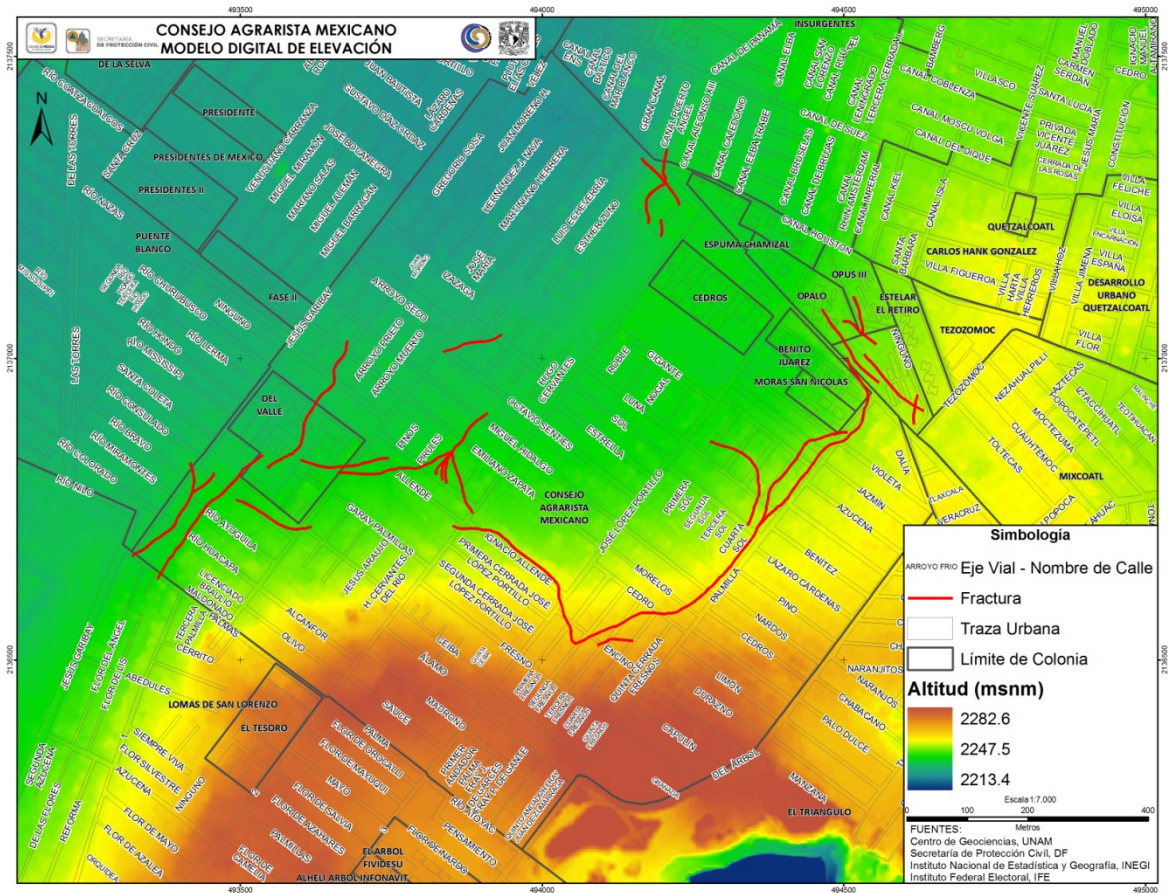


Figura. 12. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la colonia Consejo Agrarista Mexicano.

Estos cambios topográficos corresponden principalmente a dos factores: a) la paleotopografía y topografía en la zona por su cercanías con el edificio volcánico antes mencionado y; 2) al encontrarse el norte la colonia presenta bajos topográficos marcados por encontrarse en la zona lacustre afectada por subsidencia.

2.2 Percepción Remota. Método InSAR

El método Synthetic Aperture Radar (SAR) es un sistema de imágenes de microondas, el cual tiene la capacidad de penetrar en las nubes por el uso de microondas. Opera día y noche ya que es un sensor activo, es decir, no depende de un aporte de energía externa para la obtención de las imágenes. La configuración interferométrica, SAR o InSAR permite la obtención precisa de la trayectoria de desplazamiento de radiación, ya que es coherencia.

Las mediciones de las variaciones de trayectoria de desplazamiento en función de la posición del satélite y el tiempo de adquisición de la imagen (espacio-tiempo), permite la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE), y la medición centimétrica de la deformación de la superficie terrestre. (Figura 13) (ESA: 2007).

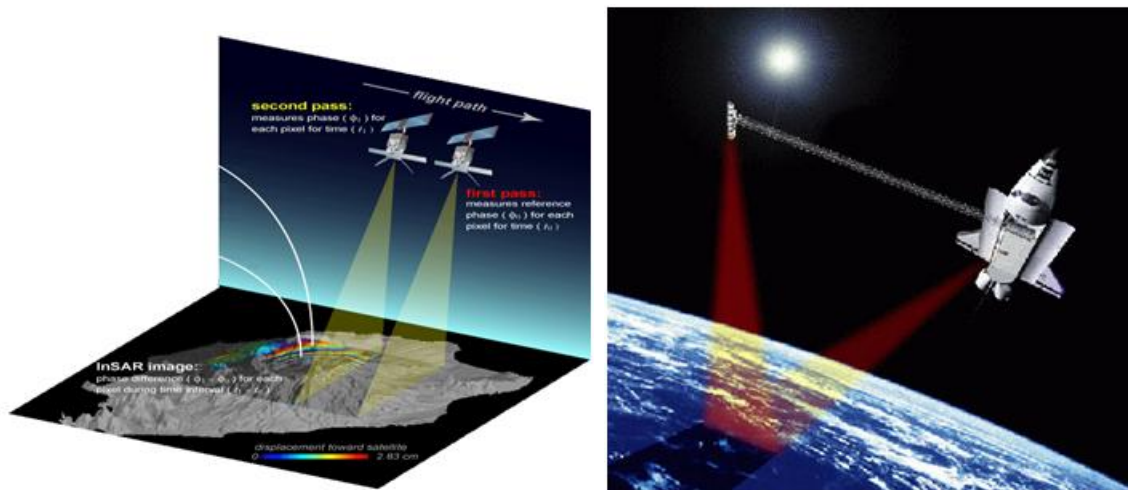


Figura 13. Imagen que muestra la forma de obtención de las imágenes mediante la técnica remota de Interferometría.

Las dos imágenes de entrada, denominado un par interferométrico, son corregistrados y filtrados, estos se combinan para producir el Interferograma. El flujo de proceso se ve esquemáticamente en la Figura 14 (ERDAS: 2010).

Las principales ventajas de este método radican en que a) brindan una visión sinóptica del proceso de hundimiento y b) permite generar productos que poseen una alta resolución espacial que difícilmente puede ser obtenida por métodos de nivelación convencional. (Cano, et. al.: 2011).

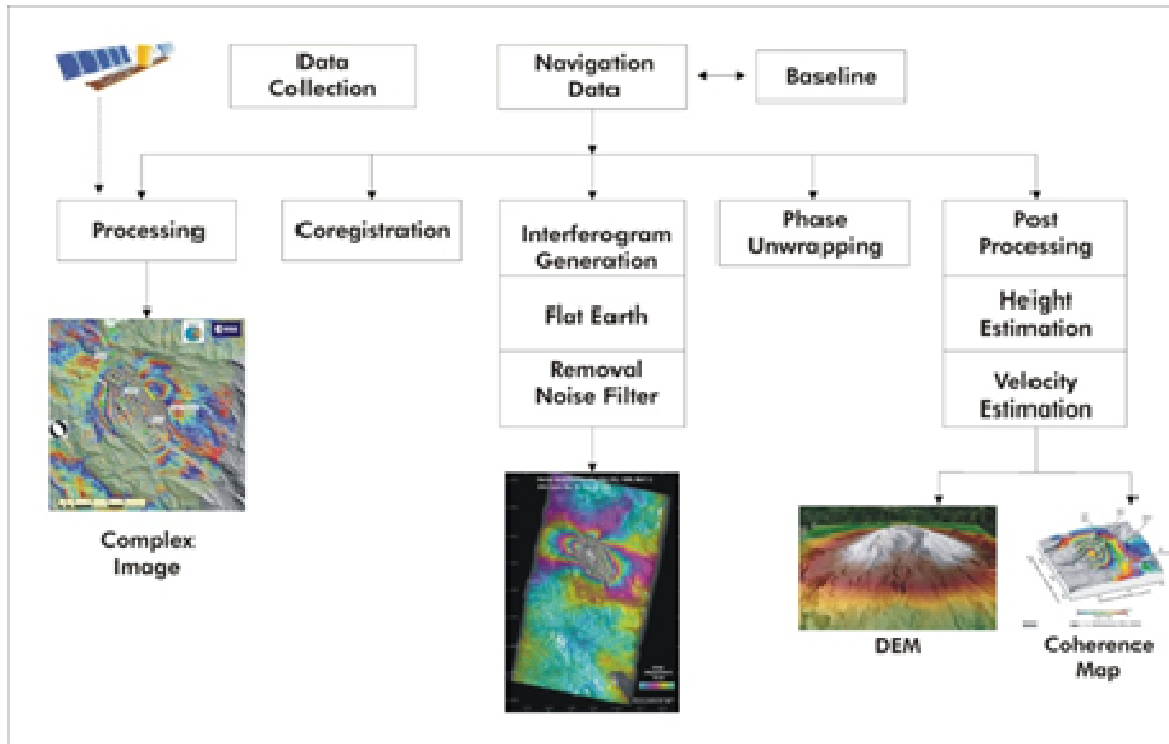


Figura 14. Proceso de flujo para la generación de interferogramas.

Para este trabajo se procesaron las imágenes de la Cuenca de México de 2002 a 2007 (proporcionadas por la Dra. López-Quiroz del Centro de Geociencias de la UNAM) para calcular los interferogramas correspondientes a la zona de Consejo Agrarista Mexicano. A partir del procesamiento se obtuvieron resultados referidos a la velocidad anual de hundimiento comprendida entre los años 2002 y 2007.

Los resultados obtenidos para la Colonia Consejo Agrarista Mexicano reflejan una mayor subsidencia anual expresada en centímetros en la parte Noroeste, correspondiente a la zonas más baja de la colonia, en la que se encuentra los estratos lacustres presentados en el capítulo anterior.

La velocidad de desplazamiento vertical en la zona Noreste esta en el margen de los 7 a los 10 centímetros anuales, hacia los flancos norte del Volcán Yahualixqui se presenta menor subsidencia anual, en un rango entre los 2 a 0.5 centímetros anuales como se observa en el mapa de la Figura 15.

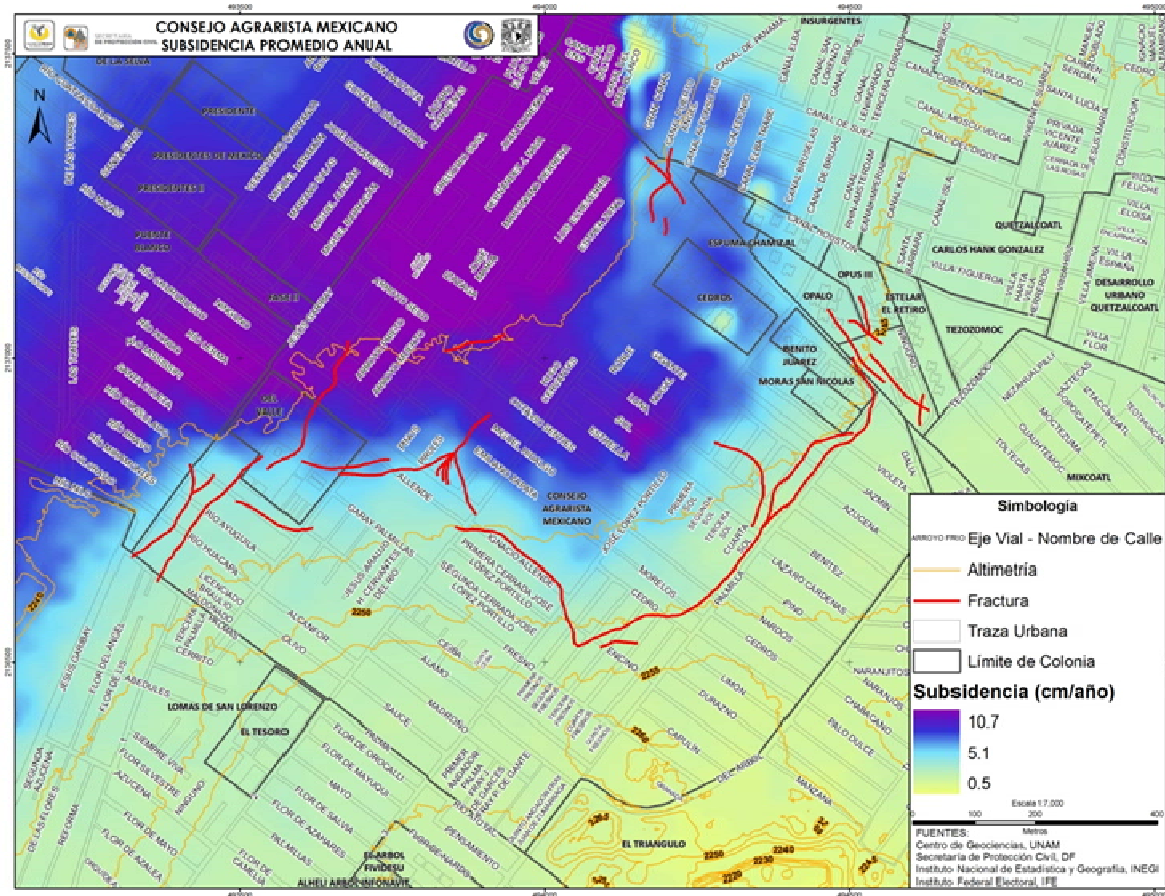


Figura 15. Mapa de subsidencia promedio anual en la zona de estudio. Los colorees violeta indican las zonas de mayor desplazamiento vertical (11 cm/año).

2.3 Manejo del Sistema de Información Geográfica (SIG)

Por un sistema de información geográfica se enciende la unión de la información y herramientas informáticas (programas y software) para análisis de objetos concretos. Un sistema de información se usa para manipular, consultar, editar y visualizar información que generalmente se encuentra almacenada en una base de datos. El término geográfica se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, que incluye la posición en el espacio (Pérez, et. al: 2011).

La información geográfica obtenida a partir de los trabajos de gabinete y campo, en la colonia Consejo Agrarista Mexicano se encuentra contenida en el disco anexo, estructura de forma que todos los elementos presentes se encuentran categorizados de acuerdo con la Tabla 1.



Tabla 1. Clasificación de la información generada durante el desarrollo de este estudio.

Carpeta	Elemento	Formato	Tipo	Descripción	Fuente
Base	Altimetria	.shp	Linea	Curvas de nivel obtenidas a partir de MDE LiDAR	INEGI
	Colonia	.shp	Poligono	Información vectorial que contiene la clasificación y claves de ECEG 2010	IFE
	Consejo_Agrarista_Mexicano	.shp	Poligono	Poligono para la elaboración de los mapas	GEOCIENCIAS, UNAM
	Consejo_Agrarista_Mexicano_Zona_Principal	.shp	Poligono	Poligono donde se centra principal atención	PC, DF
	Eje_Vial	.shp	Linea	Información vectorial que contiene la clasificación y claves de SCINCE 2010	INEGI
	Iztapalapa	.shp	Poligono	Información vectorial que contiene la clasificación y claves de SCINCE 2010	INEGI
	Manzana	.shp	Poligono	Información vectorial que contiene la clasificación y claves de SCINCE 2010	INEGI
Geológica	Dirección_Movimiento	.shp	Linea	Se integran las líneas que continen las direcciones del movimiento del fracturamiento	GEOCIENCIAS, UNAM
	Vectores_Desplazamiento	.shp	Punto	Incluye el tipo de desplazamiento de las zonas puntuales	GEOCIENCIAS, UNAM
	Estudios_Realizados	.shp	Linea	Se integran las líneas sobre las que se realizaron estudios	GEOCIENCIAS, UNAM
	Fracturamiento	.shp	Linea	Obtenida a partir de levantamiento en campo	GEOCIENCIAS, UNAM
	Geología_Superficial	.shp	Poligono	Obtenida a partir de información geológica y topográfica	GEOCIENCIAS, UNAM
	Predios_Potencialmente_Afectados	.shp	Poligono	En base a el levantamiento de fracturas e interpretación de información geofísica	GEOCIENCIAS, UNAM
	Unidades_Morfogenicas	.shp	Poligono	Tapia Varela, g, et. Al. (2002) mapeo geomorfológico analítico de la porción...	TAPIA, ET. AL. 2002
Mapas	Estudios_Realizados	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Predios_Afectados	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Direccion_Movimiento	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Cartografia_Geologica	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Foto_Aerea	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM



	Geologia	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Gradiente_Subsidencia	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Mapa_Base	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Modelo_Digital_Elevacion	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Pendiente	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Sitio_1	.pdf y .jpeg	Carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Sitio_2	.pdf y .jpeg	Carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Sitio_3	.pdf y .jpeg	Carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Sitio_4	.pdf y .jpeg	Carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Sitio_5	.pdf y .jpeg	Carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Subsidencia	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
	Unidades_Morfogenicas	.pdf y .jpeg	24x16 y carta	Archivos portables e imágenes obtenidas de los proyectos .mxd	GEOCIENCIAS, UNAM
Modelos Digitales	mde	.grid	raster	Obtenido a partir de información LiDAR	INEGI
	mod_subsi	.grid	raster	Obtenido a partir de un modelo lineal y un cuadrático de las imágenes de subsidencia	GEOCIENCIAS, UNAM
	subsidencia	.grid	raster	Obtenido a partir de interferometría radar	GEOCIENCIAS, UNAM
	pendiente	.grid	raster	Obtenido a partir de información LiDAR	INEGI
Ortofotos	Ortofoto	.img	raster	Obtenido a partir de vuelos	INEGI
Proyectos	Estudios_Realizados	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
	Predios_Afectados	.mxd	Proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
	Direccion_Movimiento	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM



Cartografia_Geologica	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Foto_Aerea	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Geologia	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Gradiente_Subsidencia	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Mapa_Base	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Modelo_Digital_Elevacion	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Pendiente	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Sitio_1	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Sitio_2	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Sitio_3	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Sitio_4	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Sitio_5	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Subsidencia	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM
Unidades_Morfogenicas	.mxd	proyecto	Proyecto cartográfico en plataforma SIG	GEOCIENCIAS, UNAM

Toda la información contiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Sistema de Coordenadas Proyectadas: WGS 1984 UTM Zona 14N
- Datum: World Geodetic System 1984
- Proyección: Universal Transversa de Mercator
- Unidad Lineal: Metro

AVISO IMPORTANTE: La información de raster representada de manera continua, que se presenta en los mapas, pierde los atributos de la leyenda cuando se cierra el SIG, por lo que se deben colocar nuevamente las propiedades de la leyenda. De esta manera, el despliegue posterior de la información geoespacial para su manipulación no requiere de una apertura de las entidades geográficas ya que los proyectos .mxd tienen la capacidad de ligar los elementos desplegados por proyecto cartográfico.

3. Prospección Geofísica

Para la caracterización de la estructura del subsuelo, se requiere de la aplicación de diversas técnicas que permitan obtener la respuesta eléctrica, electromagnética o mecánica de los materiales del subsuelo, y con base en la caracterización de sus propiedades poder inferir la presencia de fracturas, discontinuidades o cambios litológicos. Para este trabajo se aplicaron los métodos de Radar de Penetración Terrestre en su modalidad de multifrecuencia y representación tridimensional; la prospección geoeléctrica en arreglo dipolo-dipolo, también llamado Tomografía Eléctrica, y de Sondeo Eléctrico vertical (SEV) y el método de Sísmica de Ondas Superficiales, conocido por MASW por sus siglas en inglés (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

3.1 Método Radar de Penetración Terrestre (RPT)

Los radares de penetración terrestre (RPT), son sistemas electromagnéticos para el estudio no destructivo del subsuelo. Esta es una técnica geofísica que emplea radiación mediante una antena transmisora (T_x) que emite una onda transitoria de pulso electromagnético de pequeña duración. Estos equipos se basan en la emisión de ondas de frecuencia modulada, el pulso penetra en el subsuelo donde una parte de ella es reflejada a superficie, al momento de encontrar una interface en el terreno, objeto o estructura lo cual encontrará un contraste de propiedades electromagnéticas a las del medio encajonante, esto es, constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica). Una vez emitida la onda, esta será recibida en superficie, ya sea por la misma antena (R_x) o una contigua con las mismas características (Figura 16). La onda reflejada suele tener características distintivas, como una amplitud mayor debido a grandes contrastes, múltiples, atenuación, etc.

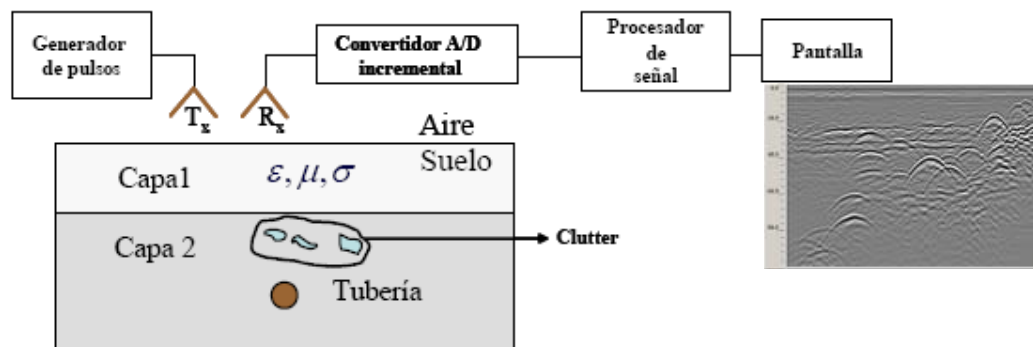


Figura 16. Esquema básico de un RPT para la exploración no destructiva del subsuelo. Se representa como fuente emisora a T_x y receptora a R_x



La señal que se obtiene se digitaliza para posteriormente aplicar un adecuado procesamiento en un software especializado, el cual arroja información interpretable de las anomalías presentes en el subsuelo. Entre las aplicaciones más comunes del RPT esta la localización de cavidades o cavernas, tuberías, cables eléctricos, rejillas, grietas en asfaltos, fracturamiento del medio geológico, problemas estructurales.

La profundidad de penetración de un radargrama se relaciona con la propagación de energía electromagnética. En principio la penetración será tanto mayor cuanto más baja sea la frecuencia y mayor sea la resistividad. Para este estudio se utilizaron tres frecuencias centrales de prospección: 100 MHz, 200 Mhz y 400 MHz; con una profundidad de penetración de 7, 5 y 2 m respectivamente. El equipo utilizado es un RPT Modelo SIR-20 de la marca GSSI.

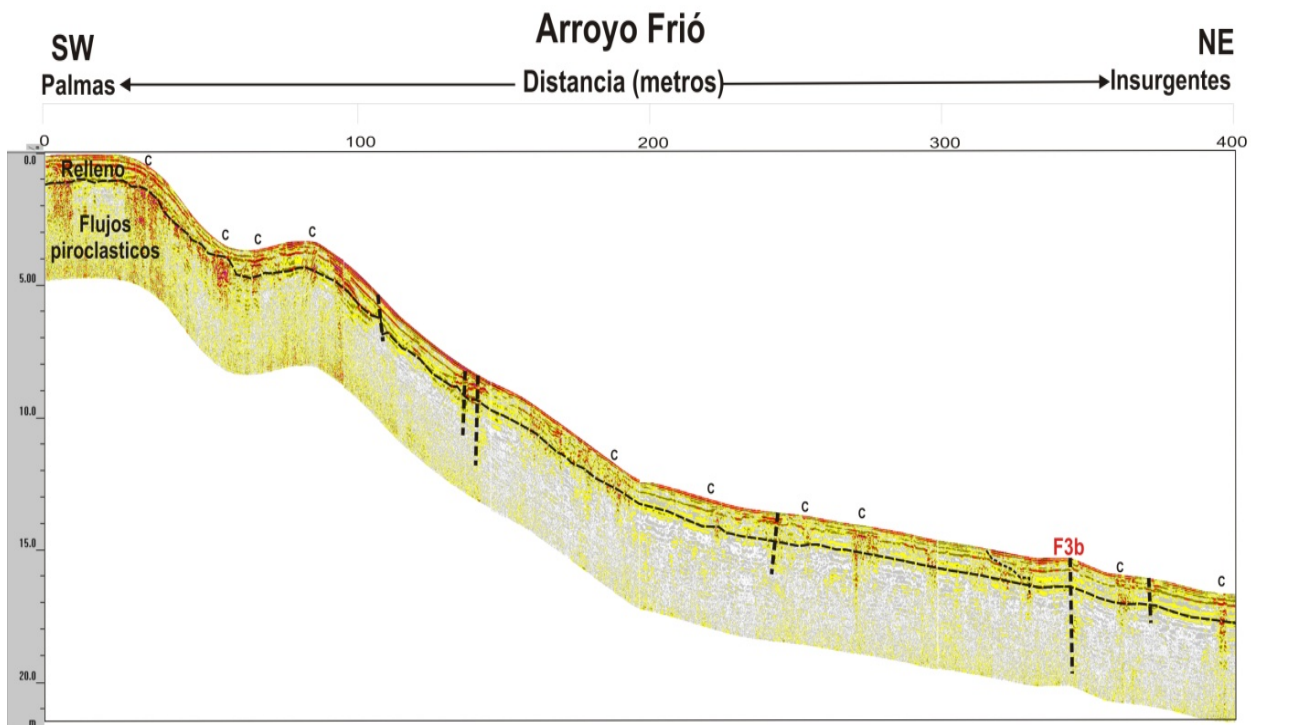
El alcance de esta metodología lo establece la antena de frecuencia, estos módulos nos permiten obtener resoluciones altas debido a que son antenas de alta frecuencia.

Como ejemplo de los resultados obtenidos con este método se presenta una secuencia de radargramas levantados a lo largo de la **Calle Arroyo Frio** con una longitud de 1000 m. Esta calle delimita hacia el Sureste el polígono de mayor recurrencia de afectaciones dentro de la zona de estudio. De igual manera se levantaron radargramas de 370 m de longitud a lo largo de la Calle Alcanfores, perpendicular a la Calle Arroyo Frio, hacia el NW (Reclusorio y Jose Ma Velasco).

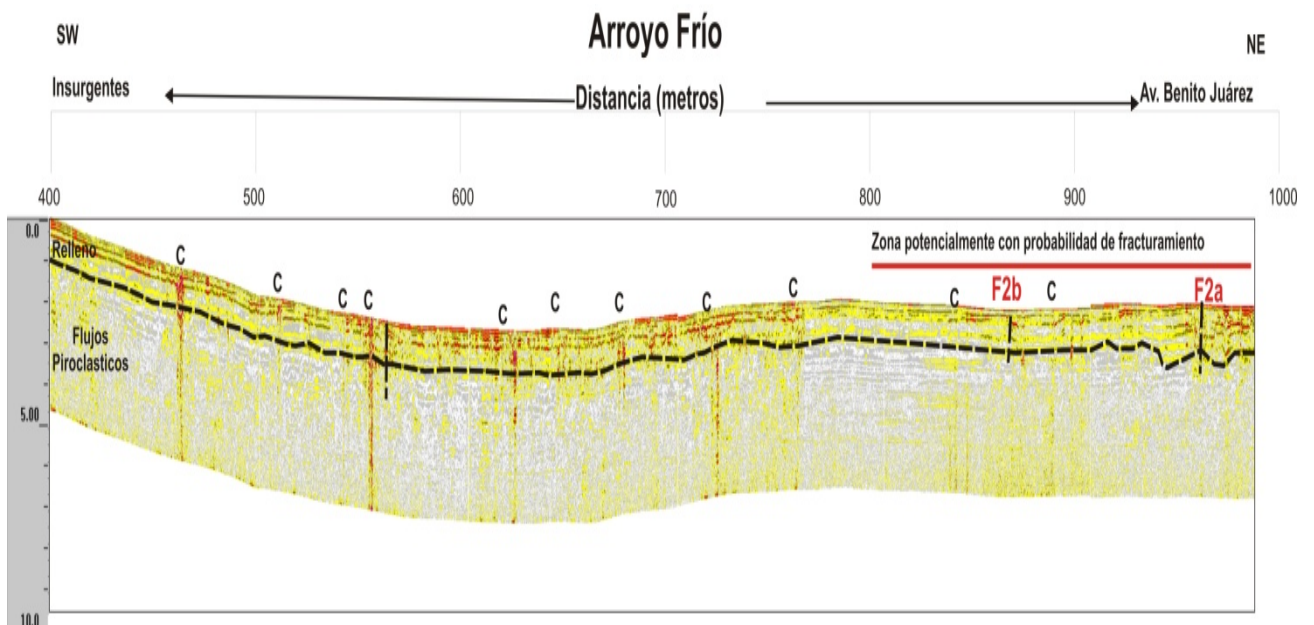
Radargramas en la Calle Arroyo frio

En la Figura 17 se presenta la interpretación de un perfil de radar, utilizando una antena de 200 MHz de frecuencia central, en la calle Arroyo Frio entre Palmas y Av. Benito Juárez, dividida en dos segmentos para su análisis: (a) de 0 a 400 m y, (b) de 400 a 1000 m.. En la parte superior del radargrama se identificó material de relleno antropogénico, el cual descansa sobre una secuencia de flujos piroclásticos.

Así mismo se identificaron varios sistemas de fracturamiento. Se infirió que el sistema de fracturamiento F3b se propaga en profundidad a aproximadamente 4.5 metros, probablemente esta fractura a causado la tendencia de generación de otras fracturas que no afloran en superficie todavía, pero que fueron detectadas mediante prospección RPT. Con la interpretación del radargrama se observa que los sistemas de fracturamiento F2a y F2b se han propagado hasta la calle Arroyo Frio, sin presentar aun la evidencia de la fractura. Sin embargo esta zona es probable a presentar problemas de fracturamiento.



(a)



(b)

Figura 16. Radargrama levantado con la Antena de 200 MHz con una longitud de 1000 m dividido en dos segmentos (a) 0 a 400 m, de la Calle de Palmas a la Calle de Insurgentes y (b) 400 a 1000, de la calle de Insurgentes a la Avenida Benito Juárez. Se observan las zonas de potencial fracturamiento hacia la parte final del perfil y las fracturas cartografiadas F2a, F2b y F3b (ver mapa de la Figura 6).

Radargramas en la Calle Alcanfor

Con la finalidad de caracterizar los sistemas de fracturamiento en esta calle se llevó a cabo un levantamiento RPT del tipo multifrecuencial, utilizabdo las antenas de 100 MHz, 200 MHz y 400 MHz, de 370 m de longitud entre las Calles Arroyo Frio y Jesús Garibay. Dentro de la zona se determino un material de relleno, el cual hace contacto en su base con una secuencia de flujos piroclásticos. Se identificaron 3 principales sistemas de fracturas que se propagan desde aproximadamente 5 m profundidad (Figura 17a y b; Figura 18).

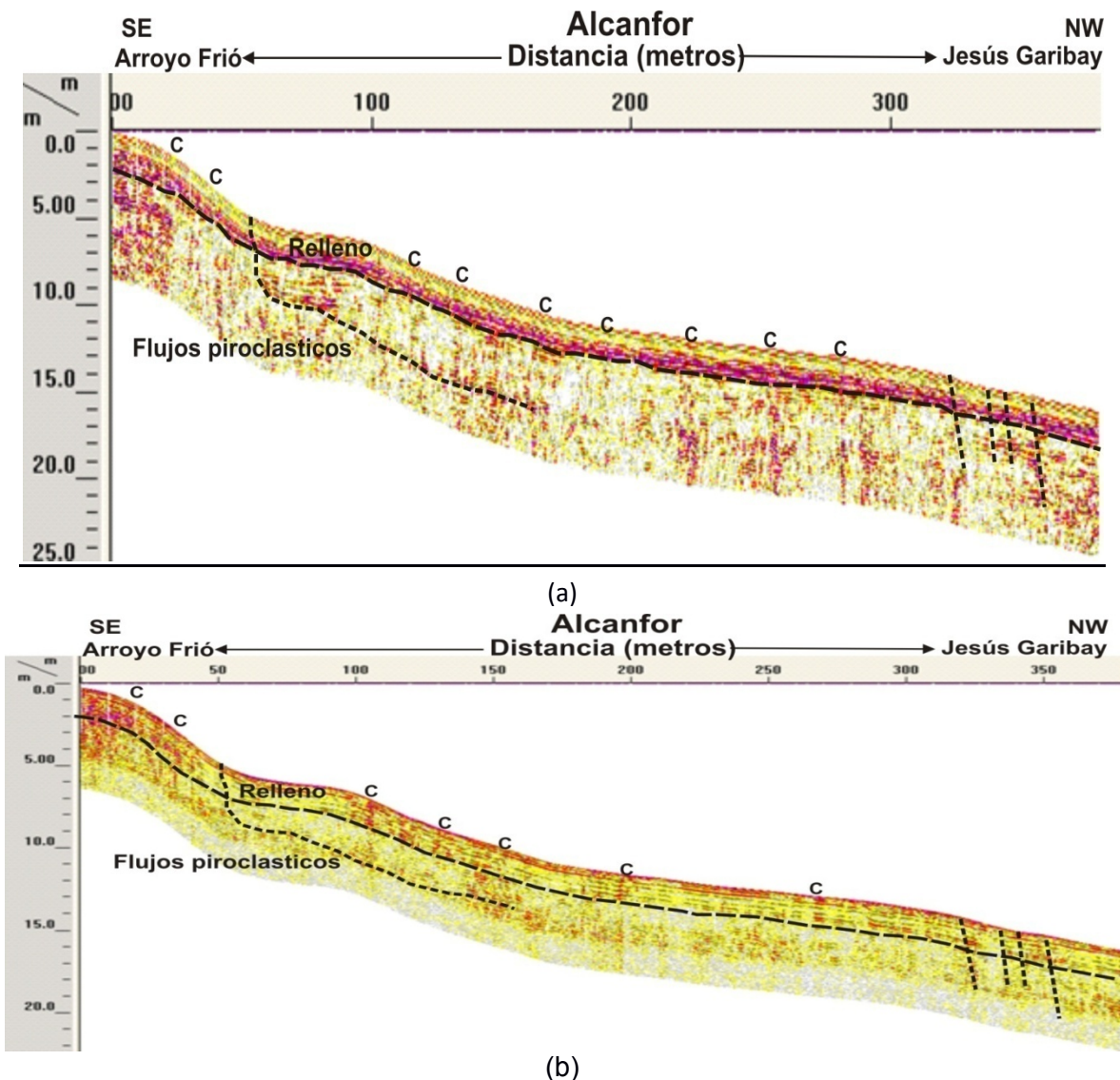


Figura 17. Radargramas levantados en la calle de Acanfor de 370 m de longitud (de Arroyo Frio a Jesús Garibay), (a) con la Antena de 100 MHz y (b) con Antena de 200 MHz. Se remarcan las zonas de contacto de flujos piroclásticos, las zonas de fracturamiento en líneas punteadas y los reflectores asociados a coladeras (C).

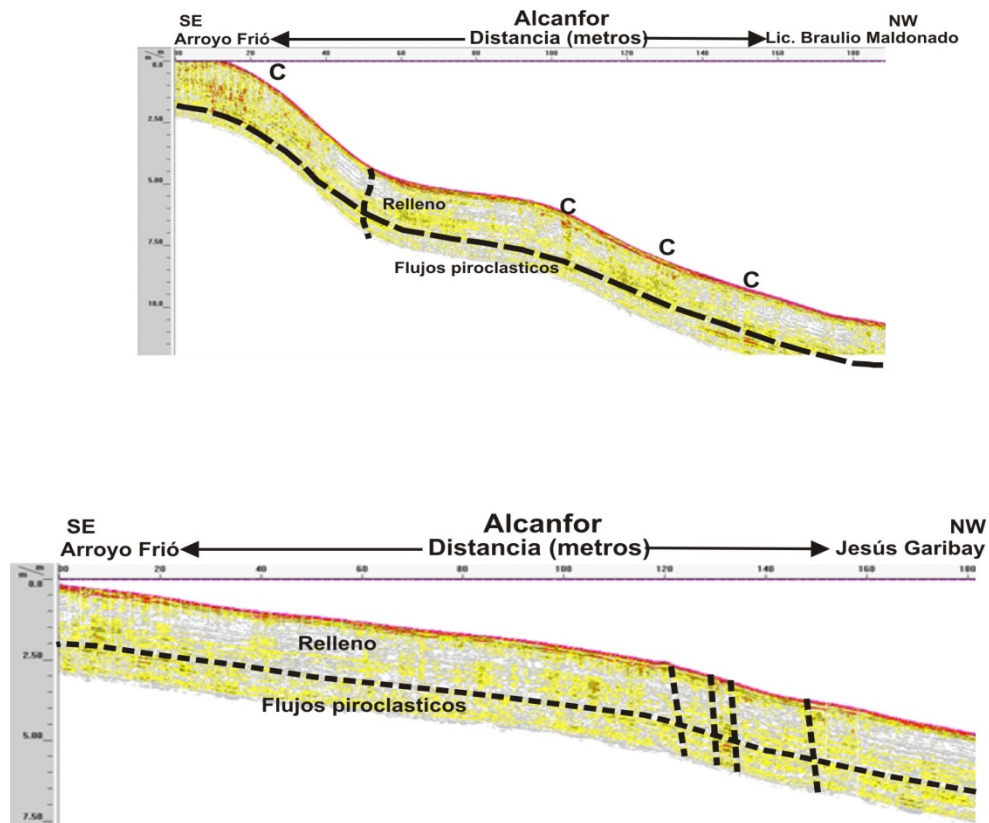


Figura 18. Radargrama levantado en la calle de Acanfor de 370 m de longitud (de Arroyo Frio a Jesús Garibay) con la Antena de 400 MHz y (b) con Antena de 200 MHz. Dos segmentos de 0 a 200 m hasta la calle Braulio Maldonado y de 200 a 370 m hasta la calle de Jesus Garibay. Se remarcan las zonas de contacto de flujos piroclásticos, las zonas de fracturamiento en líneas punteadas y los reflectores asociados a coladeras (C).

Radargrama en la Calle de Palmillas

En la Figura 19 se presenta la interpretación de un radargrama, levantado con la antena de 200 MHz, con 500 m de longitud en la Calle Palmillas, entre Av. Del Árbol y Fernando Benítez. Se identificó una zona de relleno en la parte superior del perfil que sobreyace a una secuencia de flujos piroclásticos. Sobre el perfil de la calle se infirió la propagación del sistema de fracturamiento F3a, el cual se propaga a 3.5 metros de profundidad. Aproximadamente a 100 metros de longitud se detectó una fractura que no aflora en superficie y se propaga desde 2.8 m de profundidad. Este perfil es paralelo a la calle de Acanfor.

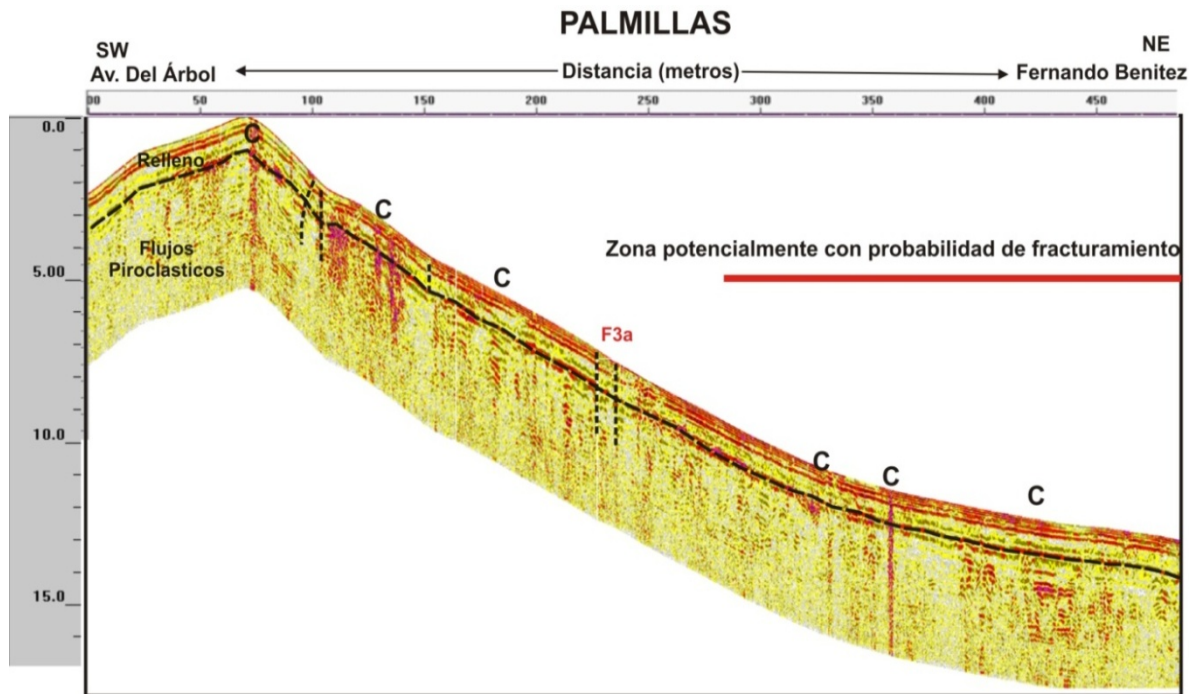


Figura 19. Radargrama levantado sobre la Calle Palmillas de 500 m de longitud, con la Antena de 200 MHz. Se remarcan con línea punteada las zonas de fracturamiento en la sección de mayor pendiente y una zona disturbada hasta 5 m de profundidad hacia la parte baja del perfil.

3.2 Métodos Geoeléctricos

Se realizó un Estudio Geofísico con el método de Dipolo-Dipolo también llamado Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), y con el método de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) para determinar la respuesta eléctrica del subsuelo, y con base a la caracterización resistiva del subsuelo poder inferir los cambios litológicos del subsuelo y la presencia de discontinuidades o socavamientos.

3.2.1. Tomografía de Resistividad Eléctrica

En su sentido más amplio la Tomografía Eléctrica es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones.

La Tomografía Eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de exploración, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua (Figura 20).

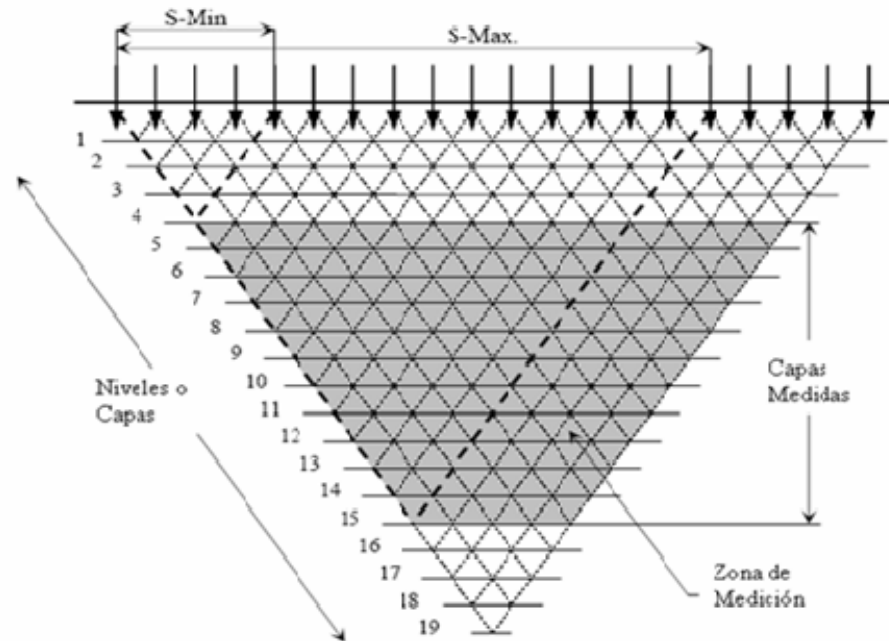


Figura 20. Arreglo de alta densidad de mediciones mediante tomografía eléctrica con arreglo polo-dipolo

El perfil resistivo se generó con un arreglo multielectrónico, sincronizado de manera inteligente con el Sistema de Resistividad ARES G4 (Fabricado por GF Instruments), con el cual se obtienen datos de resistividad del subsuelo, los cuales son acotados de acuerdo a parámetros de campo establecidos, lo que permite de manera automática eliminar y repetir el dato en caso de exceder las tolerancias permisibles. La potencia del transmisor del sistema ARES es de 300 W, con un receptor muy sensible (Figura 21).

La longitud del dipolo utilizado en este estudio fue de 3 y 5 m, con hasta 48 electrodos conectados de manera simultánea, con los cuales se realizaron profundidades de investigación del orden de los 30 m.

Características del equipo empleado (Equipo Tomografía Eléctrica).

El equipo utilizado en el estudio fue un ARES G4 (Fabricado por GF Instruments), la potencia del transmisor es de 300W, con un receptor muy sensible; cable y electrodos inteligentes para suministrar corriente y medir voltajes, varillas de acero inoxidable, multímetro digital con rango de medición de 0.1 milivolts a 200 volts, computadora portátil, radios de comunicación y accesorios menores. En la figura 22 se ilustra el equipo de trabajo en la zona de estudio.



Figura 21. El Sistema de medición ARES G4, para tomografía de resistividad eléctrica.



Figura 22. Equipo ARES G4 y los electrodos inteligentes.

Actividades de campo

Se iniciaron los trabajos de campo mediante la ubicación e inspección del sitio para la planeación del trabajo, que permitió ubicar las líneas geofísicas, de forma estratégica para cubrir las zonas más afectadas por el fracturamiento. De esta manera, se trazaron 5 líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica, así como 2 Sondeos Eléctricos Verticales dentro de la Colonia Consejo Agrarista, en donde se llevó a cabo el levantamiento

geofísico. En la Figura 22 se presenta la ubicación de los estudios realizados y en Tabla 2 se muestran la geo-referenciación de las líneas geoelectricas levantadas.

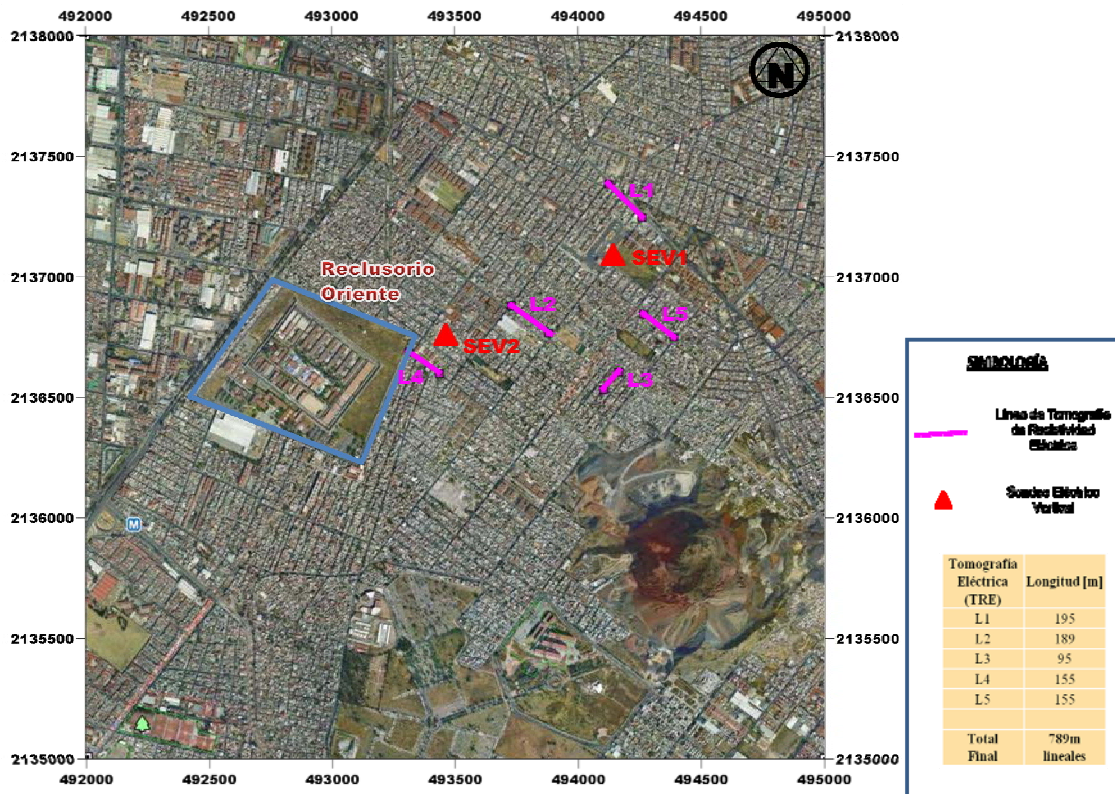


Figura 23. Mapa de localización de los estudios geoelectricos realizados para este estudio.

Tabla 2. Coordenadas de las líneas geoelectricas.

LINEA		X	Y	Z	LONGITUD (m)
TRE-L1	INICIO	494260	2137245	2256	195
	FIN	494125	2137384	2243	
TRE-L2	INICIO	493730	2136879	2247	189
	FIN	493881	2136764	2246	
TRE-L3	INICIO	494104	2136528	2252	95
	FIN	494165	2136601	2250	
TRE-L4	INICIO	493312	2136687	2236	155
	FIN	493438	2136596	2243	
TRE-L5	INICIO	494389	2136747	2255	155
	FIN	494267	2136842	2249	
SEV1		494087	2137017	2249	
SEV2		493464	2136728	2252	



Cada línea geofísica tiene diferente longitud, que varía entre 95 m a 195 m, cubriendo un total de 789 m lineales. Cuatro líneas tienen dirección SE – NW y sólo una presenta una dirección SW – NE.

Con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica se utilizó una abertura de dipolo o espaciamiento entre puntos de medición a cada 3 m y 5 m, con diferentes niveles de investigación del subsuelo, para cubrir la profundidad de investigación real de 30 m. Los Sondeos Eléctricos Verticales tienen aberturas de AB/2 de hasta 150m.

En la Tabla 3 se resumen las características principales de las líneas de Tomografía y SEVs.

Tabla 3. Principales Características de las líneas de investigación

Nombre de la línea	Ubicación por calle	Dirección	Método de medición	Longitud del dipolo(m)	Longitud (m)
TRE-L1	Av. Benito Juárez	SE – NW	Polo – Dipolo	5	195
TRE-L2	Insurgentes	NW – SE	Dipolo – Dipolo	3	189
TRE-L3	Cda. Fresnos	SW – NE	Polo – Dipolo	5	95
TRE-L4	Palmas	NW – SE	Polo – Dipolo	5	155
TRE-L5	Mártires de Tlatelolco	SE – NW	Polo – Dipolo	5	155
SEV1	Arroyo Frío		Sondeo Eléctrico Vertical		AB/2= 150
SEV2	Cedro		Sondeo Eléctrico Vertical		AB/2= 100

Actividades de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en realizar un procesamiento de la información obtenida en campo de cada línea, donde se obtuvieron los valores de resistividad aparente a las diferentes distancias y niveles de medición en el subsuelo, a manera de obtener una imagen con la resistividad del terreno; posteriormente por medio de software especializado se elaboran secciones y mapas a diferentes profundidades de resistividad, los cuales son interpretados de acuerdo a los objetivos del estudio.

Procesamiento de la información (Tomografía de Resistividad Eléctrica)

La exploración consistió en la ejecución de 5 Líneas utilizando las técnicas de Dipolo – Dipolo y Polo – Dipolo con longitud variable entre 95m a 195m; utilizando una longitud de dipolo de 3 y 5m, con la cual se cubren profundidades de investigación del orden de los 30 m; la cantidad de puntos medidos para cada línea varían entre 170 y 2068 puntos, y

con esta alta densidad de mediciones se construyeron imágenes de resistividad. En la Figura 24 se presenta un ejemplo del patrón de mediciones.

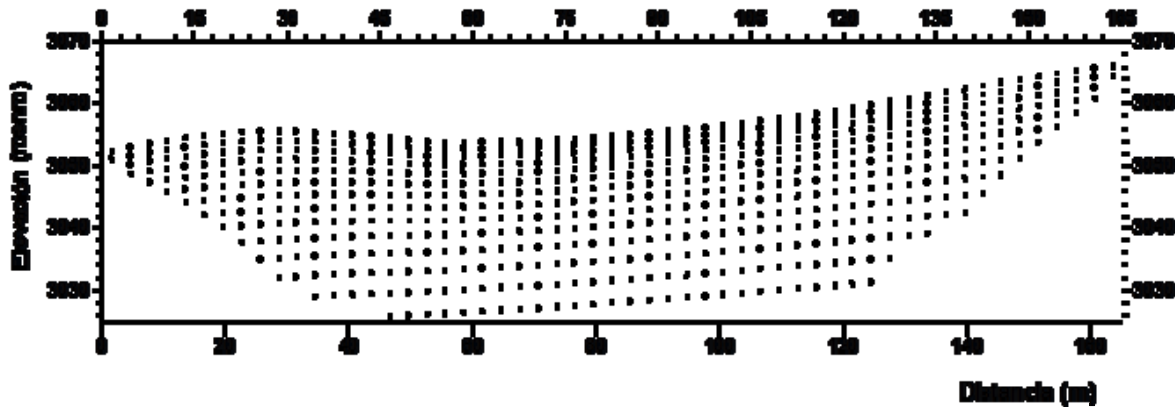


Figura 24. Ejemplo de un patrón de mediciones con la técnica polo-dipolo.

Posteriormente, para cada una de las líneas estudiadas se elaboraron perfiles de isorresistividad con la finalidad de observar la distribución de la resistividad de los materiales en el subsuelo. Estos perfiles permiten identificar zonas, de acuerdo al gradiente que muestran y valores de resistividad, que se asocian con los diferentes materiales del subsuelo, y otras zonas que de acuerdo a sus resistividades, forma y distribución, se asocian con zonas donde se interrumpe la continuidad resistiva, denominadas como “zonas anómalas”.

De cada línea se realizaron dos tipos de procesamiento de los valores de resistividad:

- El procesamiento cualitativo consistió en realizar una interpolación directa de los valores de resistividad y profundidad aparente, en la que los niveles de investigación no corresponden directamente con las profundidades reales de penetración y su finalidad es mostrar la distribución de resistividades en el sentido lateral y vertical, así como establecer diferencias en el comportamiento de las líneas de isorresistividad e identificar zonas anómalas.
- El segundo procesamiento es de tipo cuantitativo, ya que la interpolación se basa en la obtención de resistividades y profundidades reales, basados en modelos de inversión para los datos de campo, mediante el software RES2DINV, y su finalidad es poder conocer con mayor precisión la profundidad a la que se encuentran los cambios resistivos o anomalías detectadas.

3.2.2 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)

Un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) está formado por una serie de determinaciones de la resistividad aparente (ρ_a), efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y con una separación creciente entre los electrodos de corriente y de potencial. En este método, el centro del arreglo de electrodos es fijo, pero el espaciamiento entre los electrodos va



umentado para obtener más información sobre secciones más profundas del subsuelo, con la finalidad de conocer el tipo de material en el subsuelo y estimar la profundidad de la roca compacta y determinar, de manera indirecta, el grado de compacidad de los materiales. El equipo empleado fue el resistímetro ARES G4, fabricado por GF-Instruments.

Método de Trabajo para Sondeos Eléctricos Verticales

Esta técnica consiste en determinar la resistividad aparente del subsuelo en una serie de sitios pre-establecidos dentro del área de interés. Las determinaciones se efectuaron con un dispositivo electródico de separación creciente entre dos electrodos de emisión (corriente) y dos de recepción (potencial). Los estudios de los sondeos eléctricos verticales (SEV) se realizaron con la técnica Schlumberger, donde los electrodos de corriente (A y B) y de potencial (M y N) se van abriendo a partir de un centro a lo largo de una misma línea recta. Esto conduce a obtener las variaciones en la resistividad con la profundidad del subsuelo, inmediatamente abajo del centro del arreglo.

3.2.3 Interpretación de Resultados

Para poder interpretar adecuadamente la información obtenida del estudio geofísico se tomaron las siguientes consideraciones geológicas: De acuerdo con la posición observada en la zona de estudio, se espera que en la capa más cerca de la superficie (entre 1 m y 2 m, aproximadamente) se encuentren materiales de relleno para construcción o a arenas con limos, de granulometría media a fina. Por debajo de esta unidad se encuentran materiales de tipo lacustre, como arcillas y limos con pocas arenas finas de granulometría fina. A mayor profundidad continúan los materiales de tipo lacustre, pero con mayor compacidad, en algunas zonas se presentan desde los 25 m de profundidad. Como base de estos materiales lacustres se presentan los materiales piroclásticos provenientes de la sierra de Santa Catarina.

Las secciones con líneas de isorresistividad permiten identificar zonas, de acuerdo al gradiente que muestran y valores de resistividad, que se asocian con los diferentes materiales del subsuelo y otras zonas que de acuerdo a sus resistividades, forma y distribución, se asocian con materiales heterogéneos. La presencia de los vacíos ó aire, en los materiales incrementa notablemente los valores de resistividad, esta característica permite correlacionar los valores altos con posibles grietas o asentamientos; por otra parte, también una roca compacta (brecha volcánica), o materiales heterogéneos como los materiales de relleno (cascajo) pueden producir resistividades altas.

Para conocer los tipos de materiales y calcular la resistividad de las rocas del subsuelo, se realizaron 2 Sondeos Eléctricos Verticales, con aberturas máximas entre los electrodos



de corriente (A y B) de hasta 150 m. Con los datos obtenidos se realizó un Perfil Geoelectrico a una profundidad del orden de los 70 m que se presenta en la Figura 25..

SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

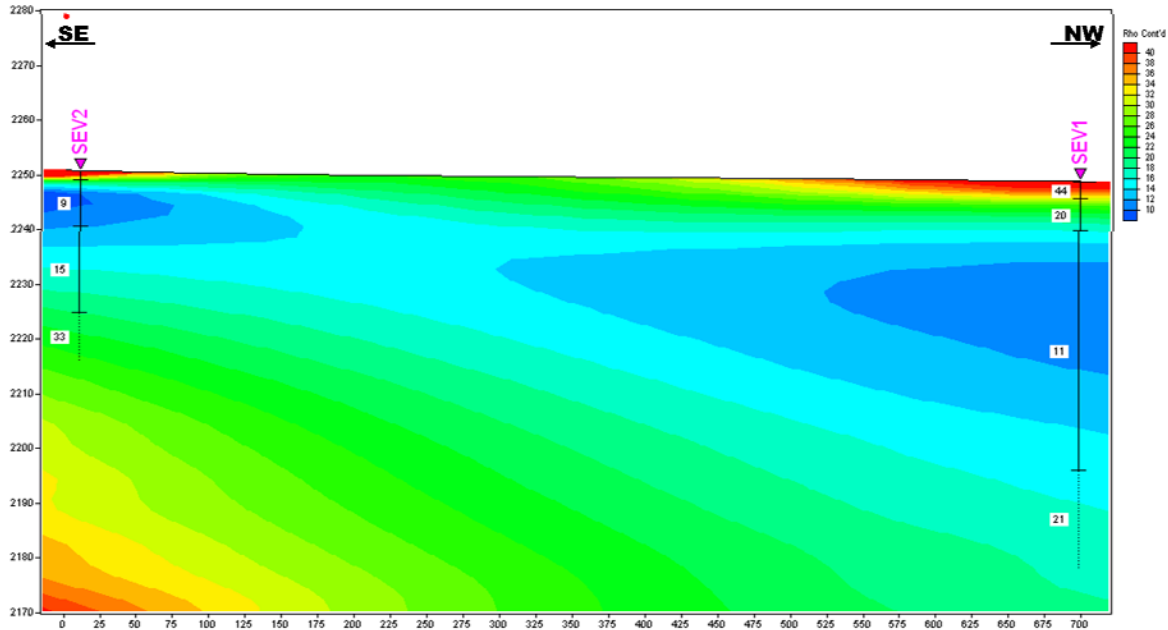


Figura 25. Sondajes Eléctricos verticales realizados en la zona de estudio (su ubicación se muestra en el mapa de la Figura 23).

Unidades geoelectricas

Del análisis de los perfiles de resistividad es posible determinar la existencia de tres Zonas Resistivas que se caracterizan por presentar un comportamiento eléctrico diferente:

Zona Resistiva I: Es la primera capa, compuesta por la combinación de materiales de relleno y de tipo fluvio-lacustre. La unidad tiene resistividades entre 10 a 50 Ohm-m, asociado a materiales de relleno arcillo arenosos, de granulometría fina a media. En esta primera unidad se presentan algunas zonas anómalas con incrementos en los valores de resistividad, relacionadas a pequeños asentamiento o a algunos agrietamientos, estos incrementos en la resistividad, también pueden ser provocadas por la compactación de materiales de relleno o algunas rocas de granulometría gruesa. Por la heterogeneidad de los materiales, esta unidad presenta características de mayor riesgo geotécnico.

Zona Resistiva II: Subyace a la unidad I y se asocia a materiales de tipo lacustre como son limos y arcillas. Presenta resistividades menores a los 10 Ohm-m, relacionadas a materiales de granulometría fina.



Zona Resistiva III: Esta zona se encuentra como base de la I y II, se relaciona a materiales lacustres más compactos, rocas volcánicas fracturadas o depósitos pirocásticos. La unidad III presenta resistividades superiores a los 10 Ohm-m, se relaciona a materiales arenoso-limosos compactos o roca volcánica fracturada.

3.3 Método de Sísmica de Ondas Superficiales (MASW-2D)

Recientemente, la metodología de dispersión de ondas superficiales se ha extendido al mapeo lateral de estructuras 2D. Por ejemplo, Xia et al. (1999) y Miller et al. (1999) aplican el método MASW a través de realizar varios disparos a lo largo de un tendido sísmico y construir una sección 2D de Vs a partir de modelos 1D. Hayashi et al. (2004) demuestran, que a partir de la correlación cruzada de un conjunto de sismogramas de punto medio común (CMP, por sus siglas en inglés) obtenidos a partir de un arreglo multicanal que utiliza varios disparos, extrae curvas de dispersión en cada CMP al realizar una transformación al dominio de velocidad de fase contra frecuencia de cada sismograma (Park, et. al 1999); al invertir cada curva obtiene velocidades 1D para reconstruir una sección cuasi 2D de Vs. Nosotros utilizamos la propuesta de Hayashi et al. (2004); la metodología viene incluida en la paquetería de SeisImagerSW/2D versión 3.1 comercializado por OYO.

Adquisición y procesado de datos.

En la toma de datos utilizamos un sismógrafo GEODE marca GEOMETRICS que incluye el software de adquisición Sismodule Controller. El software de adquisición opera en un computador personal, que permite la visualización y análisis de las señales sísmicas adquiridas. El tendido sísmico fue de 16 canales con frecuencia de 12 Hz, las líneas tuvieron longitudes de 45, 64 y 40 metros, generando una fuente en medio de cada geófono, con martillo de 7 kg sobre una placa metálica. Se obtuvieron 17 archivos para cada levantamiento. La Figura 26 muestra el levantamiento en campo y el procesado.

Esta técnica nos permite alcanzar una profundidad máxima de exploración de 15 a 30 metros, evaluando el comportamiento de la onda Rayleigh en función de la frecuencia vs la velocidad de fase, esta relación demuestra que la frecuencia se atenúa con la profundidad.

En la Figura 27 se presenta un perfil de MASW que se ubica sobre la Calle de Arroyo Frio en esquina con la Calle Alcanfor en la zona de piedemonte del Volcan Yuhualixqui.

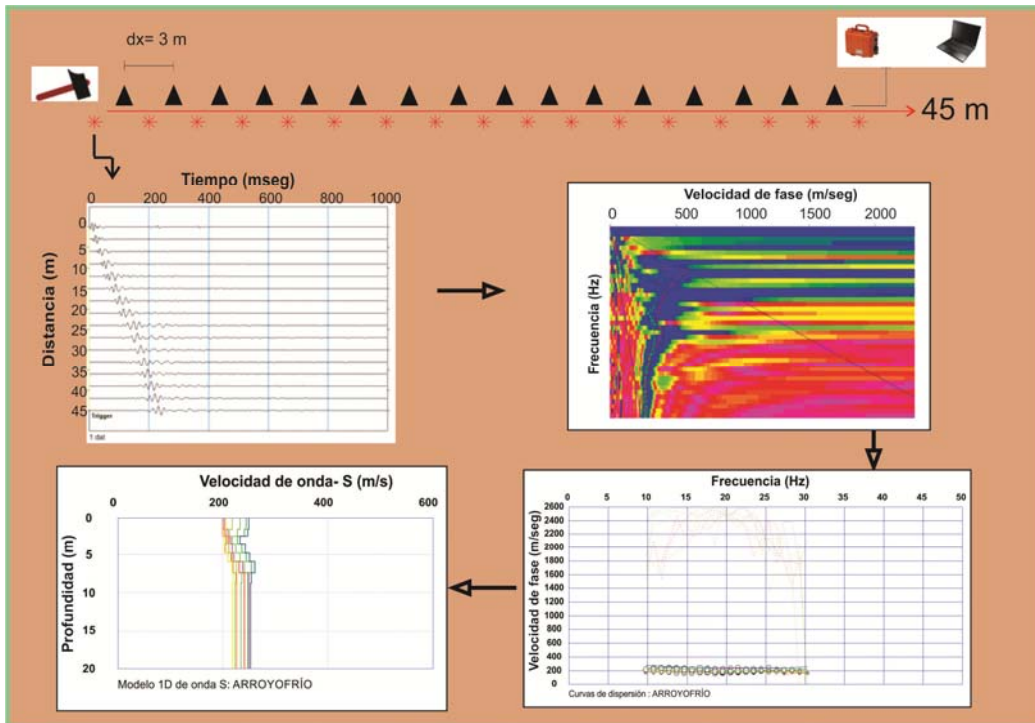


Figura 26 . En la figura se muestra la adquisición en campo, las curvas de dispersión empleadas para los modelos 1D obtenidos en la calle Arroyo Frío.

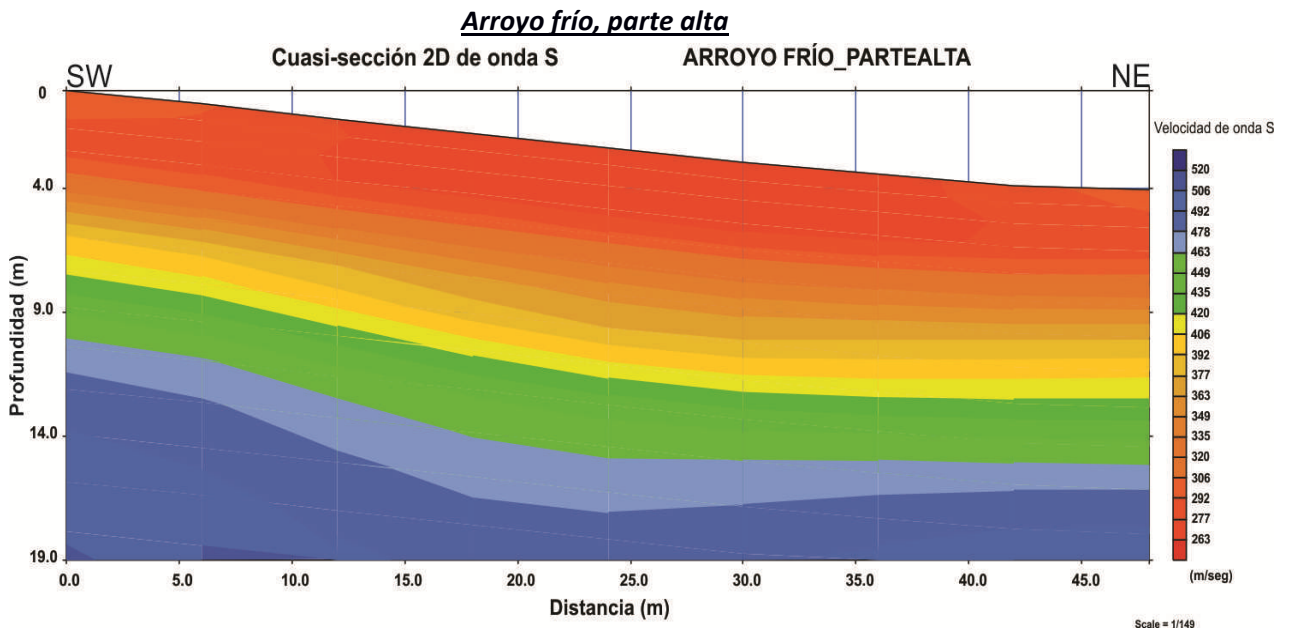


Figura 27. Perfil MASW levantado en la Calle Arroyo Frío, con una longitud de perfil de 48 metros. La profundidad de exploración fue de 19 metros. Se registra una secuencia de mayor rigidez (roca fracturada) en la base del perfil y materiales de mediana rigidez hacia la superficie (materiales granulares).

4. Estudios de detalle en sitios de deformación crítica

A partir del trabajo de campo y cartografía de fracturamiento se identificaron cinco sitios de deformación crítica en el Colonia Consejo Agrarista. Dos de ellos se ubican en los márgenes del polígono identificado como zona de alta recurrencia, los alrededores de la calle Insurgentes y de la Avenida Benito Juárez, por lo que se llevo a cabo un estudio detallado de prospección del subsuelo para identificar sus condiciones de deformación. Se realizaron levantamiento RPT multifrecuencia y 3D, MASW y 5 líneas con los métodos Tomografía de Resistividad Eléctrica, una en cada sitio.

En el mapa de la Figura 28 se presenta la ubicación de los cinco sitios estudiados y en la Tabla 4 se presentan los perfiles geofísico levantados por sitio.

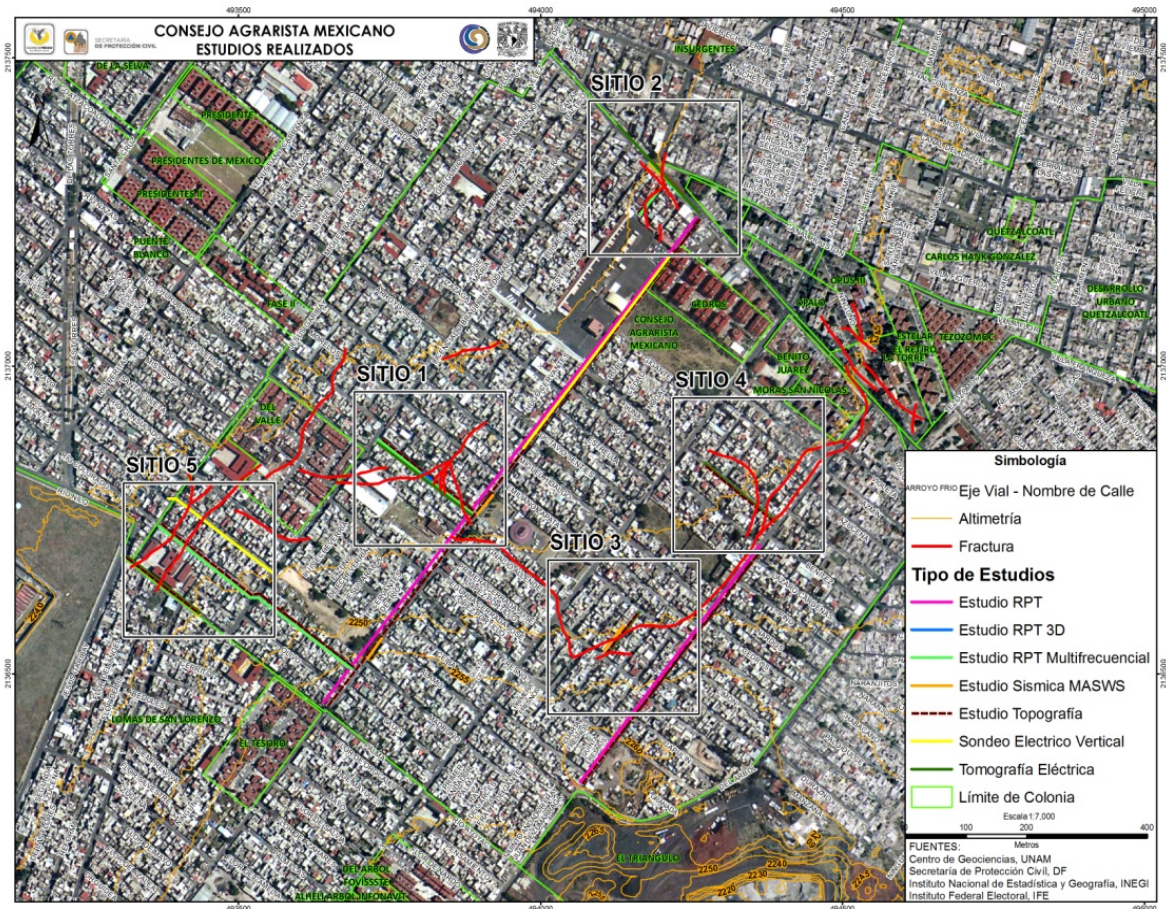


Figura. 28. Ubicación de las áreas de estudio que corresponden a los cinco sitios identificados de deformación crítica. Se presentan en diferentes colores los estudios de prospección geofísica realizados en cada sitio.



Tabla 4. Integración de perfiles geofísicos en los sitios deformación crítica.

• Sitio 1. Calle Insurgentes. Limite SW del Poligono de Recurrencia
• Sitio 2. Av. Benito Juárez. Limite NE del Poligono de Recurrencia
• Sitio 3. 3era Cda. de Fresno
• Sitio 4. Arroyo frío
• Calle Palmas
• Calle Luna
○ Perfiles Geoeléctricos
○ Perfiles de MASW 2D
○ Perfiles de RPT
○ Antena de 100 MHz.
○ Antena de 200 MHz.
○ Antena de 400 MHz.

4.1 Sitio 1. Calle Insurgentes

La calle Insurgentes, es una de las zonas de mayor afectación ya que presenta fracturas que se propagan a distintas profundidades y en distintas direcciones. Debido a esto en esta zona se presenta el mayor numero de estudios, RPT multifrecuencial, RPT 3-D, Tomografía eléctrica y Sísmica MASW-2D. En el mapa de la Figura 29 se muestran las condiciones de fracturamiento del sitio y los estudios realizados.

En el estudio de RPT multifrecuencial realizado con antenas de 100, 200 y 400 MHz se identifico la profundidad de propagación de distintas fracturas, la litología superficial característica de un material de relleno y flujos piroclásticos. Se observa una profundidad de propagación de fracturas hasta 3 m. Las fracturas registradas corresponden a las fracturas F1d, F1e, y F1f. Se realizo un modelo 3-D con RPT, de 20x6 metros que permitió la caracterización de las fracturas que intersecan la Calle Insurgentes.

Mediante el estudio de Tomografía Eléctrica (Línea 2 presentada en la Figura 30) y sísmica MASW 2-D se caracterizaron los materiales a mayores profundidades. Se identificaron materiales arcillosos y volcánicos arenosos así como sus cambios laterales asociados a intervalos de resistividad y de rigidez.

Mediante las técnicas de prospección geofísica se determino que la zona corresponde a una zona de intersección entre diferentes grupos de fracturamiento que están en proceso de deformación.



Figura. 29. Distribución del fracturamiento y de los estudios de prospección geofísica en el Sitio de la Calle de Insurgentes.

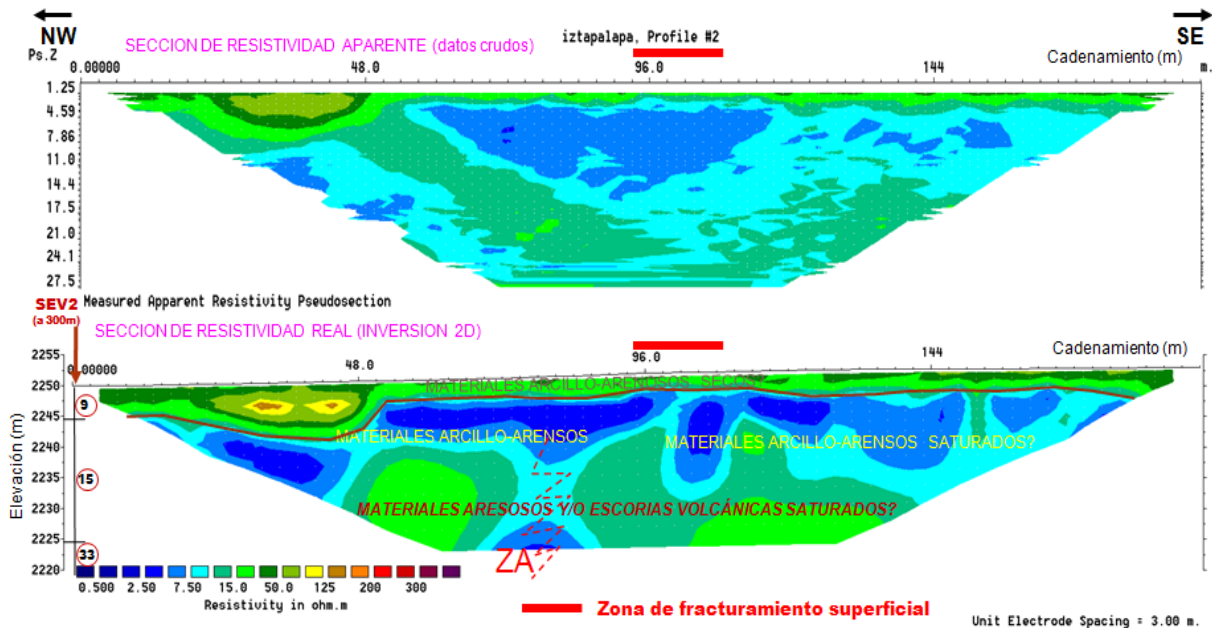


Figura 30. Línea de Tomografía Eléctrica No. 2. Calle Insurgentes. Col. Consejo Agrarista Mexicano. Delegación Iztapalapa.

La línea de Tomografía Eléctrica (Figura 30) tiene una dirección Noroeste – Sureste y su longitud es de 189 m. Este perfil se realizó con una longitud de dipolo de 3m para obtener mayor detalle. Presenta una cobertura bien definida con un espesor de 5 m a excepción de los primeros 50 m del perfil, en donde el espesor aumenta hasta los 8 m, asociados con la mezcla de materiales de relleno y de tipo lacustres de características arcillo-arenosas, con valores de resistividad entre 10 a 80 Ohm-m. Subyaciendo a esta cobertura, se registran valores de resistividad menores a 10 Ohm-m distribuidos a lo largo de todo el perfil. Este comportamiento se asocia con la presencia de materiales arcillosos y limosos con espesor promedio de 10 m. Existe una zona identificada en los cadenamientos 81 a 90, donde la continuidad lateral se ve afectada por un área identificada como zona anómala, asociada con la presencia de grietas o materiales inestables. Superando los 15 m de profundidad, se incrementan los valores de resistividad, asociados con la presencia de materiales de características areno – limosas de mayor compacidad y/o roca volcánica fracturada. La disminución en los valores de resistividad evidencia la heterogeneidad del subsuelo, asociando este comportamiento con lentes arcillosos distribuidos a lo largo del perfil.

En las Figuras 31 a 33 se presentan los perfiles RPT levantados con las Antenas de 100, 200 y 400 MHz respectivamente a lo largo de la Calle Insurgentes, se observan los registros de las fracturas cartografiadas a distintas profundidades y de zonas de deformación que aun no afloran en superficie.

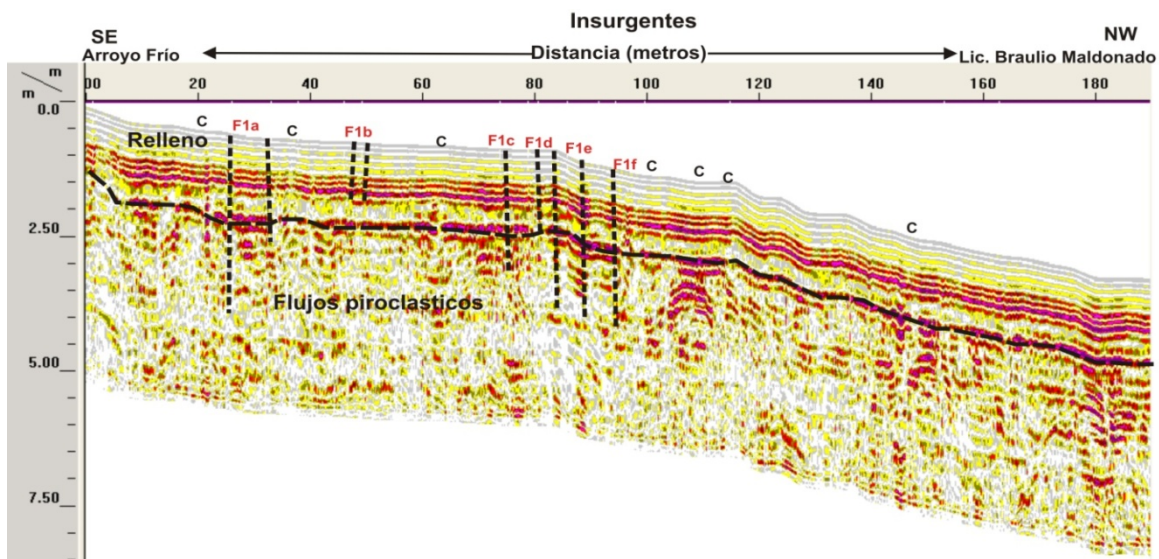


Figura 31. Radargrama a lo largo de la Calle Insurgentes levantado con la antena de 100 MHz. Se observan los registros de la fracturas F1a, F1b, F1c, F1d, F1e y F1f ubicadas en el mapa de la Figura 29 y del contacto entre el relleno antropogénico y los depósitos piroclásticos. La C indica registro de coladeras. Profundidad de penetración 5.5 m.

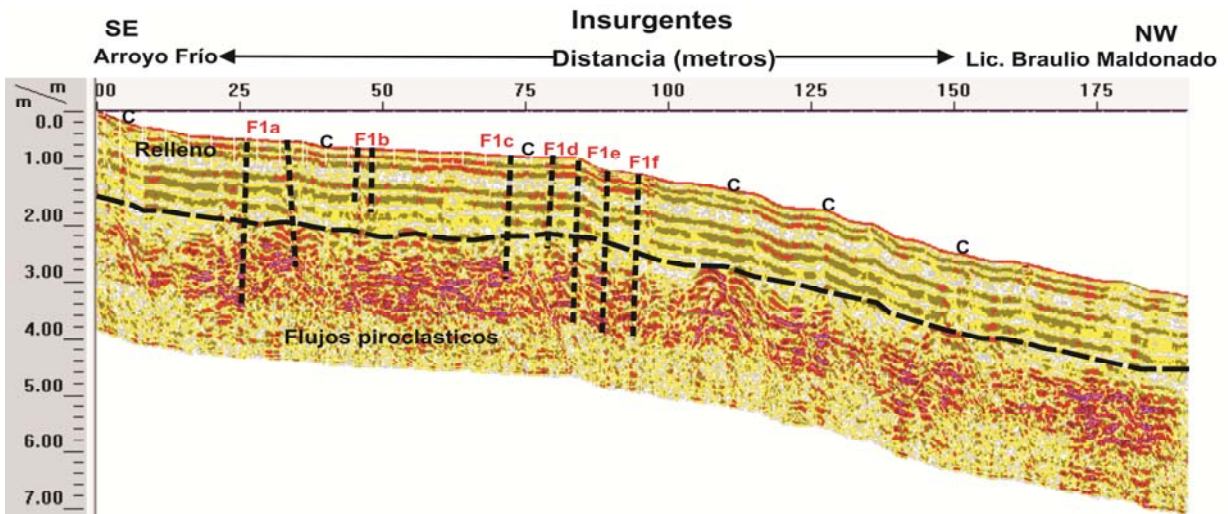


Figura 32. Radargrama a lo largo de la Calle Insurgentes levantado con la antena de 200 MHz. Se observan los registros de la fracturas F1a, F1b, F1c, F1d, F1e y F1f ubicadas en el mapa de la Figura 29 y del contacto entre el relleno antropogénico y los depósitos piroclásticos. La C indica registro de coladeras. Profundidad de penetración 3.9 m.

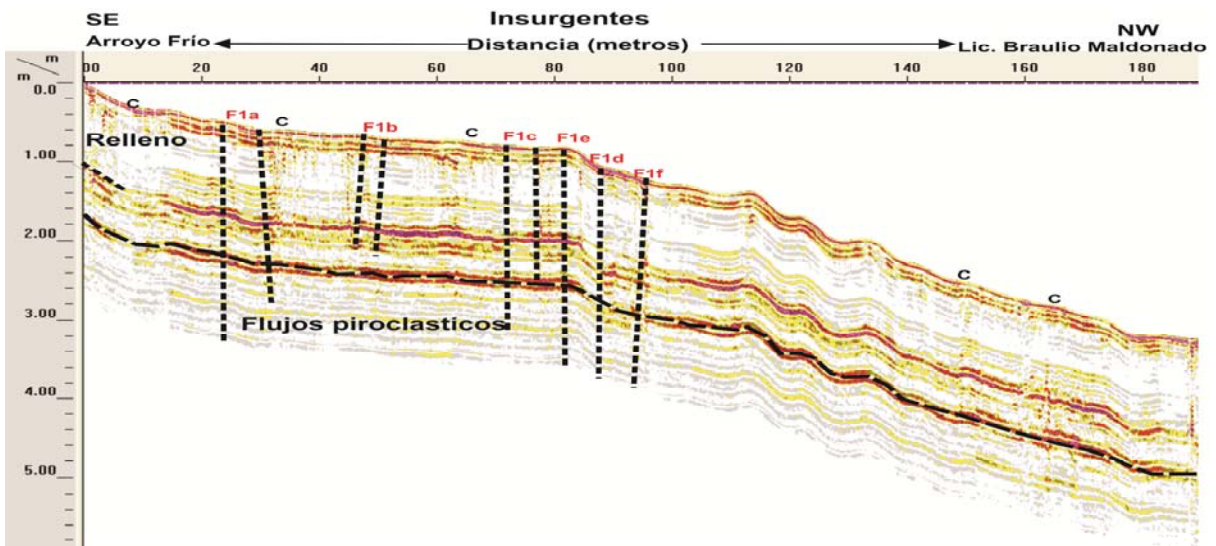
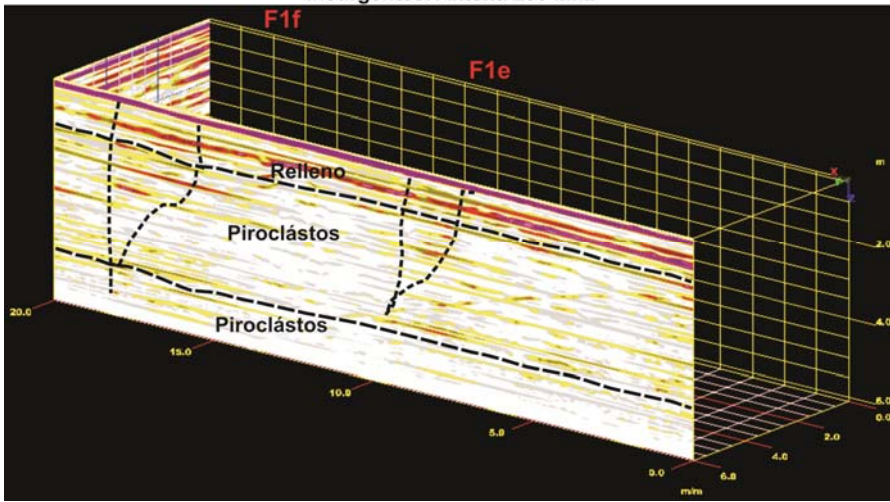


Figura 33. Radargrama a lo largo de la Calle Insurgentes levantado con la antena de 400 MHz. Se observan los registros de la fracturas F1a, F1b, F1c, F1d, F1e y F1f ubicadas en el mapa de la Figura 29 y del contacto entre el relleno antropogénico y los depósitos piroclásticos. La C indica registro de coladeras. Profundidad de penetración 2.7 m.

En los bloques presentados en las Figura 34 (a, b, c, d, e) se presenta un bloque tridimensional RPT realizado con la Antena de 200 MHz en uno de los sitios de mayor afectación de la zona de estudio. Se puede observar la distribución espacial de los sistemas de fracturamiento que confluyen en esta zona y se identifican varias zonas de disturbación.

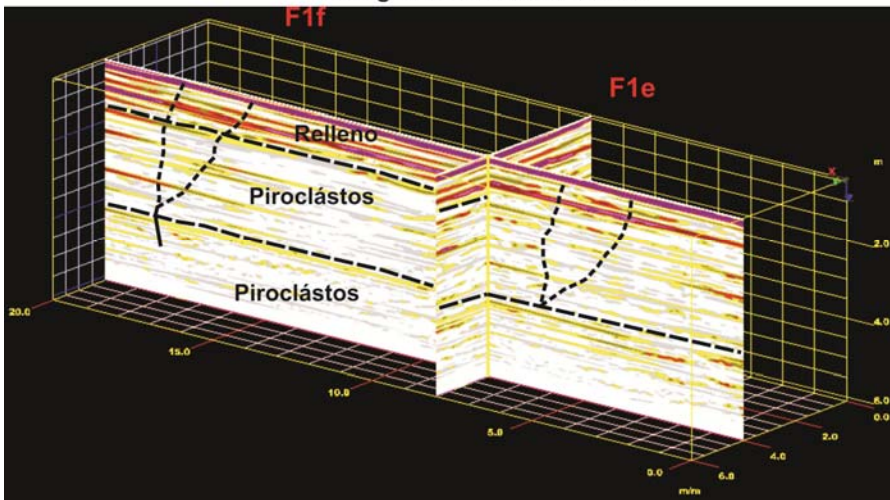


Insurgentes. Antena 200 Mhz



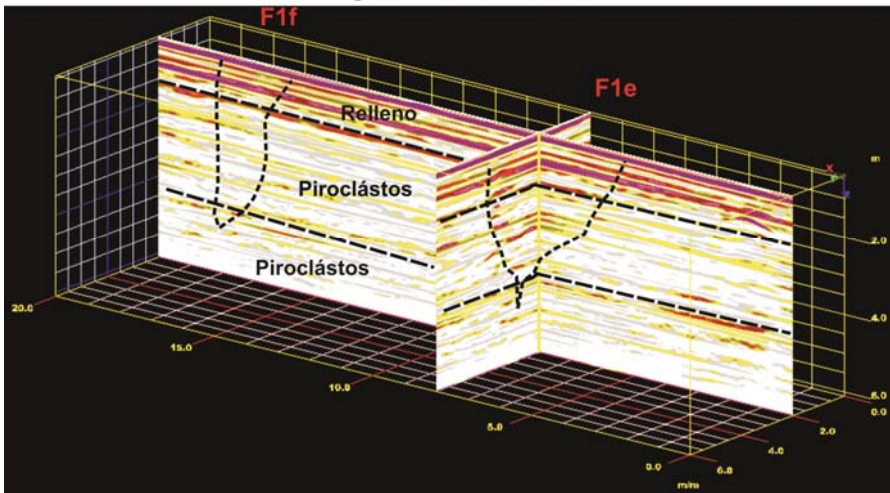
(a)

Insurgentes. Antena 200 Mhz



(b)

Insurgentes. Antena 200 Mhz



(c)

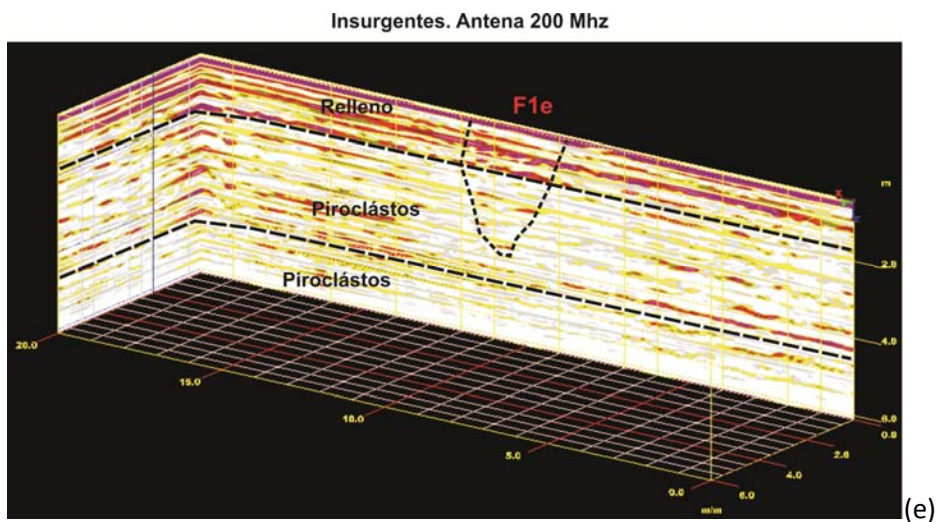
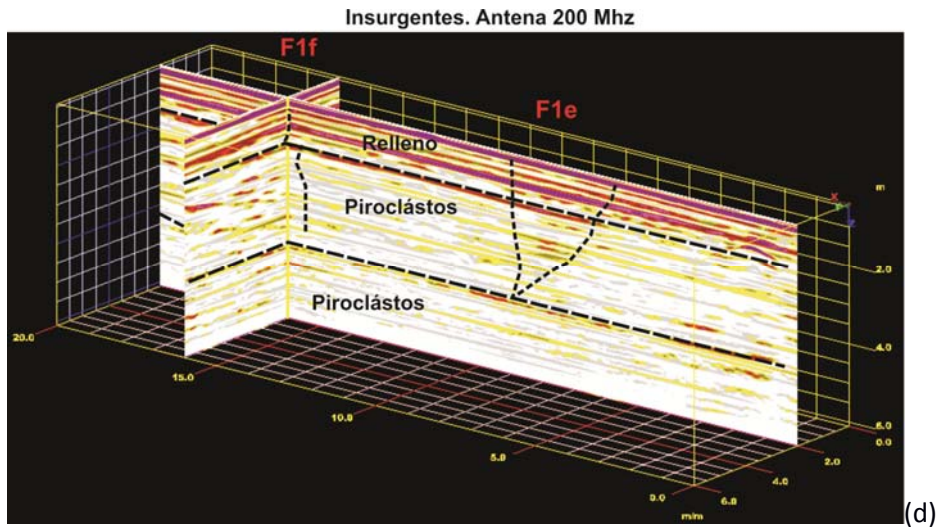


Figura 34. Bloque tridimensional de perfiles 3D realizado con la Antena de 200 MHz, El perfil frontal tiene dirección SE a NW. Se observa el registro de las fracturas F1e y F2f y de la variación de su afectación en el espacio.

Con el fin de evaluar la variación litológica a mayor profundidad e identificar las variaciones en el comportamiento mecánico de la secuencia, se llevo a cabo un perfil MASW a lo largo de la Calle Arroyo Frio, perpendicular a la Calle de Insurgentes (Figura 35), con dirección SW-NE. Con este método se alcanzó una profundidad de penetración de 19 m y se registro una variación lateral en la rigidez de los materiales que podría corresponder a una disminución lateral en la rigidez de las secuencia piroclástica hacia las zona bajas, probablemente asociada a l deposito de materiales fluvio-lacustres.

Perfil perpendicular a Insurgentes

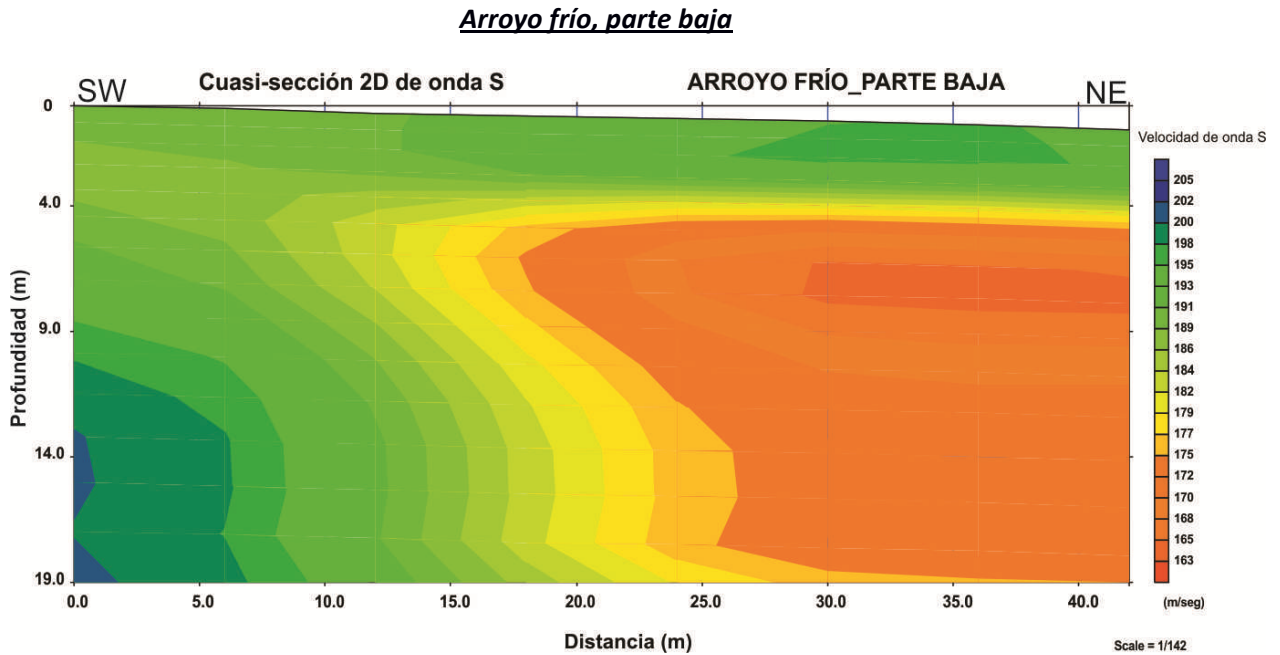


Figura 35. Perfil MASW levantado a lo largo de la Calle Arroyo Frío, frente al Deportivo Chavos Banda, con una longitud de 45 metros. La profundidad de exploración fue de 19 metros. Se observa una variación lateral en la rigidez de los materiales.

4.2 Sitio 2. Avenida Benito Juárez

La Avenida Benito Juárez, es también una de las zonas de mayor afectación ya que presenta una familia de fracturas persistentes que afecta a varias calles perpendiculares. En la Figura 36 se muestran las condiciones de fracturamiento del sitio y los estudios realizados. En este sitio se llevaron a cabo levantamientos de Tomografía Eléctrica, MASW y RPT multifrecuencial.

En la Figura 37 se muestra el perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica ubicado sobre la calle Benito Juárez, realizado con dirección Sureste – Noroeste, presenta una longitud de 195m. Los primeros metros están compuestos por materiales de relleno y de tipo lacustres, con un espesor que varía entre 5 m al inicio del perfil, hasta alcanzar los 10 m al final del mismo. Presenta resistividades entre los 10 a 50 Ohm-m, que se asocian a materiales de relleno o lacustres de tipo arcillo arenosos de granulometría fina a media. Por debajo de esta unidad se encuentra la unidad II, donde se registran las resistividades más bajas, menores a 10 Ohm-m, asociadas a materiales lacustres de granulometría fina de tipo arcilloso, con un espesor del orden de los 20m.

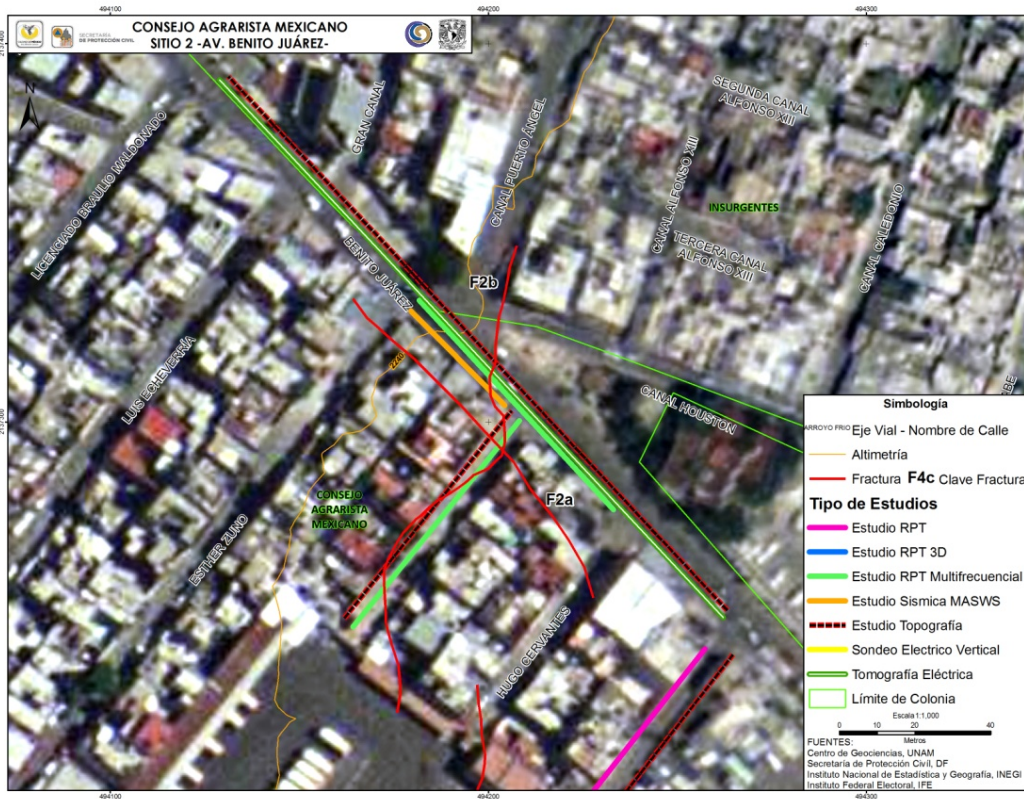


Figura 36. Distribución del fracturamiento y de los estudios de prospección geofísica en el Sitio de la Avenida Benito Juárez.

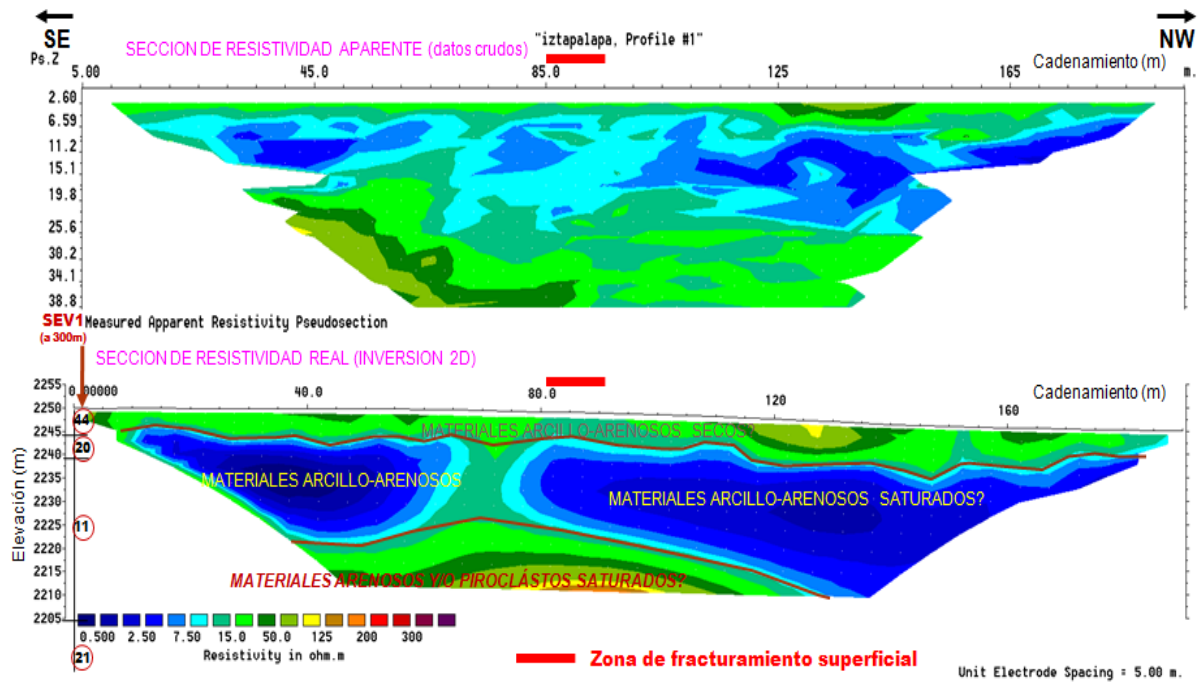


Figura 37. Línea de Tomografía Eléctrica No. 1. Avenida Benito Juárez. Col. Consejo Agrarista Mexicano. Delegación Iztapalapa.

En el cadenamiento 70m a 80m, se registran valores de resistividad ligeramente superiores, asociados con una zona anómala posiblemente relacionada con la presencia de fracturas a profundidad. A una profundidad superior de 20m, se tiene la unidad III. Presenta resistividades superiores a los 10 Ohm-m, extendiéndose hasta la base del perfil. Esta unidad se asocia con materiales areno – limosos de mayor compacidad y/o roca volcánica fracturada.

Mediante el estudio de sismica MASW 2-D se caracterizaron los materiales hasta 19 m de profundidad. Se identificaron cambios laterales de rigidez, sin embargo en esta zona los materiales menos rígidos se ubican pendiente arriba. La zona de prospección se ubica en la parte media del perfil de tomografía eléctrica de la figura 37 en donde se observa una estructura de mayor resistencia entre zonas conductoras. Al parecer estas variaciones obedecen a cambios en las condiciones de emplazamiento de los materiales volcánicos y no a la deposición asociada a las variaciones de pendiente. La variación lateral en la resistencia de los materiales en este sitio está ocasionando la localización de la deformación de los materiales granulares y creando una zona de fracturamiento estrecha y profunda que genera una afectación importante a la infraestructura urbana.

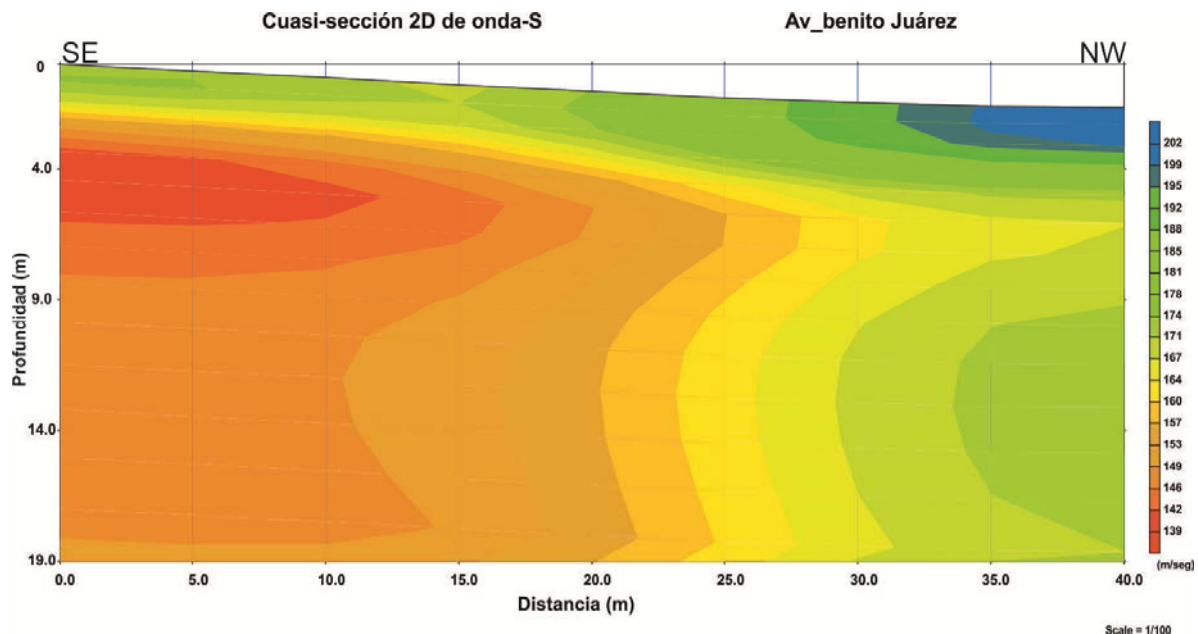


Figura 38. Perfil MASW levantado en la avenida Benito Juárez con una longitud de 40 m de dirección SE-NW. La profundidad de exploración fue de 19 metros.

En el estudio de RPT multifrecuencial realizado con antenas de 100, 200 y 400 MHz se identificó la profundidad de propagación de distintas fracturas, la litología superficial característica de un material de relleno y flujos piroclásticos (Figura 39). Se observa una profundidad de propagación de fracturas hasta más de 7 m con la Antena de 100 MHz. En todos los radargramas se registran zonas de disturbación que aún no afloran en superficie.

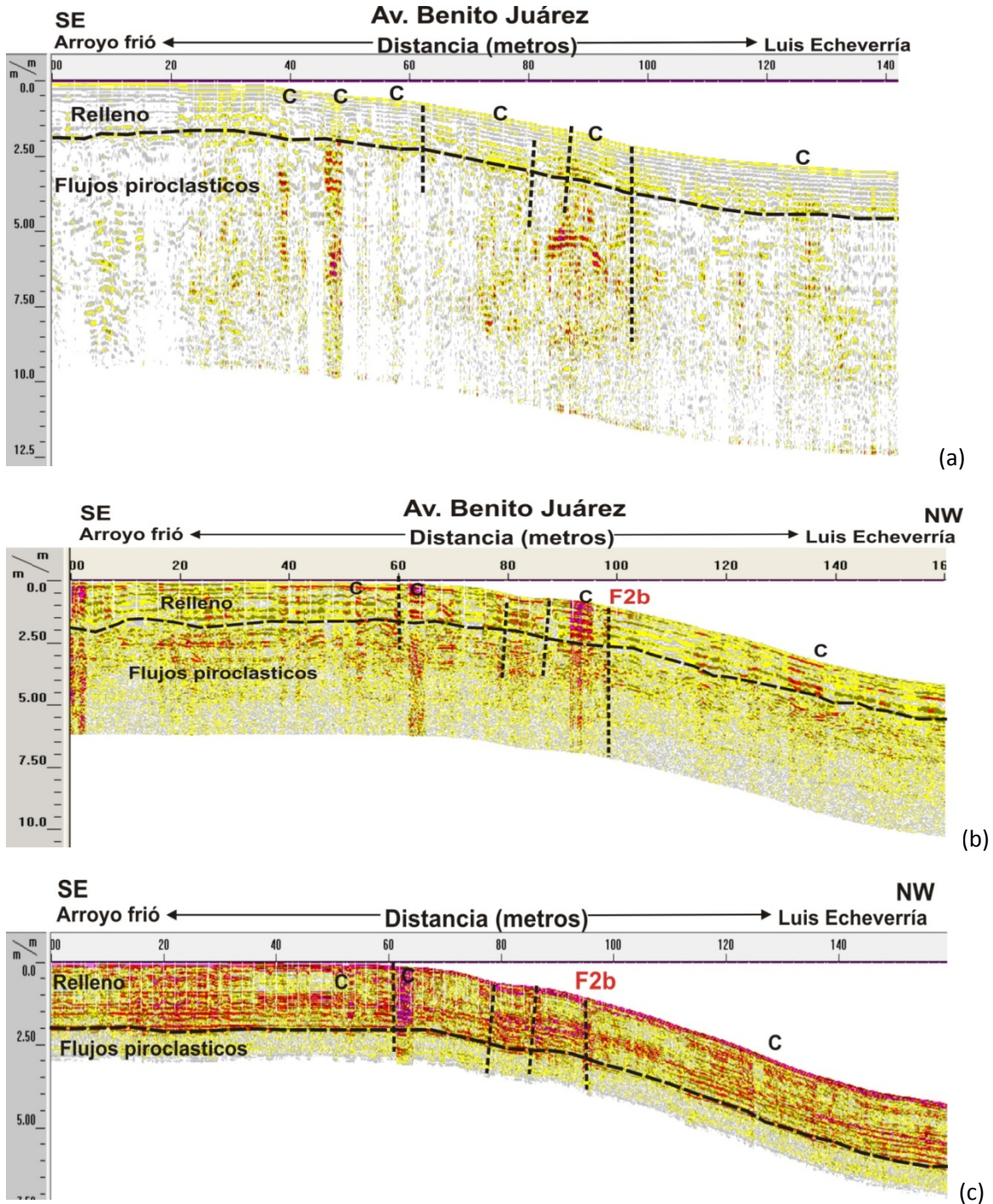


Figura 39. Análisis RPT Multifrecuencia con las Antenas de (a) 100 MHz, (b) 200 MHz y (c) 400 MHz. Radargramas a lo largo de la Avenida Benito Juárez de 160 m de longitud de dirección SE-NW. Se observan los registros de la fractura F2b ubicada en el mapa de la Figura 36 y del contacto entre el relleno antropogénico y los depósitos piroclásticos. La C indica registro de coladeras. Profundidades de penetración (a) 9 m, (b) 6.5 y (c) 3 m.

En la Figura 40 se presenta el análisis de RPT multifrecuencial realizado con antenas de 100, 200 y 400 MHz sobre la Calle de Tercera Cerrada de Jesús Araujo, perpendicular a la Av, Benito Juárez. En estos perfiles se registraron varias zonas de de fracturamiento que aun no afloran en superficie, por lo que este sitio presenta un alto grado de riesgo potencial.

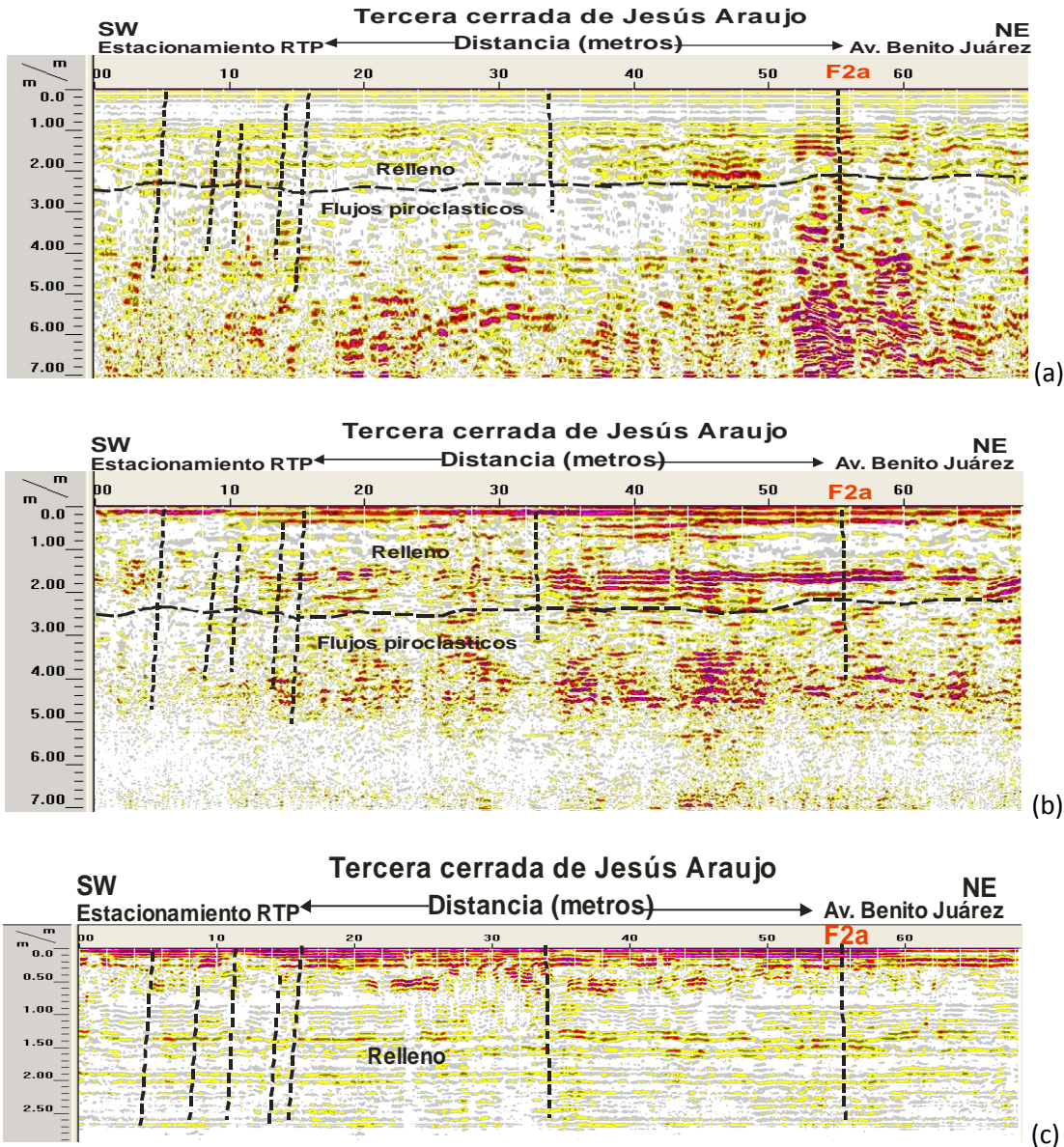


Figura 40. Análisis RPT Multifrecuencia con las Antenas de (a) 100 MHz, (b) 200 MHz y (c) 400 MHz. Radargramas a lo largo de la 3ra Cerrada de Jesús Araujo de 90 m de longitud de dirección SW-NE. Se observan los registros de la fractura F2a ubicada en el mapa de la Figura 36 y del contacto entre el relleno antropogénico, de los depósitos piroclásticos y varias zonas de fracturamiento que aún no afloran en superficie Profundidades de penetración (a) 7 m, (b) 6 y (c) 2.5 m.

4.3 Sitio 3. 3ra Cerrada de Fresno

La Calle Tercera Cerrada de Fresno presenta fracturas con escalonamiento asociados a los cambios de pendiente. En este sitio se realizaron estudios de Tomografía eléctrica, Sísmica MASW-2D y RPT 3-D, En el mapa de la Figura 41 se muestran las condiciones de fracturamiento del sitio y los estudios realizados. Mediante el estudio de Tomografía Eléctrica (Línea 3 presentada en la Figura 42) y sísmica MASW 2-D (Figura 43) se caracterizaron los materiales a mayores profundidades.

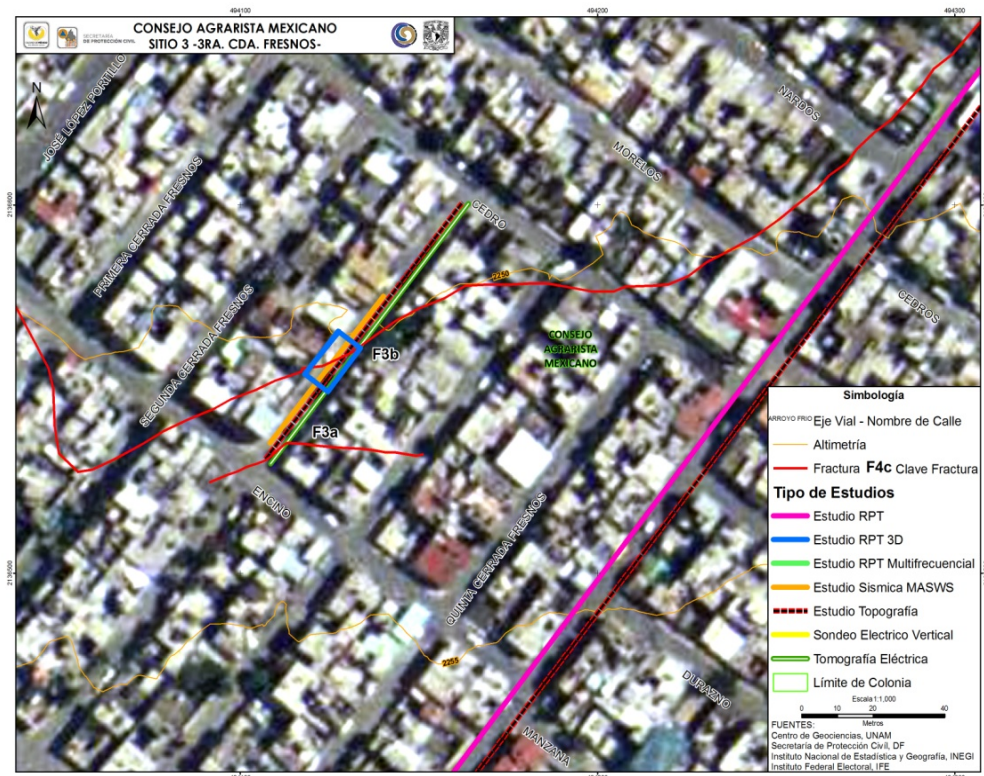


Figura 41. Distribución del fracturamiento y de los estudios de prospección geofísica en el Sitio de Tercera Cerrada de Fresno.

El perfil de Tomografía Eléctrica (Figura 42) con dirección Suroeste–Noreste, presenta una longitud de 95 m. Los materiales de este perfil registran los valores más altos de resistividad. Presenta una cobertura con un espesor de aproximadamente 7 m, asociado con materiales arenosos con mayor grado de compacidad y/o depósitos piroclásticos. Los valores de resistividad son de orden de los 50 a 100 Ohm-m. Adicionalmente se registra una zona identificada como zona anómala para los cadenamientos 20 a 30, asociada con la presencia de fracturas visibles en superficie que se extienden a profundidad. A más de 10 m de profundidad, se incrementan los valores de resistividad, hasta alcanzar los 300 Ohm-m, asociados con la presencia de roca volcánica de mayor compacidad.

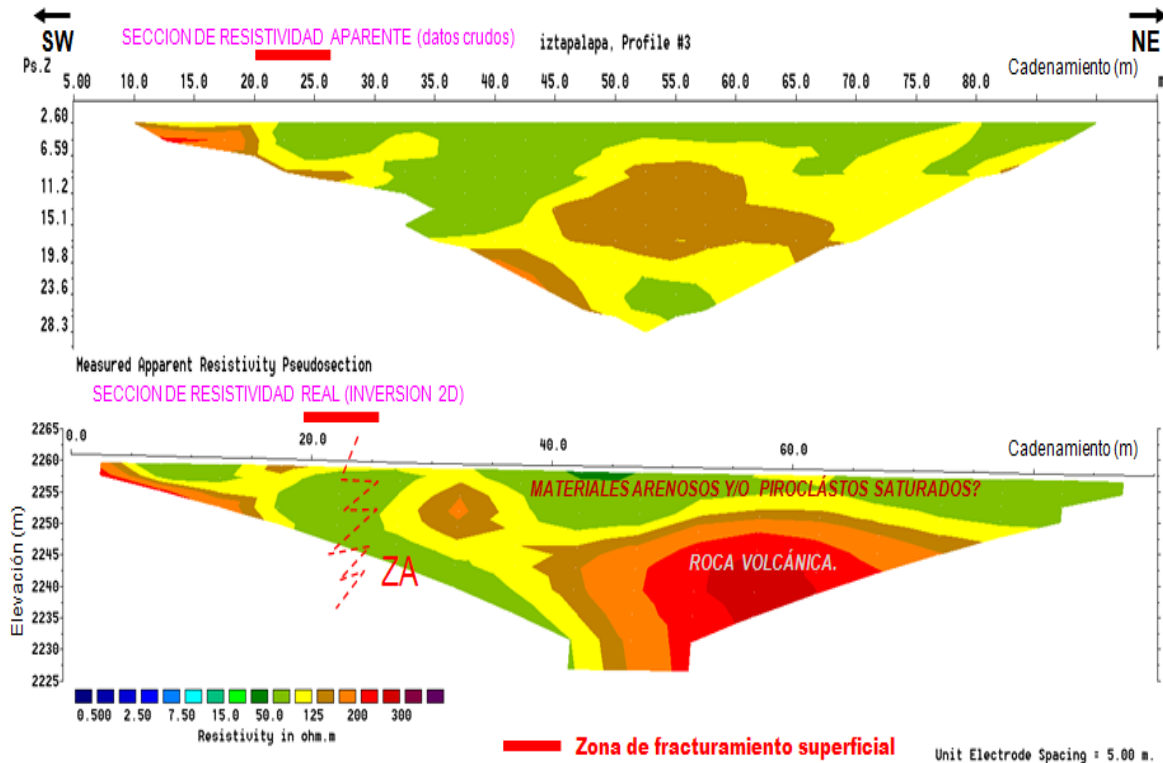


Figura 42. Línea de Tomografía Eléctrica No. 3. Tercera Cerrada de Fresnos. Col. Consejo Agrarista Mexicano. Delegación Iztapalapa.

En la Figura 43 se presenta un perfil MASW levantado en la misma calle de 64 m de longitud con dirección SW-NE. De manera concordante con los resultados de tomografía eléctrica se presentan mayores valores de rigidez a profundidad y pendiente abajo.

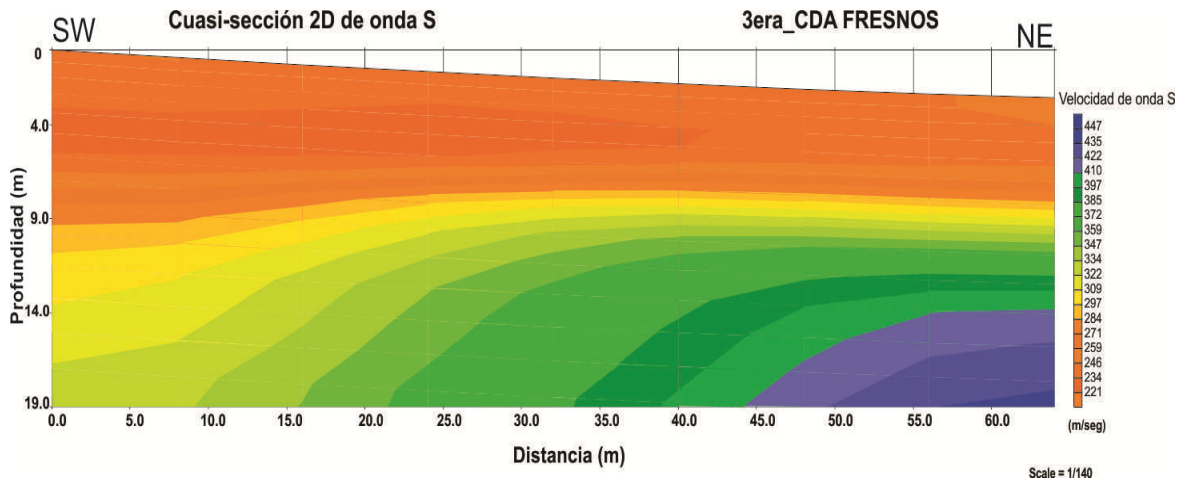


Figura 43. Perfil MASW levantado en la 3era Cerrada de Fresnos con una longitud de perfil de 64 metros, la profundidad de exploración fue de 19 metros. Se observan mayores valores de rigidez a profundidad pendiente abajo.

De acuerdo a los resultados anteriores la morfología de materiales volcánicos, que podría estar asociada a rocas fracturadas, presenta una superficie irregular que subyace a la secuencia de depósitos piroclásticos. Estas irregularidades podrían estar localizando la deformación en la zona ocasionando el fracturamiento de la secuencia granular. El estudio de RPT tridimensional realizado con la Antena de 200 MHz permitió la caracterización de las fracturas que se propagan hacia la superficie (Figura 44 a, b, c, d, e).

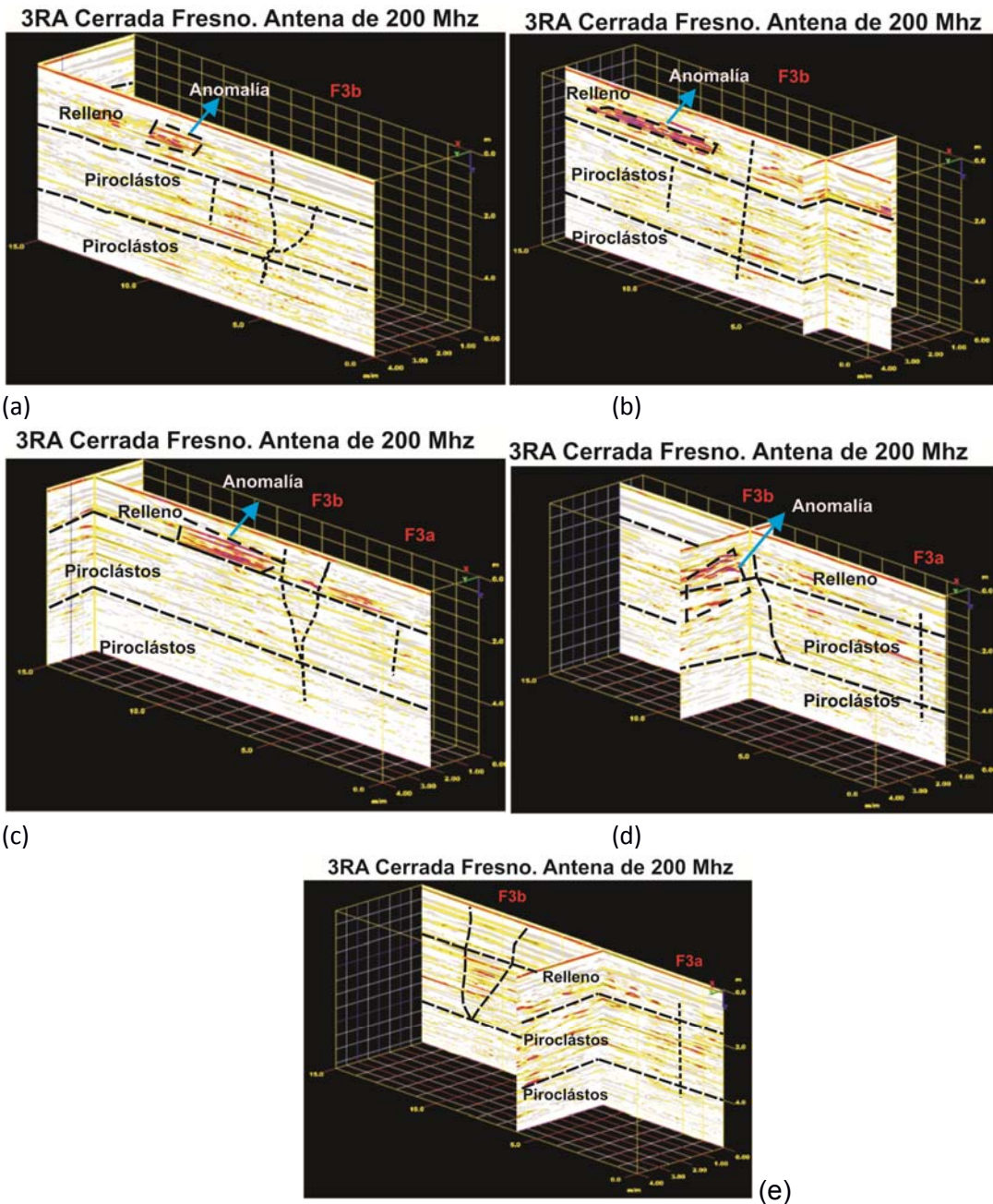


Figura 44. Bloque tridimensional de perfiles 3D realizado con la Antena de 200 MHz, El perfil frontal tiene dirección SW a NE. Se observa el registro de las fracturas F3a y F3b y de la variación de su afectación en el espacio.

4.4 Sitio 4. Calle de Luna

La Calle de Luna presenta fracturas que parecen reflejar una estructura preexistente de depósitos volcánicos. En el mapa de la Figura 45 se muestran las condiciones de fracturamiento del sitio y los estudios realizados. Mediante el estudio de Tomografía Eléctrica (Línea 5 presentada en la Figura 46) se caracterizaron los materiales hasta 40 m de profundidad.

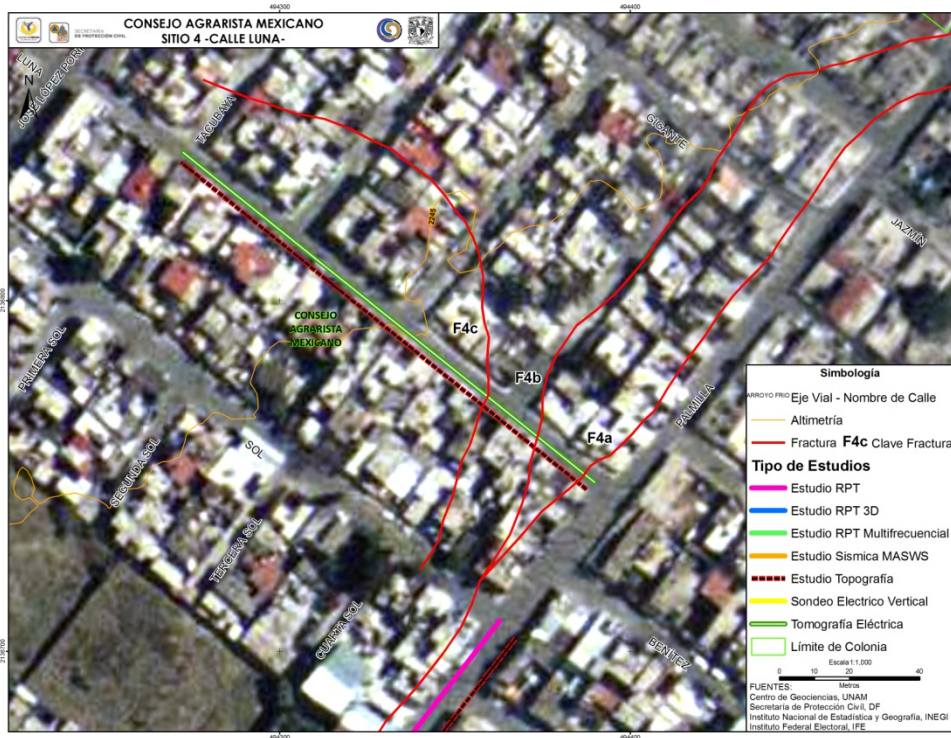


Figura 45. Distribución del fracturamiento y de los estudios de prospección geofísica en el Sitio Calle de Luna.

El perfil de Tomografía Eléctrica en el Sitio Calle de Luna tiene una logrando de 155 m con una dirección general Sureste–Noroeste. Presenta una cobertura con resistividades entre 10 a 50 Ohm-m, asociadas con materiales arcillo–arenosos y con espesor de aproximadamente 5 m. Se distribuye con ese espesor hasta el cadenamiento 80, a partir de ahí y hasta el final del perfil, aumenta hasta el orden de unos 20 m de espesor. Subyaciendo a esta cobertura, se observan valores de resistividad menores a 10 Ohm-m, evidenciando la presencia de materiales de características arcillosas y limosas posiblemente saturados, presentando un espesor de 10 m. Esta discontinuidad lateral identificada a partir del cadenamiento 70 a 85, se denomina zona anómala, posiblemente asociada con la presencia de fracturas en el subsuelo. A más 25m de profundidad y para el inicio del perfil, existe un incremento en los valores de resistividad evidenciando la presencia de materiales arenosos de mayor grado de compacidad y/o roca volcánica fracturada.

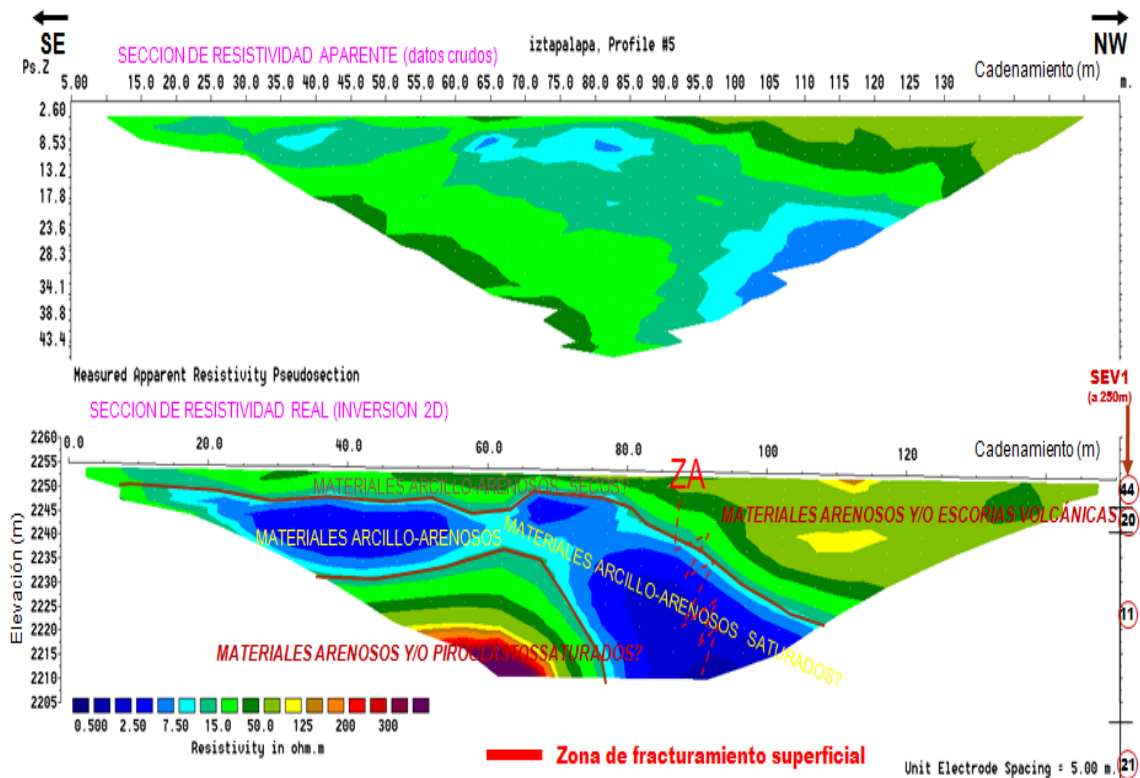


Figura 46. Línea de Tomografía Eléctrica No. 5. Calle de Luna, de orientación SE-NW. Col. Consejo Agrarista Mexicano. Delegación Iztapalapa.

Los resultados obtenidos a partir de la Tomografía Eléctrica permiten corroborar la hipótesis inicial de la presencia de una estructura preexistente en este sitio, que esta ocasionado una localización de la deformación y consecuente fracturamiento del subsuelo que puede alcanzar profundidades mayores a los 30 m.

4.5 Sitio 5. Calle de Palmas

La Calle de Palmas presenta fracturas que pueden corresponder a una zona de contacto entre materiales volcánicos y depósitos lacustres. En el mapa de la Figura 47 se muestran las condiciones de fracturamiento del sitio y los estudios realizados. Mediante el estudio de Tomografía Eléctrica (Línea 4 presentada en la Figura 48) se caracterizaron los materiales hasta 40 m de profundidad que permiten identificar una secuencia de material de baja resistividad sobreyaciendo a uno de mayor resistividad. Este sistema de fracturas presenta una afectación directa a la Escuela José María Velasco.

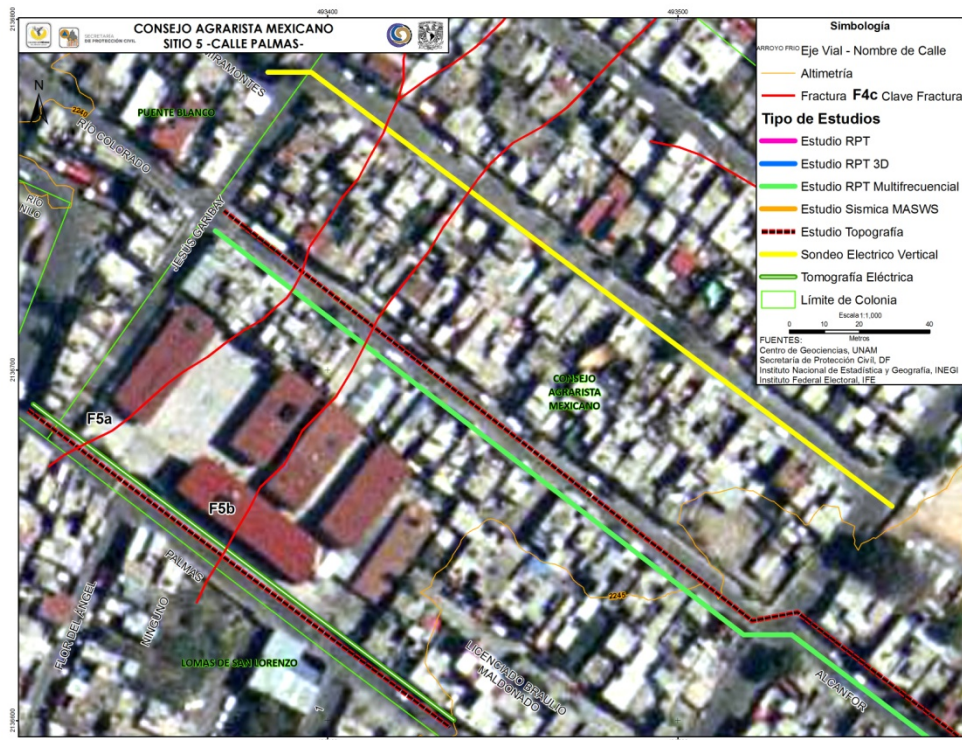


Figura 47. Distribución del fracturamiento y de los estudios de prospección geofísica en el Sitio Calle de Palmas.

La tomografía de resistividad eléctrica realizada sobre la calle Palmas cubre una longitud de 155 m y presenta una dirección general Noroeste – Sureste (Figura 48). Presenta una cobertura de aproximadamente 5 m de espesor para los primeros 50 m del perfil, extendiéndose hasta 10 m de espesor a partir del cadenamiento 50 y hasta el final del perfil. Los valores de resistividad observados para esta cobertura son menores a los 10 Ohm-m y se asocian con materiales arcillosos y limosos. A partir del cadenamiento 60 y hasta el final del perfil, existe una cobertura de tan sólo 3 m de espesor, en donde la resistividad es del orden de los 10 a 30 Ohm-m, asociados con la presencia de materiales arcillo-arenosos secos.

Adicionalmente se observa una zona para los cadenamientos 40 a 50 en donde la continuidad resistiva lateral se rompe, evidenciando la presencia de materiales de diferentes características y/o fracturas que continúan aun a profundidad aproximada a 10 m. Subyaciendo a esa cobertura, se localiza un material de características resistivas superiores a 10 Ohm-m, el cual es asociado a materiales arenosos de mayor compacidad y/o a roca volcánica fracturada extendiéndose hasta la base del perfil. Para los primeros 50 m del perfil y hasta profundidades del orden de los 25 m, existen valores de resistividad bajos, evidenciando la heterogeneidad del subsuelo, asociados con materiales arcillosos y arenosos, definiendo zonas en las cuales el riesgo al fracturamiento es mayor.

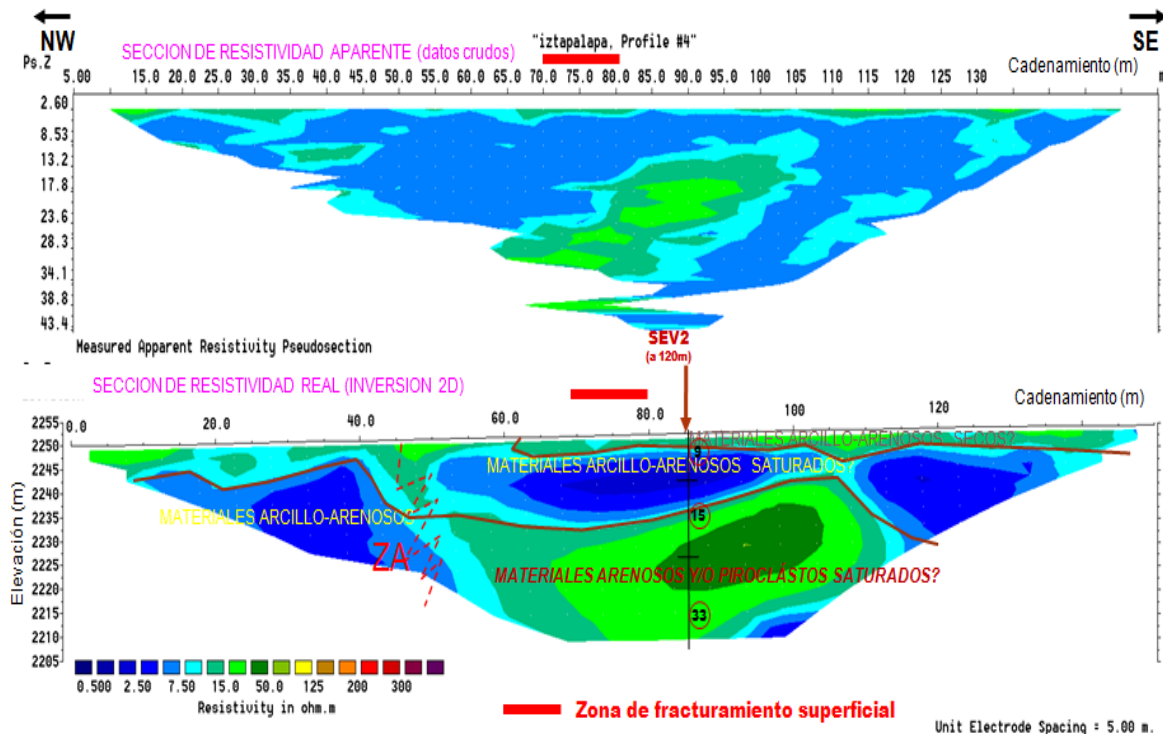


Figura 48. Línea de Tomografía Eléctrica No. 4. Calle de Palmas. Orientación NW-SE. Col. Consejo Agrarista Mexicano. Delegación Iztapalapa.

5. Integración de Resultados

5.1 Levantamiento de predios afectados geo-referenciados

El fracturamiento del subsuelo puede afectar una gran parte de la cimentación de obras civiles provocando una que los puntos de carga sean desestabilizados y ocasionando daños estructurales en la edificaciones que provocar el basculamiento progresivo y desplome de las mismas. Es común observar en los muros la aparición de grietas de tensión características con un ángulo de 45°, grietas horizontales o una combinación de ambas. Esto permite para identificar el estado de esfuerzos de la estructura e inferir las direcciones de desplazamiento.

Los elementos estructurales de carga que presentan un mayor grado de afectación a lo largo de toda una estructura pueden evidenciar un grado mayor de deformación. En la zona de estudio se llevó a cabo la inspección y el levantamiento de un total de 539 viviendas, de las cuales algunas se desplantan directamente sobre los sistemas de

fracturamiento cartografiados. Las viviendas muestran grados de afectación variables que dependen en gran medida de las condiciones geológicas del sitio, del tipo de construcción y de la capacidad de carga de los materiales del subsuelo.

En el mapa de la Figura 49 y en la Tabla 5 se presenta el número de predios afectados por el fracturamiento. Además, al estudiar con detalle el origen y las condiciones de propagación de los sistemas de fracturamiento identificados fue posible hacer una propuesta de viviendas en riesgo potencial, es decir que podrían presentar afectaciones debido a que se localizan en zonas en donde ya se tienen evidencias de vulnerabilidad física y/o de deformación.

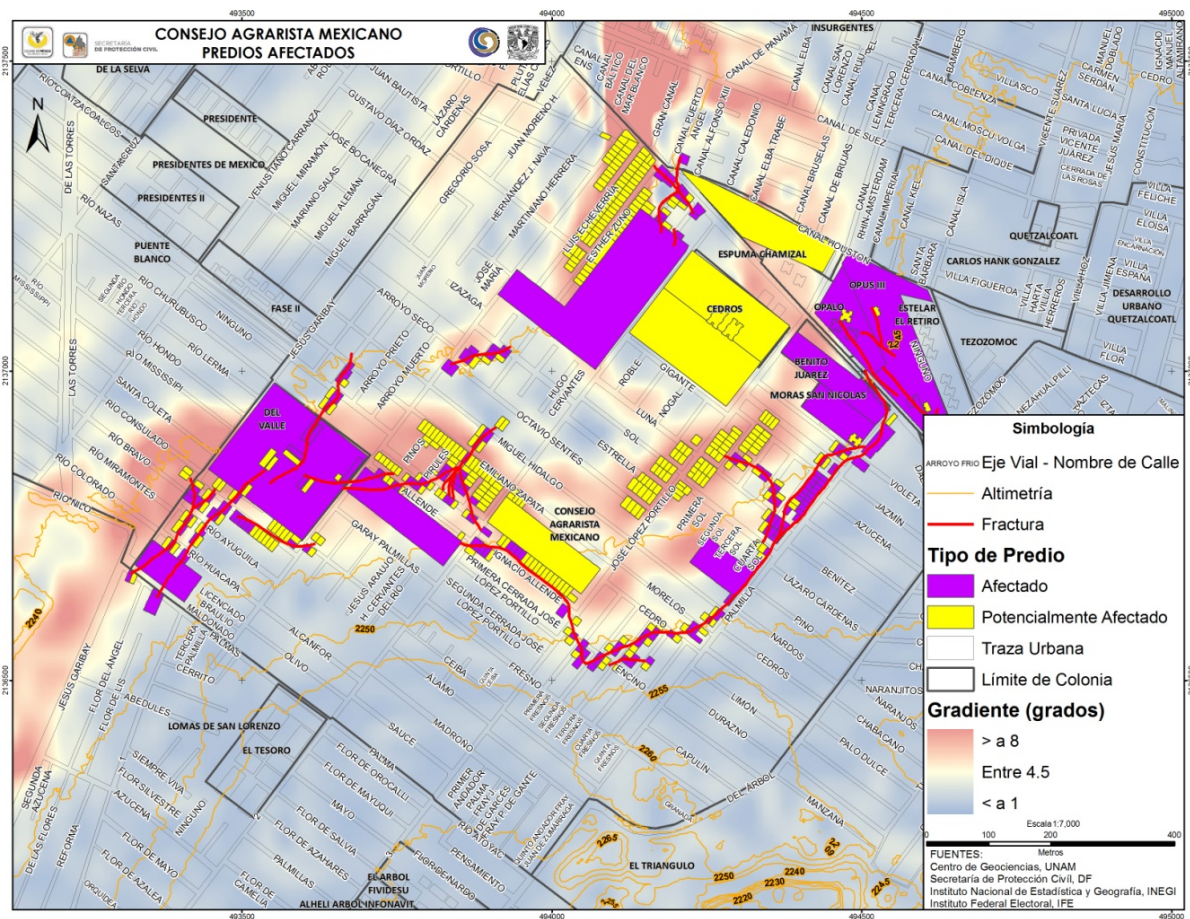


Figura 49. Mapa de predios afectados por el fracturamiento (en violeta) o con riesgo potencial de afectación (en amarillo).

En el mapa de predios afectados se tomó como criterio complementario el mapa de variación de las velocidades de subsidencia (gradiente) que se explica en el inciso siguiente.



Tabla 5. Numero de predios afectados por fracturamiento en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano.

Predios Afectados	
Tipo de Predio	Numero de Predios
Afectado	189
Potencialmente Afectado	350
TOTAL	539

5.2 Mapa de dirección de movimientos

Para la elaboración del mapa de dirección de movimientos se utilizaron diversos criterios de análisis. Inicialmente se tomo como base el mapa de cartografía detallada del fracturamiento en la zona de estudio y se complemento con el análisis de propagación de los sitios identificados de deformación crítica.

De manera complementaria se integro un análisis morfométrico para evaluar la topografía como un elemento detonante del desplazamiento (gravitacional) aunado al análisis del mapa geológico que permite identificar las zonas de debilidad (como zonas de fracturamiento, fallamiento o contacto) y/o superficies potenciales de despegue.

Finalmente este análisis se complemento con la elaboración de una mapa de gradiente de deformación vertical generado a partir de los interferogramas de Radar de Apertura Sintética (InSAR).

Para la obtención del gradiente de subsidencia, se realizo a partir de la imagen obtenida por los pares interferometricos, en los cuales se plasma la velocidad promedio de subsidencia anual del periodo que comprende 2002 al 2007. A partir de un software GIS, mediante las herramientas de análisis espacial se identifico la pendiente, esto es, el gradiente o la tasa de cambio máximo en el valor Z. El rango de valores del raster se expresa en grados, estos entre los 0° a mayores de 8°.

Dado que las variaciones del valor z, en los estudios interferométricos (subsidencia), no presentan valores tan contrastantes como la altitud (con pendientes entre los 0° a los 90°), si tienen una expresión y coherencia con la deformación y el fracturamiento, ya sea de manera superficial o con potencial para afectar el entorno urbano en un futuro.



Esta coherencia entre el gradiente de subsidencia y el fracturamiento que se expresa en superficie, se encuentra marcada al suroeste de la colonia, y al centro de la misma. El fracturamiento no se presenta en el gradiente máximo de la subsidencia, sino en la franja de despegue de la misma, ya que existe un esfuerzo derivado de las variaciones en el gradiente de subsidencia. Esto se observa de manera superficial en el Figura 50. Que corresponde a la zona sur, en función del patrón de gradiente máximo (zona roja) es aquí donde se encuentran diversas secuencias volcánicas del Yahualixqui.

En el mapa de dirección de movimientos de la Figura 50 se presentan los siguientes criterios indicativos de desplazamiento: (1) Se indica con una flecha a la proyección del vector resultante en la dirección del desplazamiento, esto significa que estos vectores tiene una cierta componente vertical y horizontal que definen su magnitud e indican la proyección de la dirección y el sentido del movimiento; (2) Se presenta como un círculo con una cruz a los sitios en donde se identifico el cruce de varios sistemas de fallas o rasgos estructurales mayores y que ocasionan la localización de la deformación en los materiales granulares y generan planos de fracturamiento bien definidos y de profundidades importantes; (3) Se marca con círculo negro a los sitios en donde se ha identificado un desplazamiento vertical principalmente asociado a la compresibilidad de los materiales granulares finos, común en las zonas de planicie lacustre, o en zonas que presentan un gradiente de deformación vertical importante con una probable componente gravitacional. De esta manera en el mapa de desplazamiento los sitios críticos del polígono de recurrencia (Calles Insurgentes y Av. Benito Juárez) presentarían un mecanismo de fracturamiento por rasgos estructurales y en los sitios de la Calle Palmas y de la 3ra Cerrada de Fresno se podrían indicar los vectores de desplazamiento hacia la planicie lacustre y zonas de menor pendiente.

5.3 Modelo conceptual de deformación en la zona de estudio

A partir de la integración de los datos obtenidos con la cartografía, geofísica y topografía, se puede mencionar que gran parte de la generación del fracturamiento en esta zona de estudio se concentra principalmente en una franja de transición donde convergen los depósitos volcánicos, fluviolacustres y las secuencias arcillosas del ambiente lacustre que existió en la zona (Figura 51). Los rasgos del fracturamiento cartografiado muestran que gran parte de su generación y control estructural puede estar asociado a la morfología preexistente, correspondiente a los frentes de los depósitos volcánicos y/o vulcano-sedimentarios.

A partir de la cartografía detallada en la zona de estudio se infiere que el comportamiento mecánico de los materiales es variable a lo largo de los sistemas de fracturamiento y que está condicionado por las características geológicas y la topografía de cada sitio, como se muestra en la zonificación morfológica del Figura 52.

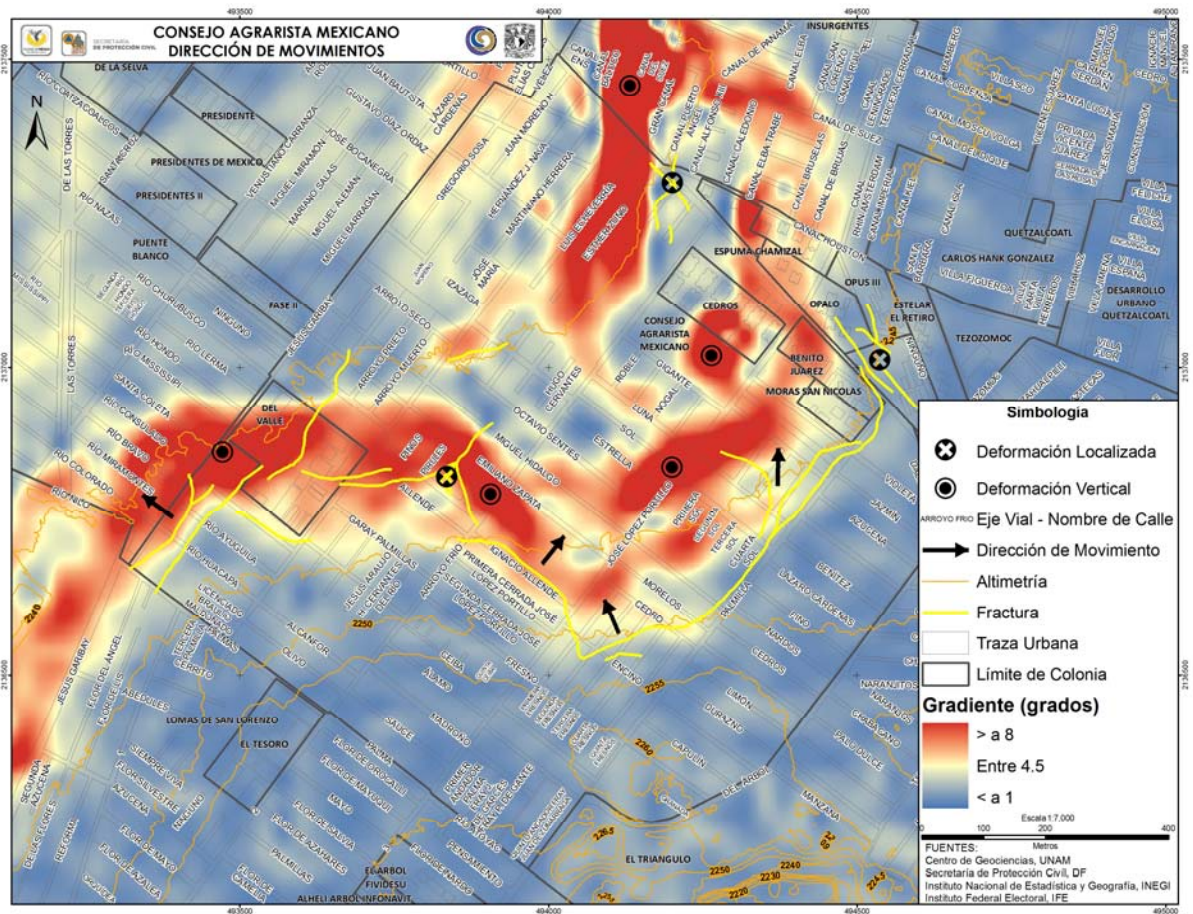


Figura 50. Mapa de dirección de movimientos generados a partir del análisis de los sistemas de fracturamiento..

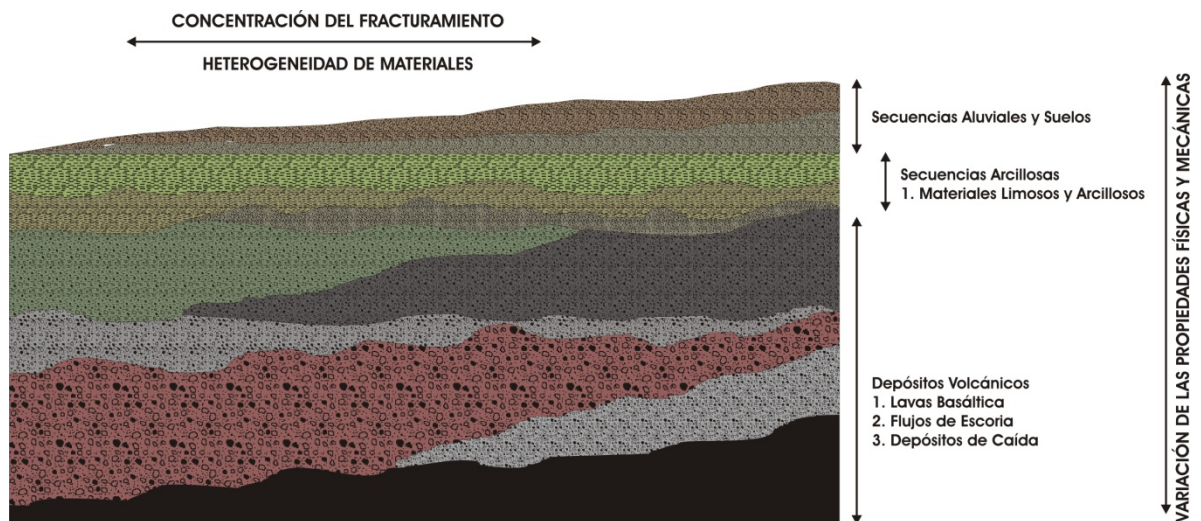


Figura 51. Variación estratigráfica vertical y lateral en una secuencia tipo del piedemonte del Volcán Yuhualixqui

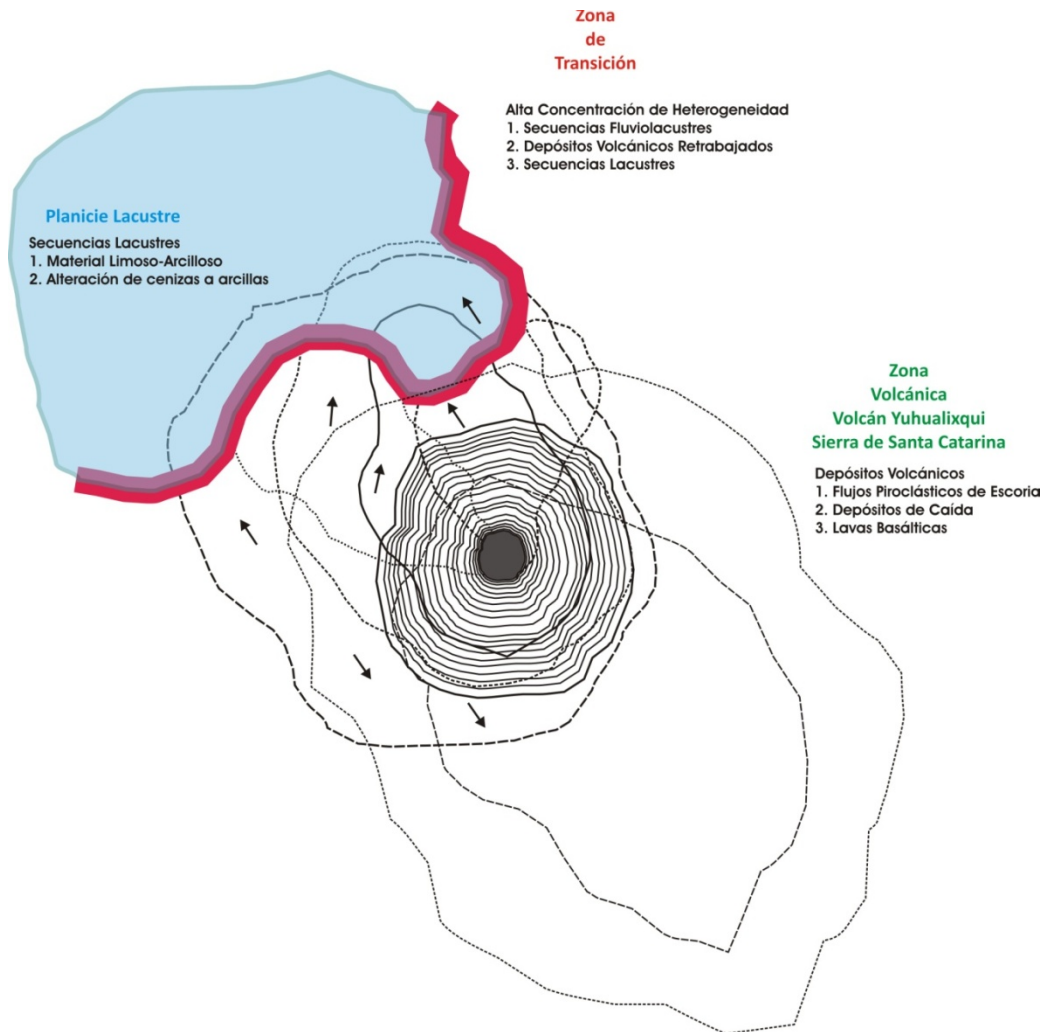


Figura 52. Zonificación morfológica del flanco noroccidental del Volcán Yuhualixqui.

El fracturamiento del subsuelo afecta tanto en el equipamiento e infraestructura urbana de manera continua. De acuerdo al grado de afectación se identificaron cinco sitios de deformación crítica:

Sitio 1. Calle Insurgentes, entre Arroyo Frio y Braulio Maldonado

En la zona se identificó un sistema de fracturamiento con orientación NE-SW, formando una geometría curvilínea, el área de influencia se estimó entre 2 y 5 m con una apertura variable entre 10 y 30 cm en promedio. No se presenta un desplazamiento vertical importante. Los rasgos del fracturamiento en este sitio muestran la convergencia de uno o más frentes mostrando una morfología errática y circular asociada a antiguos depósitos volcánicos controlados probablemente por la paleotopografía preexistente. Este sitio presenta una pendiente promedio de 10°.



Sitio 2. Calle 3ª Cerrada de Jesús Araujo esquina con Avenida Benito Juárez.

En este sitio se registró un sistema de fracturamiento con orientación NE-SW cuya área de influencia se estimó entre 3 y 6 m con una apertura variable entre 20 y 40 cm en promedio. Se presenta un desplazamiento vertical de 10 cm en promedio. A partir de los rasgos del fracturamiento en este sitio se evidencia una morfología preexistente asociada al emplazamiento de materiales volcánicos, su influencia inicia en la Calle de Del Río y termina en la calle de Esther Zuno de Echeverría en donde la infraestructura y el equipamiento urbano indican un ligero desplazamiento.

Sitio 3. Calle 3ª. Cerrada de Fresno entre Fresno y Cedro

El sistema de fracturamiento identificado en este sitio tiene una orientación preferencial NE-SW con un área de influencia de aproximadamente de 5 m. La geometría formada en este sitio es lineal y escalonada, las aperturas mostradas alcanzan 0.30 m, el desnivel promedio registrado es de 0.80 m. Se presenta una propagación del fracturamiento mayor a los 3 m en superficie y una recurrencia de colapso de material provocando socavamientos de diferentes magnitudes. En este sitio el fracturamiento parece estar controlado por la existencia de una paleo-topografía. Este sistema es el más cercano al aparato volcánico (Yuhualixqui o San Nicolás) y actualmente ha formado una geometría en escalón.

Sitio 4. Calle Luna entre Palmillas y Jesús Araujo.

El fracturamiento en esta zona tiene una orientación NE-SW y NW-SE, se presenta una geometría en forma curva que parece delimitar parte de una estructura volcánica asociada a frentes de materiales volcánicos pre-existentes. El radio de influencia de las fracturas principales es de 2.5 metros y su apertura es de 0.70 m en promedio.

Sitio 5. Alcanfor entre Braulio Maldonado y Jesús Garibay (Cercano a la Escuela Primaria José María Velasco).

En este sitio se registro un sistema de fracturamiento con orientación NE-SW, entre las dos principales fracturas existe un espaciamiento de 20 m. La geometría formada es lineal y escalonada, los desniveles son de aproximadamente 0.60 m en promedio, el área de influencia es de 5 m y su apertura es de 0.80 m. De acuerdo a la información disponible del subsuelo (sondeos geotécnicos y registros litológicos de pozos) en este sitio se localiza una zona de contacto entre depósitos volcánicos y secuencias lacustres, con propiedades físicas y mecánicas contrastantes. Gran parte de la secuencia lacustre descansa sobre flujos de lava basáltica fracturada con una topografía irregular.



6. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones del estudio realizado en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano de la Delegación Iztapalapa

Con el trabajo desarrollado en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano se pudo establecer la relación directa entre el fracturamiento y la variabilidad de las condiciones geológicas del subsuelo. Se identificaron como elementos detonadores: la topografía con pendientes mayores a los 10° y la subsidencia asociada a la extracción del agua subterránea.

Otros elementos antropogénicos que aceleran este proceso se asocian a la ruptura de las tuberías de agua que en esta zona son en su mayoría rígidas.

Esta zona es susceptible a la erosión debido a la ruptura de las tuberías ya que gran parte del agua se infiltra de manera directa sobre los materiales volcánicos (depósitos de caída, flujos piroclásticos) los cuales están pobremente cementados, lo que provoca hundimientos asociados al colapso y/o socavamientos puntuales en la zona.

En la zona de estudio se identificaron varios sistemas de fracturamiento asociados a las condiciones de emplazamiento de los depósitos volcánicos. Las diferentes emisiones volcánicas (explosivas y efusivas) provenientes de la sierra de Santa Catarina dieron origen a una variedad de formas del relieve que pueden sobreponerse, generando rasgos estructurales característicos que localizan la deformación de los materiales granulares que lo sobreyacen. Tal es el caso de las zonas de la Calle Insurgentes localizada entre Braulio Maldonado y Arroyo Frío, Calle Luna entre Palmillas y José López Portillo y la Cerrada de Jesús Araujo esquina Benito Juárez. Cabe remarcar que estas zonas son las que presentan los mayores problemas con el equipamiento y la infraestructura urbana.

Otra condición importante de la zona de estudio es que corresponde a una zona de contacto entre los materiales volcánicos del Yuhualixqui y materiales fluviales y lacustres, como es el caso de la 3ª. Cerrada de fresnos entre Cedros y Encinos y la Avenida Palmas entre Braulio Maldonado y Jesús Garibay.

Para el desarrollo de este trabajo se llevo a cabo una combinación de métodos geofísicos con diferentes grados de penetración y resolución, que combinados con las técnicas más avanzadas de percepción remota InSAR permitieron la identificación y delimitación confiables de las zonas afectadas por fracturamiento y las zonas de potencial afectación.



Recomendaciones para la atención de infraestructura urbana y viviendas afectadas por los fenómenos de fracturamiento y hundimiento.

De manera complementaria a la caracterización del fracturamiento y hundimiento que afecta tanto a la zona de estudio como a muchas otras zonas del Distrito Federal se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales que permitirán crear una cultura de prevención y mitigación de estos fenómenos a mediano y largo plazo:

- Realizar estudios de detalles geológicos, geofísicos e hidrogeológicos con el fin de diseñar las medidas de mitigación adecuadas a las condiciones específicas de zonas vulnerables. Una mitigación efectiva y la prevención del riesgo asociado requiere el conocimiento de los factores que originan las fracturas y su evolución. Se debe dar especial atención al análisis de los efectos que puede tener un evento natural extraordinario, como lluvia torrencial o evento sísmico, en sitios particularmente.
- Destinar los sitios de alto riesgo como áreas verdes con espacios utilizados para monitoreo de los movimientos del subsuelo. De esta forma se obtendrá información para crear modelos de deformación que ayudaran a evaluar la vulnerabilidad física del sitio.
- Diseñar estrategias para enfrentar la problemática existente en las zonas vulnerables al fracturamiento que deben formar parte fundamental de los planes de Desarrollo Urbano
- Llevar a cabo la valoración y monitoreo estructural de la infraestructura civil afectada para conocer la evolución de los daños y sugerir las acciones a ejecutar.
- Llevar a cabo una valoración de vivienda en riesgo para decidir la medida de mitigación adecuada o la reubicación de las familias afectadas por este tipo riesgo geológico.
- Promover la sustitución de redes hidráulicas con materiales flexibles de alta resistencia (PEAD: Polietileno de Alta Densidad) en las zonas de alta concentración de fracturamiento y de mayor deformación diferencial del subsuelo, con el fin de evitar que se conviertan en un factor que acelere los colapsos (socavamientos) en el terreno.
- Promover la utilización de técnicas de mejoramiento del suelo y relleno de fracturas en vialidades en zonas afectadas y en áreas comunes de unidades habitacionales o equipamientos colectivos afectados. Es importante remarcar que el relleno de fracturas debe ser diseñado específicamente para las condiciones de la zona afectada, el relleno debe presentar las mismas propiedades físicas de los



materiales naturales del subsuelo para evitar que un contraste de comportamiento mecánico propicie la propagación del fracturamiento.

- Implementar medidas urbanas para restringir el paso a vehículos pesados en zonas donde la concentración del fracturamiento sea muy alta o que se tengan materiales susceptibles al colapso, como depósitos volcánicos de caída. Estas medidas de prevención también deben formar parte de los planes de Desarrollo Urbano.
- Crear una cultura de prevención en zonas vulnerables y de convivencia con los fenómenos de fracturamiento y subsidencia capacitando a la población para identificar sus riesgos, monitorear la deformación y definir las posibles medidas de mitigación.
- A la par de una cultura de prevención de zonas vulnerables, es menester la creación de la participación ciudadana mediante programas que incluyan la percepción del riesgo de la sociedad, estas aportarán a las autoridades de Protección Civil herramientas de primera mano para la elaboración de planes y programas de mitigación y mejoramiento del entorno urbano afectado por los distintos riesgos con el fin de crear una gestión integral del riesgo.

BIBLIOGRAFIA

- Cabral, C. et. al. (2011). Subsidencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 63. Num. 1. 2011. México. Pp. 53-60
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. 2da. Edición. Ed. Rialp, S.A. España. Pp. 114
- European Space Agency (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Ed. ESA Publications. Italy. Pp. A-3
- ERDAS (2010). Radar Interferometry. User's Guide. Ed. Manager, Technical Documentation. United States of America. Pp. 1
- Perez, A. et. al. (2011). Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática. Ed. OUC. España- Pp.200
- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx>