

CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA SUBSIDENCIA EN EL CUADRANTE DOS (ZONA ORIENTE) DE LA ZONA CERO, CIUDAD DE MÉXICO.

**DESCRIPCIÓN**

La subsidencia de la cuenca del valle de México es un fenómeno multifactorial, que se manifiesta como deformación del terreno y daños a la infraestructura superficial y subterránea

**ESIA-TICOMAN**

CONTENIDO	
INTRODUCCIÓN .....	2
1. MARCO DE REFERENCIA .....	3
1.1 Localización .....	3
1.2 Fisiografía .....	3
1.3 Provincias geológicas .....	4
1.4 Cuenca hidrográfica .....	4
2. MARCO TEORICO .....	5
2.1 Grietas y su origen .....	5
2.2 Subsistencia .....	5
2.3 Ingeniería antigua y sus efectos en la actualidad .....	6
3. GEOLOGÍA .....	8
3.1 Tectónica.....	8
3.2 Geomorfología.....	10
3.3 Estratigrafía .....	11
4. METODOLOGÍA.....	17
4.1 Trabajo de Geología .....	17
4.2 Plataforma de Trabajo de la Ciudad de México.....	17
4.3 Diseño y elaboración de modelos específicos .....	19
4.4 Levantamiento Geofísico.....	22
4.5 Aspectos técnicos de Topografía .....	35
Observaciones y Recomendaciones .....	43
Bibliografía .....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización del área de estudio. Peñón de los Baños (A), Pensador Mexicano (B), Moctezuma Segunda Sección (C), Santa Cruz Aviación (D), Industrial Puerto Aéreo (E), Federal (F) y Arenal Cuarta Sección (G).</i>	3
<i>Figura 2. División de las provincias y subprovincias fisiográficas, conteniendo el área de estudio.</i>	3
<i>Figura 3. División de Provincias Geológicas, conteniendo el área de estudio.</i>	4
<i>Figura 4. División de Regiones Hidrológicas, conteniendo el área de estudio.</i>	4
<i>Figura 5. Mapa del Valle de México, dibujo de Lluvia Arras. Aguilar, M. (2004).</i>	6
<i>Figura 6. Plano Tenochtitlan, en donde se observa los acueductos y la protección contra inundaciones que proporcionada del Dique de Ahuizotl (Alonso Santa Cruz)</i>	7
<i>Figura 7. Plano geológico del Peñón de los Baños. Tomado de: Becerril, G. (1887 – 1893).</i>	8
<i>Figura 8. Modelo de elevación de la Cuenca de México en la que indican con puntos rojos la ubicación y el nombre de los seis pozos: Copilco-1, Roma-1, Tulyehualco-1, Mixhuca-1, Texcoco-1 y San Lorenzo Tezonco (SLT). Se muestran algunas de las principales estructuras geológicas en la cuenca del valle de México; (1) Pilar (horst) de Chichinautzin (Siebe et al., 2004b), (2) Sistemas de Fallas de Xochimilco y Xicolumco (García-Palomo et al., 2008), (3) Sistema de Fallas de la Pera, (4) Graben de Santa Catarina (Arce et al., 2013<sup>a</sup>), (5) Falla Mixhuca (Pérez-Cruz, 1988), (6) Sistema de Fallas Tenango (Norini et al., 2006), (7) Falla Contreras, (8) Sistema de Fallas de Ixtlahuaca y Otomí (García-Palomo et al., 2008), (9) Segmento sur del Sistema de Fallas Apan-Tláloc, (19) Falla Texcoco y (11) Sistema de Fallas Tizayuca. (Moran-Zenteno, et al., 2005).</i>	9
<i>Figura 9. Correlación Estratigráfica de la Cuenca de México, Vázquez y Palomera, 1989.</i>	15
<i>Figura 10. Levantamiento geológico</i>	17
<i>Figura 11. Generación de la Plataforma SIG</i>	17
<i>Figura 12. Mapa de Geología en donde la presencia de depósitos lacustres y andesitas basálticas pertenecientes al peñón de los baños.</i>	18
<i>Figura 13. Mapa de la Distribución del Suelo, en donde se observa con una tonalidad café los suelos feozem y en verde los suelos solonchak.</i>	18
<i>Figura 14. Representación gráfica de las zonas afectadas por grietas.</i>	19
<i>Figura 15. Representación gráfica de las zonas afectadas por grietas.</i>	19
<i>Figura 16. Mapa de densidad de grietas.</i>	20
<i>Figura 17. Infraestructura dañada por los sismos del 19 de septiembre de 1985.</i>	20
<i>Figura 18 Infraestructura dañada por los sismos del 19 de septiembre del 2017.</i>	21
<i>Figura 19 Mapa de alertamiento por riesgo de grietas</i>	21
<i>Figura 20 Líneas del levantamiento Geofísico por Georadar</i>	24
<i>Figura 21. Líneas del levantamiento Geofísico por Geoeléctrica</i>	28
<i>Figura 22 Perfil 1</i>	34

<i>Figura 23 Perfil 2</i>	34
<i>Figura 24 Distribución de lineamientos</i>	34
<i>Figura 25. Lineamientos inferidos a partir de la gravimetría</i>	35
<i>Figura 26. Río Consulado (Placa Peñón de los Baños) a Avenida 8 (Fray Servando Teresa de Mier).</i>	35
<i>Figura 27. Eje 2 Nte. Transversal continua canal del norte De Río Consulado (Peñón de los Baños) a paseo de la reforma.</i>	35
<i>Figura 28. Peñón de los Baños – Av. Texcoco</i>	36
<i>Morelos – Colones – Av. Texcoco – Tahel – Ruiz Cortinez – Av. 602 – Av. Texcoco</i>	
<i>Tabla 1. Líneas trabajadas con georadar en el Peñón de los Baños</i>	24

## INTRODUCCIÓN

La Gran Metrópolis de la Ciudad de México se ha transformado a través de los años en una de las zonas con mayor número de pobladores, debido a que su crecimiento ha sido exponencial, según datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO) la ciudad de México cuenta con 8,811,266 habitantes para el 2017, colocándolo en el segundo lugar más poblado de la República Mexicana.

Décadas atrás han sido reportados una variedad de daños a infraestructura causados por fenómenos geológicos, específicamente subsidencia, debido a que con el transcurso del tiempo estas se han manifestado en mayor o menor magnitud en algunas áreas de la ciudad, causando daños a la infraestructura urbana y convirtiéndola en una zona vulnerable.

A partir de información previa sobre la composición geológica del subsuelo, se ha determinado, que los principales factores de la subsidencia son el tipo de material presente, su heterogeneidad, la sobreexplotación de los acuíferos y el cambio de uso de suelo entre los principales.

El presente trabajo brinda un panorama sobre la situación geológica de las colonias Peñón de los Baños, Pensador Mexicano, Moctezuma 2da sección, Santa Cruz Aviación, Industrial Puerto Aéreo, Federal y Arenal 4ta sección, brindando información sobre las zonas de mayor afectación por dichos fenómenos que han ido evolucionando con el paso del tiempo.

## 1. MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 Localización

La zona de estudio se ubica en la porción oriente de la Ciudad de México, en la delegación Venustiano Carranza dentro de las coordenadas latitud  $19^{\circ}26'21.20''$  y longitud  $99^{\circ}4'55.78''$ , con un área de  $5.332387 \text{ km}^2$  (Figura 1).

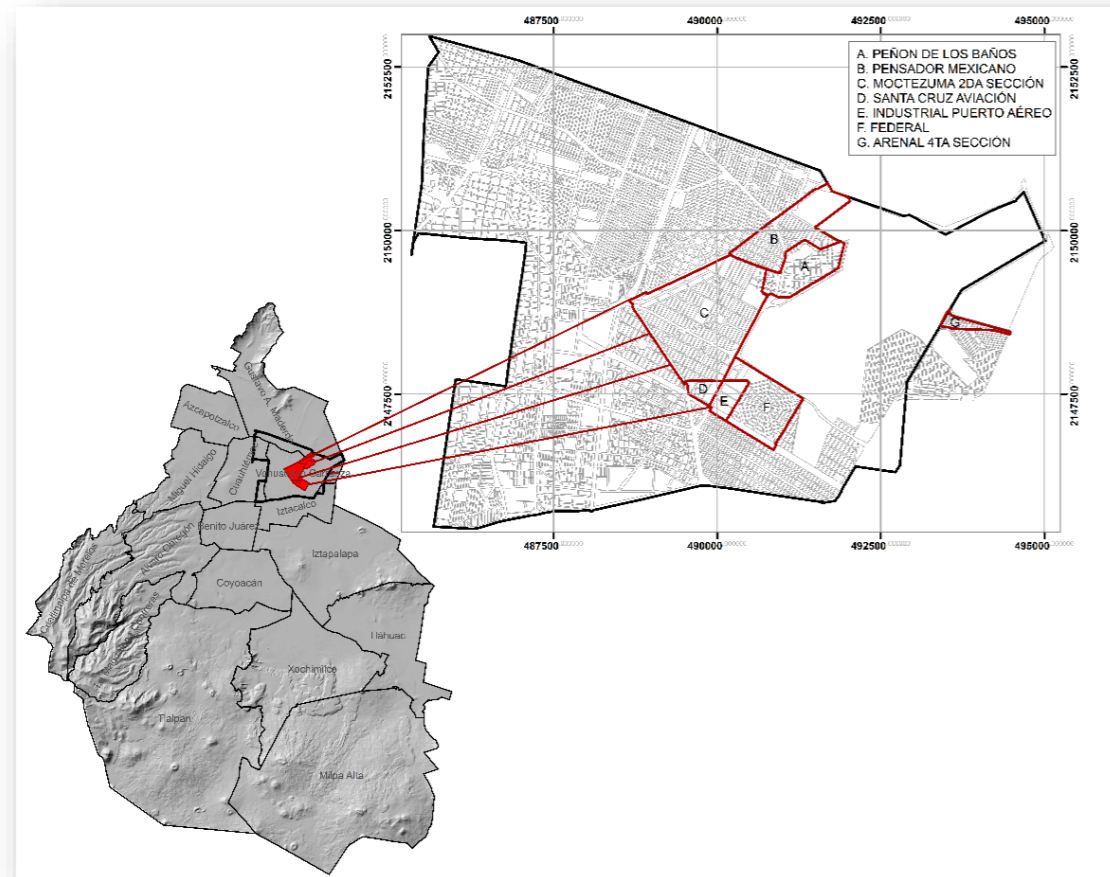


Figura 1. Localización del área de estudio. Peñón de los Baños (A), Pensadores Mexicanos (B), Moctezuma Segunda Sección (C), Santa Cruz Aviación (D), Industrial Puerto Aéreo (E), Federal (F) y Arenal Cuarta Sección (G).

### 1.2 Fisiografía

La zona se localiza en la provincia fisiográfica No. X que pertenece al Eje Neovolcánico, que se extiende de manera transversal del Océano Pacífico al Golfo de México con una longitud aproximada de 800 km, así mismo, corresponde a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac (Figura 2).

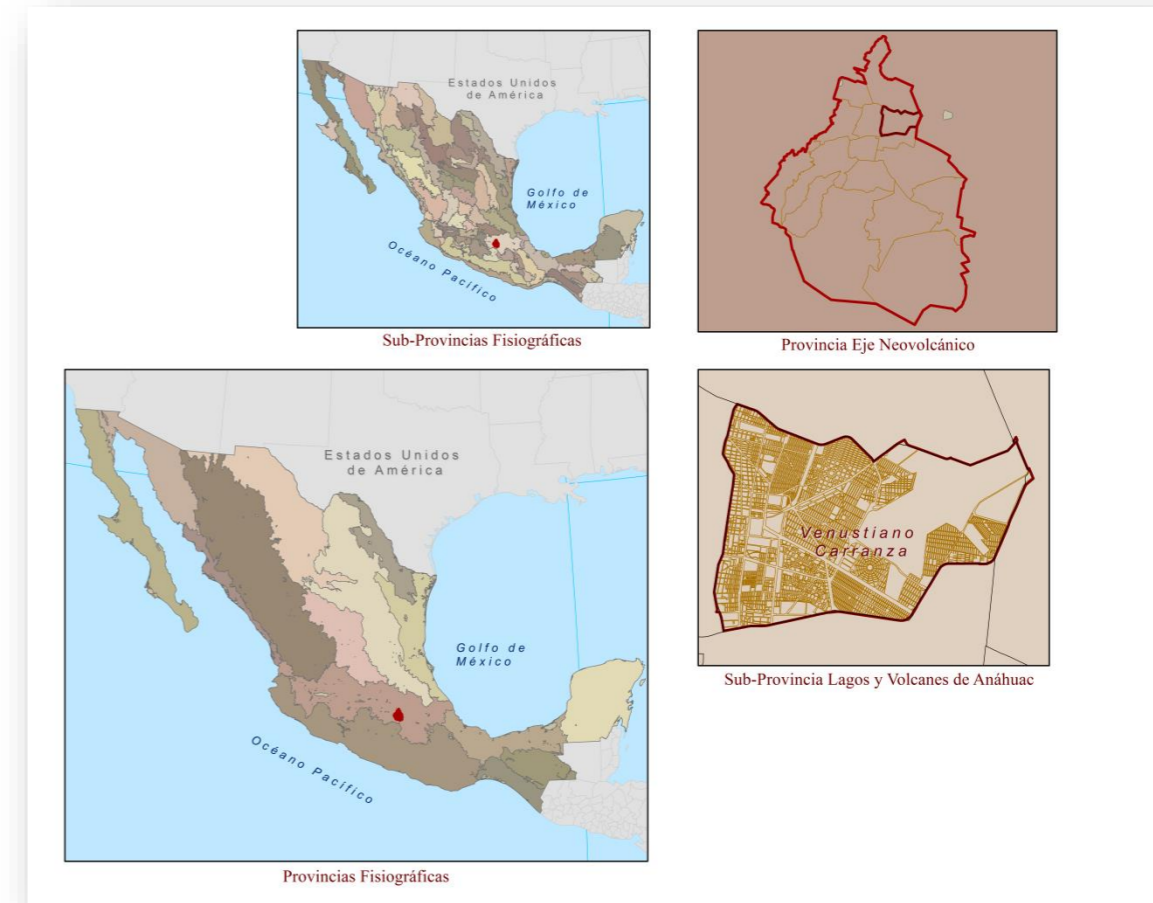


Figura 2. División de las provincias y subprovincias fisiográficas, conteniendo el área de estudio.

### 1.3 Provincias geológicas

La provincia geológica de la Faja Volcanica Transmexicana se distribuye E-W en su parte central y oriental y WNW-ESE en su parte occidental, teniendo una longitud aproximada de 1000 km y una amplitud irregular que va de los 80 a los 230 km (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), y se distribuye en los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Colima, Nayarit, y la Ciudad de México (Figura 4).

El peñón de los baños, antiguamente llamado "Tepetzingo (en el cerrito)", es un cerro de origen volcánico situado en el centro de la cuenca de México, al suroeste de Texcoco. En su flanco sur a la base se tiene documentada actividad termal a manera de manantiales de aguas sulfurosas.

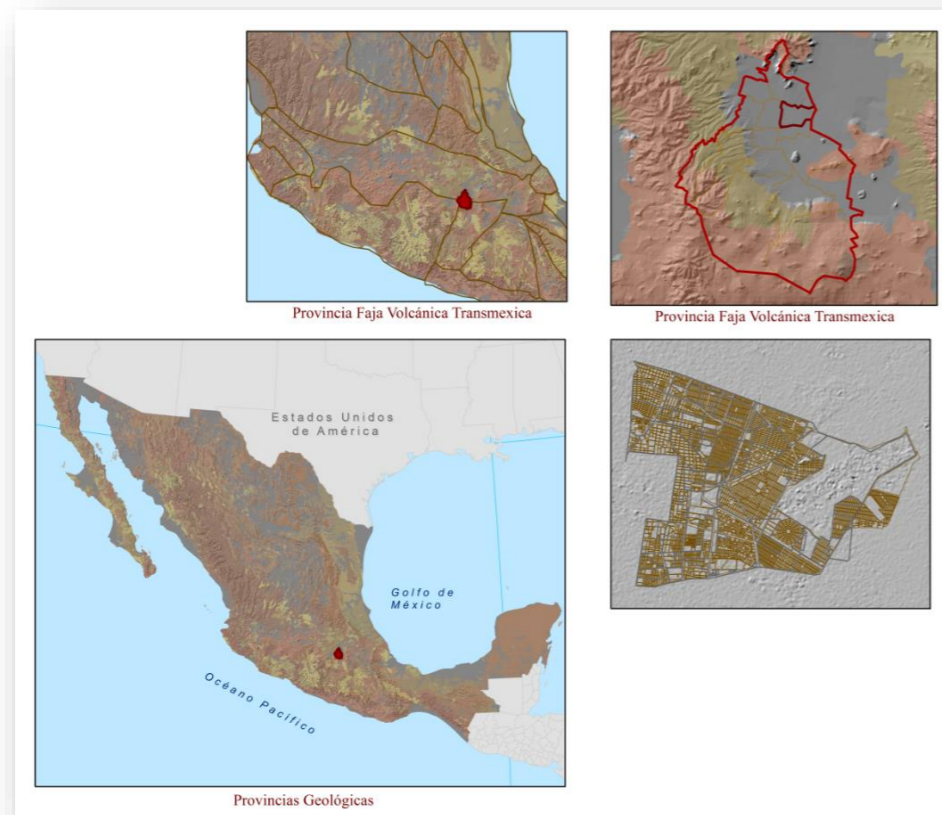


Figura 3. División de Provincias Geológicas, conteniendo el área de estudió.

### 1.4 Cuenca hidrográfica

La zona de estudio forma parte de la Región Hidrológica Administrativa No. XIII que esta comprendía dentro de la Región Hidrológica Panuco que cuenta con 13 cuencas hidrologicas.

Con una superficie de 214,748.3647 hectáreas; la cuenca en cuestión es de tipo exorreica con drenaje detrítico subparalelo, conformado por corrientes perenes y subcolectores intermitentes de segundo y tercer orden, conformada por cuatro ríos: El Río Pánuco, Río Tamesí, Río Tamuín y el Río Moctezuma (encargado de drenar la región del Pánuco) (INEGI, 2001), así mismo, pertenece a la subcuenca Pachuca - Ciudad de México (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2005), (Figura 4).

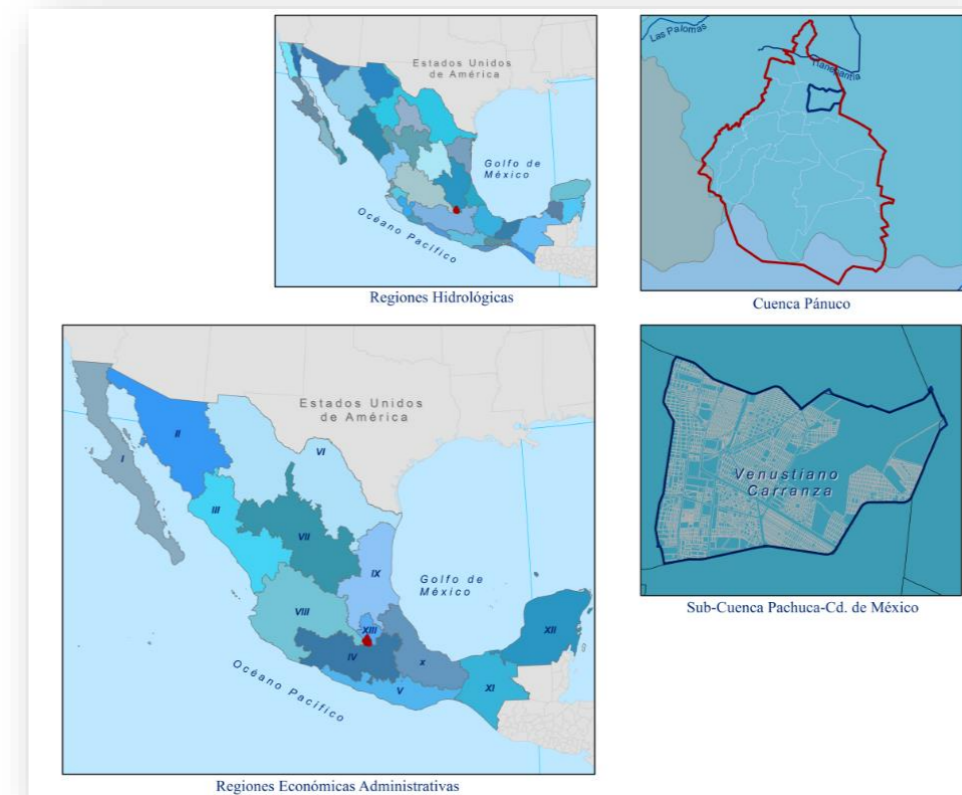


Figura 4. División de Regiones Hidrológicas, conteniendo el área de estudio.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 Grietas y su origen

La subsidencia de la planicie lacustre tiene su origen en la explotación de acuíferos para el abasto de agua principalmente (Carreón, D. et al. 2017). La alteración del equilibrio en las presiones del agua subterránea da paso a la formación de grietas en el valle (Anónimo, 1954).

Con la extracción de agua, se presenta un abatimiento del nivel freático, que se refleja en la disminución del contenido de agua de las arcillas que formaban el antiguo lecho de los lagos. Al perder su contenido de agua, las arcillas y los sedimentos se compactan, dando como resultado una disminución del volumen del suelo. Existen tres procesos básicos en la formación de grietas; En el primer modo es la tensión, se tiende a generar fuerzas en direcciones verticalmente contrarias, separándose súbitamente dando como resultado dos regiones. El segundo modo ocurre cuando dos porciones de un continuo se deslizan a lo largo de planos tangentes debido a esfuerzos cortantes, creando una discontinuidad. El tercer modo involucra desplazamientos perpendiculares al frente de la grieta y a los planos de corte en los que ésta se desarrolla. Como consecuencia las construcciones antiguas que habían tenido un comportamiento estable durante varios años, actualmente presentan daños estructurales. De continuar la pérdida de presión en acuíferos se tendrá un desequilibrio en la presión de poro de todo el sedimento de la cuenca, deformando los materiales de manera diferencial. Los hundimientos se acelerarán acentuando los movimientos diferenciales de la superficie generando fracturas que se propagaran progresivamente desde el subsuelo (Anónimo, 1954 & Carreón, D. et al. 2017).

Sin embargo, las rocas ígneas asociadas a los edificios volcánicos ubicados en la zona central del valle como el Peñón de los Baños (Carreón, D. et al. 2017), muestran que la mayoría de las fracturas están asociadas a patrones y geometrías que siguen su contorno. De acuerdo con Martínez, J. et al. (2011) la similitud entre los rasgos volcánicos de las

sierras y la variación en la orientación de las fracturas muestran que el desarrollo de este fenómeno en escala regional está controlado por el borde de estas estructuras. El fenómeno de agrietamiento en esta zona se encuentra asociado a la línea divisoria entre el antiguo lago (sedimentos lacustres como arcillas y limos) y el contacto con depósitos volcánicos que, para el peñón de los Baños, se presenta como una transición abrupta (CENAPRED, 2017 & Martínez, J. et al. 2011).

Dicho de otra manera, para estructuras como el Peñón de los Baños, la distribución de las curvas de nivel se encuentra asociadas a la distribución espacial de los depósitos que conforman al peñón. Este material de origen volcánico presenta un comportamiento mecánico muy distinto al de los sedimentos de tipo lacustre, encargados de rodear a la estructura del Peñón y de sobreponerse a los derrames del mismo. Una vez iniciado el proceso de compactación por diagénesis de los sedimentos lacustres y extracción de agua; las estructuras ocultas del Peñón de los Baños bajo los sedimentos comienzan a verse reflejadas en la superficie del terreno a manera de grietas en vialidades y construcciones.

### 2.2 Subsidencia

El asentamiento diferencial de la planicie lacustre en la Ciudad de México es un proceso reportado gracias a Gayol en 1925 (Carreón, D. et al. 2017); este fenómeno está relacionado a estructuras geológicas preexistentes; causando curvaturas, pendientes y agrietamientos en el terreno que se reflejan en daños a las estructuras, tales como edificios, instalaciones, carreteras, infraestructura subterránea, etc., afectando directamente a la población.

La Ciudad de México se encuentra asentada en su mayor parte, en el antiguo lago de Texcoco. Las exploraciones realizadas por diferentes instituciones revelan la existencia en el subsuelo de una formación arcillosa altamente compresible, de origen volcánico, cuyas propiedades son muy variables de un punto a otro.

En la Cuenca del Valle de México, la causa principal es el abatimiento del nivel freático por la extracción de agua. La necesidad de abastecimiento de agua potable nos lleva a la perforación de pozos y bombeo, agravando el problema de subsidencia. La excesiva extracción de líquido trae consigo la reducción del volumen de poro, provocando la compactación de los sedimentos y el desplazamiento de roca alrededor de las extracciones, dando a lugar al fenómeno de subsidencia en la superficie del terreno.

Los terrenos con elevaciones de 2245msnm o menor, aparecen invadidos por la formación arcillosa cuyo espesor aumenta rápidamente hacia el actual lago de Texcoco, alcanzando espesores de 30 metros. En la porción central de la ciudad; sondeos recientes en el fondo del citado lago muestran rellenos de arcilla a profundidades mayores de 150 metros, la roca basal de origen volcánico, se ha localizado a un promedio de 1000 metros bajo la superficie (Instituto Nacional de la Investigación Científica, 1953).

Para el estudio del hundimiento es de primordial importancia el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales de la formación compresibles. El estudio de la pérdida de presión en los acuíferos ayuda a verificar la causa del hundimiento y contar con la información requerida para predecir su evolución futura, el nivel freático sigue aproximadamente las variaciones topográficas de la superficie (con excepción de la región sur-poniente), sin embargo se tiene una alteración notable en la distribución de presiones del agua particularmente hacia el poniente; en cambio, las pérdidas de presión en la parte oriental de la ciudad son nulas (Marsal & Sainz, 1952).

La causa más probable de las alteraciones puestas en evidencia por las mediciones piezométricas antes comentadas; es el bombeo exagerado de acuíferos. Actualmente la pérdida de presión en los depósitos permeables aumenta a razón de 1 Ton/m<sup>2</sup> al año aproximadamente, siendo el caudal extraído del subsuelo de 9.4 m<sup>3</sup>/s (Marsal & Sainz, 1952). Los daños que ocasiona el hundimiento en las obras de diferentes tipos asentados en el fondo del antiguo lago de Texcoco son bien conocidos. Los edificios piloteados en algunas zonas de la ciudad restringen el hundimiento en el terreno adyacente, provocando

serios daños a estructuras colindantes cimentadas superficialmente. Los sedimentos que se encuentran alrededor de Peñón de los Baños presentan propiedades singulares ya que no solo se trata de materiales volcánicos (Marsal & Mazari, 1959), si no también material lacustre lo cual provoca un asentamiento diferencial.

### 2.3 Ingeniería antigua y sus efectos en la actualidad

Los Mexicas fueron conocidos por su gran habilidad para la ingeniería hidráulica y civil; la ciudad de Tenochtitlan fue edificada sobre una plataforma artificial con forma de isla flotante, de acuerdo con López, A. (2015), "Fundada en un islote, la antigua Tenochtitlan sobrevivió en el agua gracias a la ingeniería hidráulica prehispánica". Dentro de esta cultura, Netzahualcóyotl se encargó de diseñar y mandar a construir "El Acueducto", obra que transportaba el agua dulce mediante canales (López, A. 2015) (Figura 5).

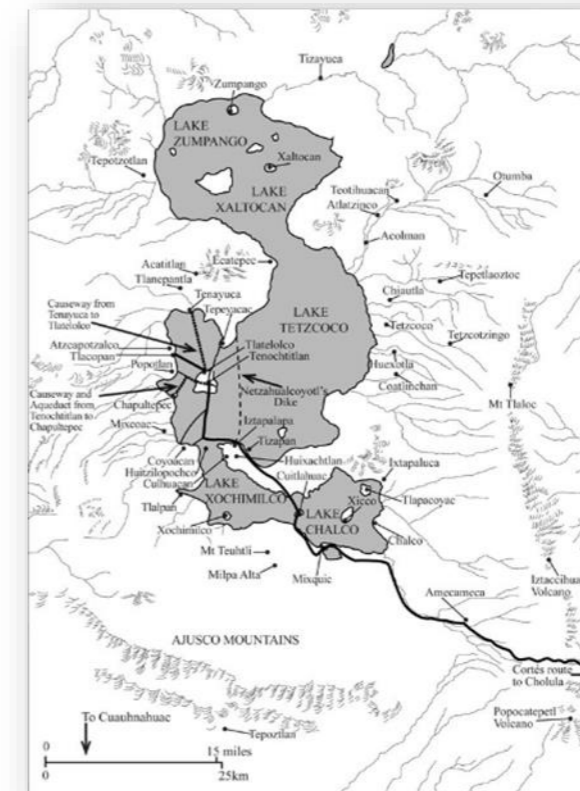


Figura 5. Mapa del Valle de México, dibujo de Lluvia Arras. Aguilar, M. (2004).

Las ciudades de Tenochtitlan y Tlatelolco fueron erigidas sobre pequeñas islas pantanosas a lo largo del Lago de Texcoco (Figura 6). Dichas islas cenagosas contaban con una escasa cantidad de agua potable, ocasionando la construcción de acueductos en la zona para transportar agua dulce sobre el lago; agua proveniente de manantiales que se encontraban en tierra firme como Chapultepec (Aguilar, M. 2004).

Al construir la gran Tenochtitlan, también se construyeron diques con funciones como control de agua para prevenir inundaciones, separación de agua dulce de la salada proveniente de los lagos de Zumpango, Xaltocan y Texcoco, y protección de sus habitantes, aunado a esto la construcción de chinampas, que les permitían realizar hasta siete cosechas al año, más que las realizadas en tierra firme donde solo se permitía una o dos por año (Aguilar, M. (2004) & López, A. (2015)).

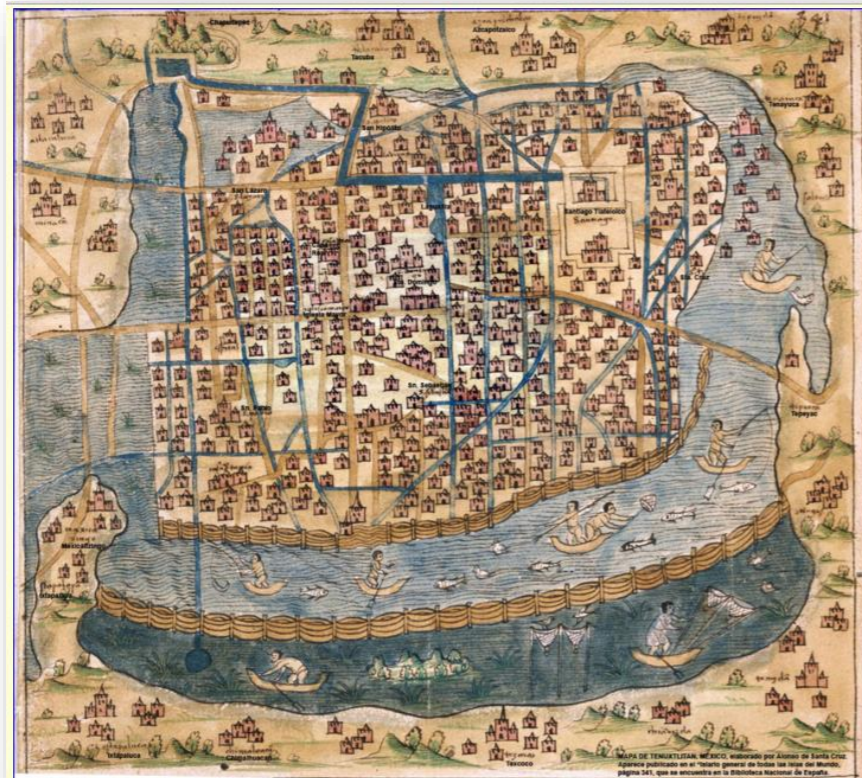


Figura 6. Plano Tenochtitlan, en donde se observa los acueductos y la protección contra inundaciones que proporcionada del Dique de Ahuizotl (Alonso Santa Cruz).

Sin embargo, la construcción de estas obras tuvo efectos en la distribución de los sedimentos debido a la alteración que implicó la división de las aguas dulces y saladas en las corrientes del lago; además de que la edificación causó cambios en las corrientes de aire repercutiendo también en la dirección de las corrientes debido a un efecto conocido como espiral de Ekman (Anónimo, 2013), efecto que permite comprender los cambios de las corrientes superficiales y sub profundas, que se ven afectadas por los cambios en la dirección de los vientos, cambiando el régimen de depósito de sedimentos en la cuenca y con ello el comportamiento mecánico que repercute actualmente para seleccionar las zonas y métodos de construcción.

En los mapas virreinales y códices prehispánicos de la cuenca de México, hacia el oriente siempre aparece un cerro, a corta distancia de México-Tenochtitlan, el cual desde el pleistoceno ha sido un punto central en la cuenca de México. El sitio solía ser lacustre rodeado por pantanos. En la época antigua, los Mexicas le dieron el nombre de Tepetzinco (en náhuatl, cerrito) pero a la llegada de los españoles, se le cambió el nombre a Peñón de los Baños; este sitio de origen volcánico era un pequeño islote situado en el centro de la cuenca de México, al suroeste del vaso de Texcoco y rodeado por las aguas del lago con dicho nombre (Gobierno de la Ciudad de México [CDMX], 2016 & González, A. 2008).



### 3. GEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra en la Cuenca del Valle de México; en donde se observan una gran diversidad de depósitos sedimentarios de tipo lacustre, basaltos, depósitos aluviales, brecha volcánica básica, andesita y toba andesítica.

La cuenca del valle de México es una cuenca endorreica de carácter lacustre, dichos depósitos son el producto de los lagos que quedaron al final de la época glaciár. Durante el cuaternario superior se llevó a cabo el cierre de la cuenca, dejando entonces a las aguas pluviales encajonadas y generando así un conjunto de lagos someros.

La litología se conforma por calizas del Cretácico, rocas del mioceno tales como derrames volcánicos intercalados, tobas, tobas andesíticas, brecha volcánica, arcilla, conglomerados, tobas arenosas depósito aluviales y arcillas lacustres.

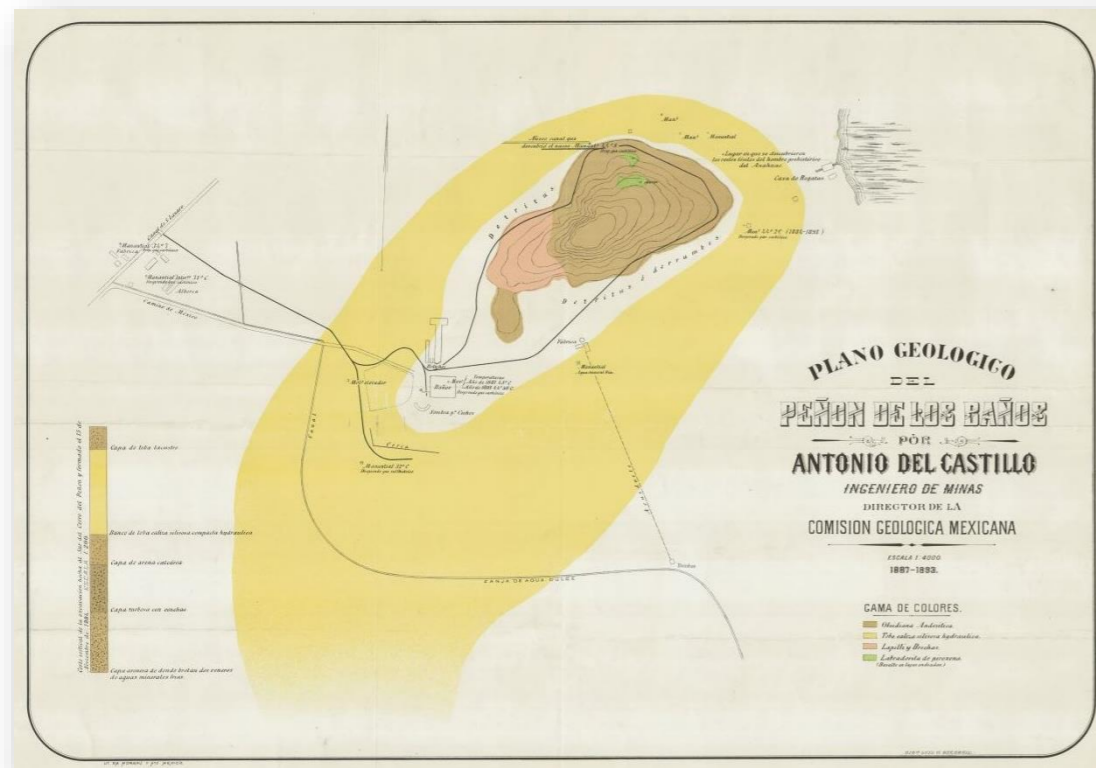


Figura 7. Plano geológico del Peñón de los Baños. Tomado de: Becerril, G. (1887 – 1893).

#### 3.1 Tectónica

La faja volcánica transmexicana está dividida con base en sus características estructurales, geológicas y geomorfológicas en tres principales sectores: occidental, centro y oriental. “El occidental presenta un sistema de grabenes con orientación NW-SE; el sector centro corresponde a un conjunto de bloques fallados y basculados con orientación SSW-NNE; Y en el sector oriental consiste en un sistema de fallas que cuenta con una orientación N-S” (Pasquaré et al., 1987, p.159).

La cuenca del valle de México está ubicada de manera regional dentro de la provincia fisiográfica de la faja volcánica transmexicana (FVTM) y debe parte de sus características a los procesos volcánicos y tectónicos asociados a la formación de esta provincia, y a un proceso orogénico (Cretácico) anterior conocido como orogenia laramídica (Fries, 1960; Fries 1962), al cual se han asociado los diferentes rasgos estructurales con orientación preferencial NW-SE. Las características estructurales posteriores, es decir, de edad terciaria que corresponden a la formación de la FVTM son debidas a un cambio en el ángulo de subducción de la placa de Cocos, dicho cambio generó esfuerzos distensivos perpendiculares a la FVTM (Ferrari, 2011) en la zona central de la república mexicana, de tal manera, que se presentan fallas con orientación W-E cortando fallas antiguas con orientación NW-SE y NE-SW (Siebe et al., 2004).

Siguiendo estos tres sistemas preferenciales de fallas que consisten en zonas de debilidad de la corteza terrestre se han emplazado las diferentes sierras volcánicas que delimitan la cuenca del valle de México. Algunas de las características de las sierras de origen volcánico que delimitan a la cuenca, son las siguientes: la Sierra de las Cruces (al occidente de la ciudad) se encuentra dividida en tres bloques, separados al norte del bloque central por las fallas Ixtlahuaca y otomí con orientación W-E (García-Palomo et al., 2008); sus edades varían entre 3.7 y 0.7 Ma (Moran-zenteno et al., 2015), presentando la edad más antigua de las sierras que rodean la cuenca del valle de México. En la sierra volcánica Chichinautzin (al sur de la ciudad), las estructuras presentan una orientación W-E y corresponden a un

pilar tectónico (Siebe et al., 2004), delimitado al norte por el sistema de fallas normales xochimilco y xicomulco (García-Palomo et al., 2008), las edades más antiguas van de entre 1.2 y 0.9 Ma en su porción oeste y sur, y presentan edades menores de 0.04 Ma en su mayor parte (Moran-Zenteno et al., 2015). La Sierra Nevada (límite oriental) presenta una orientación preferencial N-S característica asociada al bloque oriental (Pasquaré et al., 1987, p.159).

Al interior de la cuenca se han reportado algunas otras estructuras relacionadas a los eventos geológicos que caracterizan esta provincia, entre ellas la falla Mixhuca con orientación NW-SE cuyo bloque caído se encuentra hacia el occidente (Moran-zenteno et al., 2015) además del sistema de fallas Tenochtitlan que presenta una orientación NE-SW de acuerdo con Arce et al., 2013, está ligado el graben de santa Catarina (Figura 8).

Para el caso de la zona de estudio, el peñón de los baños corresponde a un volcán monogenético ubicado en el bloque de piso que delimita la falla Mixhuca, de acuerdo con las estructuras presentes en la zona, la formación del volcán podría estar asociada a la zona de debilidad formada por el sistema de fallas Tenochtitlan.

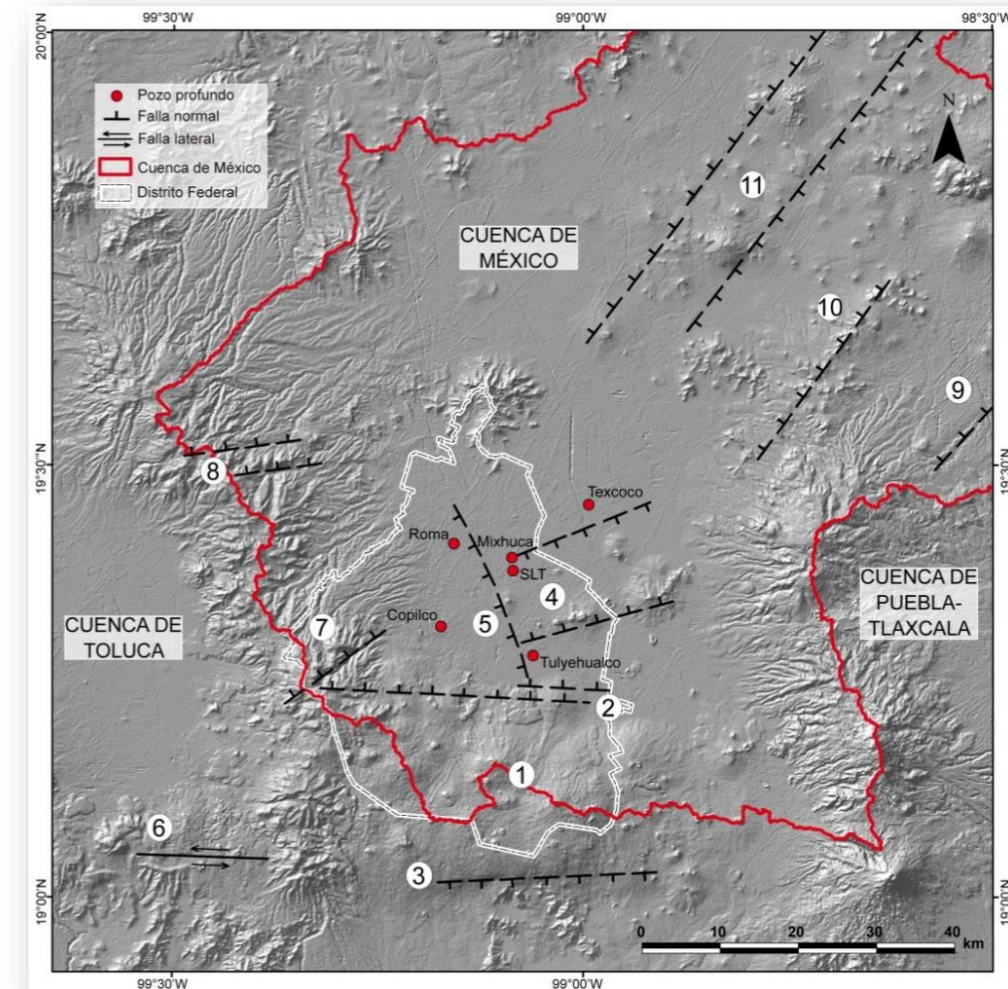


Figura 8. Modelo de elevación de la Cuenca de México en la que indican con puntos rojos la ubicación y el nombre de los seis pozos: Copilco-1, Roma-1, Tulyehualco-1, Mixhuca-1, Texcoco-1 y San Lorenzo Tezonco (SLT). Se muestran algunas de las principales estructuras geológicas en la cuenca del valle de México; (1) Pilar (horst) de Chichinautzin (Siebe et al., 2004b), (2) Sistemas de Fallas de Xochimilco y Xicomulco (García-Palomo et al., 2008), (3) Sistema de Fallas de la Pera, (4) Graben de Santa Catarina (Arce et al., 2013<sup>a</sup>), (5) Falla Mixhuca (Pérez-Cruz, 1988), (6) Sistema de Fallas Tenango (Norini et al., 2006), (7) Falla Contreras, (8) Sistema de Fallas de Ixtlahuaca y Otomí (García-Palomo et al., 2008), (9) Segmento sur del Sistema de Fallas Apan-Tláloc, (10) Falla Texcoco y (11) Sistema de Fallas Tizayuca. (Moran-Zenteno, et al., 2005).

### 3.2 Geomorfología

El Valle de México es la porción de tierra comprendida entre múltiples cuerpos montañosos, dentro de la Sierra Nevada (localizada al SW) destacan volcanes como: Popocatepetl (5430 msnm) e Iztaccíhuatl (5286 msnm); la Sierra del Chichinautzin representa el límite S de la cuenca, uniéndose al SW con la Sierra de Zempoala. Los límites NW están representados por la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo; estos mismos límites son definidos por las sierras de Tepetzotlán-Tezontlalpan y finalmente Pachuca, Chiconautla y Tepozán definen los límites N y NE (Moreno, C., 1992, Gutiérrez, M. et al., 2005).

Esta cuenca tuvo su génesis con el bloqueo del Antiguo Valle en su porción sur gracias a la actividad volcánica, formando la Sierra del Chichinautzin. Para Gutiérrez, M. et al. (2005) este conjunto montañoso interrumpió el drenaje existente, la acumulación de materiales volcanoclásticos trajeron como consecuencia la formación de una represa natural; estas nuevas condiciones permitieron la formación de lagos y el azolvamiento paulatino del terreno. Debido a que las aguas fluyen cuesta abajo, las corrientes tienden a arrastrar materiales de las partes altas y transportarlos a zonas más bajas, donde los sedimentos rellenan las depresiones, en la cuenca del valle los detritos acarreados de origen fluvial, volcánico y lacustre fungieron la función de "relleno", por debajo de los detritos quedó una topografía irregular, razón por la cual se tienen variaciones en la potencia (espesores) de los azolvamientos (Gutiérrez, M. et al. 2005, Heller, R. & Sola, O. 1967).

Las etapas Vulcano acumulativas del valle se asocian con la actividad volcánica y sus productos, así, las secuencias sedimentarias exógenas se ven interrumpidas por secuencias de coladas de lava, materiales de caída, flujos piroclásticos, de bloques y cenizas dando como resultado lomeríos (Gutiérrez, M. et al. 2005). La estructura volcánica más joven (menos de un millón de años) es la sierra del Chichinautzin, normalmente la meteorización y el lavado de los flancos en los valles tienden a disminuir los anteriores en este tipo de estructuras ensanchando el valle; sin embargo, en el Chichinautzin los procesos de

intemperismo no han sido intensos y prolongados (Gutiérrez, M. et al. 2005, Heller, R. & Sola, O. 1967).

En el Plioceno, después de una etapa de actividad volcánica caracterizada por la emisión de lavas ácidas, dacíticas y riolíticas (localizadas principalmente en el Cerro del Chiquihuite); aparecen los derrames andesíticos de la Sierra Nevada y de las Cruces, y posterior a estos los cubren las lavas de la serie andesítica del Iztaccíhuatl y del Ajusco. Dentro de esta serie andesítica se encuentran los restos de volcanes Monogenéticos como el Peñón de los Baños, compuesto por andesitas oscuras (Marsal & Mazari, 1959).

De acuerdo con Gutiérrez, M. et al. (2005) y Heller, R. & Sola, O. (1967) los distintos depósitos sedimentarios forman rampas, mantos, abanicos aluviales y coluviales; en conjunto, todas estas formas dan origen a estructuras de piedemonte. El desarrollo del pie de monte en El Valle de México está relacionado con:

1. La acumulación de sedimentos glaciares, originados por hielo en movimiento y redepositados por ríos en altitudes menores.
2. La acumulación de sedimentos de tipo aluvial, transportados por ríos permanentes proluviales, ríos estacionales y coluviales.
3. Fragmentos de roca asociados asociados a caídas, provenientes de laderas.

El piedemonte "de mayor desarrollo se asocia a sierras que iniciaron su formación en el terciario inferior es el caso de Las Cruces y Nevada" Gutiérrez, M. et al. (2005).

Finalmente tenemos la formación de planicies por acumulación fluvial, dicha acumulación ocurre cuando el agua pierde su capacidad de transporte resultado de la disminución de velocidad en la corriente o la carga excesiva de material sedimentario (Moreno, C., 1992). Las planicies proluviales-lacustres se caracterizan por una pendiente no mayor a 5 grados de inclinación, constituidas por materiales proluviales transportados por ríos y acarreados principalmente desde el piedemonte; estos materiales son depositados en cuerpos de agua y llanuras de inundación temporal. A medida que los depósitos pluviales son vertidos en las zonas inundadas, estas comienzan a rellenarse convirtiéndose en porciones de tierra con

humedad constante y en algunos casos a la formación de ambientes cenagosos. La expresión morfológica de las planicies proluviales-lacustres en la Cuenca de México es muy sutil en la actualidad estas características han sido modificadas (Gutiérrez, M. et al. 2005). Planicie lacustre se encuentra en las altitudes menores de la Cuenca, se trata de una superficie casi horizontal con pendiente menor a 4 grados de inclinación, cuenta con una altitud promedio de 2240 msnm; la edad de la planicie se calcula en menos de 700 000 años (Mooser, 1975) su origen se explica a partir de un continuo relleno con material de la Sierra volcánica Chichinautzin, que al intemperizar genera arcilla altamente compresible. Las nuevas características hidrológicas favorecieron la formación de los siguientes cuerpos lacustres: Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal-Texcoco y Xochimilco-Chalco (Gutiérrez, M. et al. 2005).

### 3.3 Estratigrafía

En el trabajo realizado por Unda Lopez (2016) acerca la Cuenca del Valle de México, encontramos la correlación de varios pozos perforados durante el año 1988 por PEMEX, en esta correlación se incluye el pozo Mixhuca-1, el cual por su cercanía con Peñon de los baños es el que mayor información estratigráfica pudo aportar en este trabajo.

El pozo Mixhuca-1 cuenta con una profundidad total de 2,452 m parte inferior está constituida por una unidad de mudstone con fracturas delgadas rellenas por bentonita, piritita, calcita, mudstone arcilloso con abundantes fracturas verticales y horizontales, y por caliza wackstone con fragmentos de moluscos y placas de equinodermos. (Unda Lopez , 2016).

La parte media del pozo Mixhuca presenta unidades de toba en color gris claro, verde esmeralda, basalto café rojizo, basalto de color café y gris oscuro compactadas, algunas trazas de toba arenosa gris claro, toba gris verdoso claro, suave y plástica de aspecto arenoso, algunas Intercalaciones de basalto y toba.

Por último, en la parte superior se identificó brecha volcánica con fragmentos de basalto gris, intercalaciones de tobas y conglomerados volcánicos con fragmentos de basalto gris oscuro, intercalaciones de tobas, basaltos y arcillas de color café claro suave, tobas y conglomerados volcánicos.

Dicho contenido litológico fue asociado estratigráficamente a las Formaciones:

Morelos. (Fries, 1960)

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Mesozoico

SISTEMA: Cretacico

SERIE: Cretacico Temprano

PISO: Albiano-Cenomaniano

La Formación Morelos fue descrita por Fries en 1960 y la describe como una sucesión sedimentaria con estratificación de caliza y dolomía con nódulos granos y fragmentos de pedernal, con la presencia de fósiles silicificados, presentando también anhidrita laminada en cierto grado la cual varía de blanco a gris oscuro, en la parte basal comprende capas de caliza, calcarenita pero puede varias de calcilitita a calcirudita con una estratificación mediana a gruesa. La Formación Morelos fue datada con edad del Cretácico Temprano, aunque varía dependiendo de varios autores, pues se muestra en algunas zonas como Albiano medio-Turoniano temprano, utilizando fósiles tales como de foraminíferos bentónicos para datar esta Formación. Paleontológicamente y de acuerdo con (SGM, 2008) se encontraron fósiles como equinoideos, esponjas, corales, gasterópodos, ostras, biostromas de rudistas así mismo la Formación Morelos es correlacionable en edad a la caliza El Doctor, la Formación El Abra, Tamaulipas Superior y Taninul que también son equivalentes litológicamente.

Mexcala (Fries, 1960)

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Mesozoico

SISTEMA: Cretácico

SERIE: Cretácico Tardío

PISO: Maestritichiana

Esta unidad se ha definido como una secuencia de ambiente marino compuesta principalmente de arenisca, limolita, y lutitas calcáreas con intercalaciones de conglomerados y estratos de caliza, fue descrita por Fries en 1960. Existe también una cantidad de sedimentos carbonatados y un mayor aporte de sedimentos silicilásticos y se ha reportado con edades de Albiano Tardío en la zona de Teloloapan y edades de Maestritichiano Inferior en la zona de Temalac.

En la zona de Atenango la Formación Mexcala presenta margas de color café claro, con algunos estratos de areniscas calcáreas de grano fino, de alrededor de 30 a 50 cm de espesor. La litología cambia gradualmente a arena hacia la cima de la sección. En el área de Temalac y Mitepec.

Cuautla. (Fries, 1960)

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Mesozoico

SISTEMA: Cretacico

SERIE: Cretacico Temprano

PISO: Cenomaniano-Coniaciano

La Formación Cuautla, fue descrita por Fries en 1960 y su localidad tipo se encuentra en Cuautla, Morelos Fries la describe como tres facies principales; la primera presenta una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación mediana a gruesa de tipo banco calcáreo, la segunda facie consta de una sucesión más delgada a mediana y la tercera

facies está constituida por una sucesión muy delgada de capas de caliza clástica de estratificación delgada a mediana. Las facies pasan gradualmente de otra en sentido lateral, algunas veces se encuentran conglomerados calcáreos en su base las calizas presentan textura que va de calcilutita a calcarenita. La Formación Cuautla se le asigna una edad de Turoniano, pero menciona que en la parte donde se presenta la calcarenita basal el sugiere que podría ser de edad Cenomaniano Tardío. (SGM, 2011).

Presenta un contenido litológico de rudistas, pelecípodos, equinodermos y algunos cefalópodos como macrofauna y de microfauna presenta algunos *calciesphaerula innominata*, *Pithonella ovalis*, *Pithonella trejoi*, *Hedbergella sp.* Esta Formación puede correlacionarse con la Formación Malpaso que en la parte inferior se correlaciona cronológicamente. También es correlacionable en edad con la Formación Petlalcingo. (SGM, 2011).

Roca volcánica del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. (Fries, 1960).

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Mesozoico

SISTEMA: Cuaternario

SERIE: Oligoceno

PISO: ¿

De acuerdo con (Vázquez et., 1989), las rocas volcánicas del oligoceno tardío se diferencian en edad de las rocas extrusivas del grupo Balsas y del mioceno medio tardío. Vázquez la describe como un conjunto de rocas volcánicas donde incluye por su posición estratigráfica a la RIolita Tilzapotla del extremo sudoccidental dicha rocas afloran profundamente erosionadas y fracturadas en la sierra de xochitepec en los cerros Picacho y púlpito del diablo y se constituyen secuencias de tobas líticas cristalinas y vítreas, brechas tobaceas y aglomerados, estos depósitos piroclásticos están en la parte superior interestratificados y cubiertos por derrames lávicos, estas secuencias volcánicas contienen capas de clastos

aluviales de espesores en promedio de 6 metros lo que indica tiempo de reposo en la actividad volcánica los flujos lávicos son de grano fino a medio y algunos de ellos tienen una buena estructura fluidal y xenolitos serpentinizados, la riolita tilzapotla tiene un espesor máximo de 250 metros y está constituida principalmente por ignimbritas pero localmente se presentan derrames lávicos y brechas de flujo en el subsuelo de la Cuenca de México estas rocas volcánicas cubren localmente en forma discordante a unidades cretácicas y como se mencionó son discordantes al grupo Balsas y subyacen también cubiertas discordantemente por rocas volcánicas del mioceno medio y tardío y localmente por Formaciones del cuaternario.

Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío. (Vázquez, 1989).

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Cenozoico

SISTEMA: Cuaternario

SERIE: Mioceno Medio-Tardío

PISO: ¿

De acuerdo con el trabajo de (Vazquez et., 1989) estas rocas extrusivas son rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del oligoceno tardío, las cuales se distribuyen por toda la cuenca en áreas pequeñas y comúnmente se encuentran cubiertas por materiales volcánicos más recientes y se encuentran constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas que en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas. Las lavas volcánicas observadas son andesitas de lamprobolita o de augita, de textura principalmente porfirítica y monocristalina entre otras, hay presencia de andesina, lamprobolita, feldespatos, augita, piroxenos, anfíboles y magnetita ilmenita, fluorita, calcita, cuarzo, y apatito.

Depósitos Aluviales. (Vázquez, 1989).

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Cenozoico

SISTEMA: Cuaternario

SERIE: Plioceno

PISO: ¿

Los depósitos aluviales que describe (Vazquez et., 1989) son un acumulado de sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del cuaternario que se encuentran aflorando y formando llanuras aluviales al norte y al sur de la región con depósitos piroclásticos, en la zona norte y sur incluye material poco consolidado compuestos por fragmentos de grava, arena, limo y arcilla, con presencia de marga localmente, turba y travertino. (Vazquez et., 1989).

Depósitos Lacustres. (Vázquez, 1989).

EONOTEMA: Fanerozoico

ERATEMA: Cenozoico

SISTEMA: Cuaternario

SERIE: Pleistoceno Tardío-Holoceno

PISO: ¿

Se describe como sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del estratovolcán Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, depositados en un ambiente de tipo lacustre, los cuales formaron una altiplanicie lacustre extendida con una altitud promedio de 2200 m desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el cerro de Chapultepec de acuerdo con (Vazquez et., 1989). Los espesores de estos depósitos lacustres varían de 30 y 300 m y se describe como arcillas bentónicas y montmorilloníticas con carbonato de calcio, diatomeas y ostrácodos, además de contar con la presencia de ceniza y pómez. (Vazquez et., 1989).

En una porción de Tlapacoya, en la columna estratigráfica se muestra una secuencia piroclástica basáltica y andesítica de caída, con materia orgánica e interrelación de arena de playa, turbas, suelos y tierra diatomácea. Los materiales piroclásticos están compuestos por cenizas cristalinas y líticas. además de varios horizontes formados por lapilli angulosos pumíticos y líticos, los cuales, pueden indicar al igual que las tobas líticas reconocidas en otros lugares, eventos plinianos relacionados con las erupciones del volcán Popocatepetl. (Vazquez et., 1989).

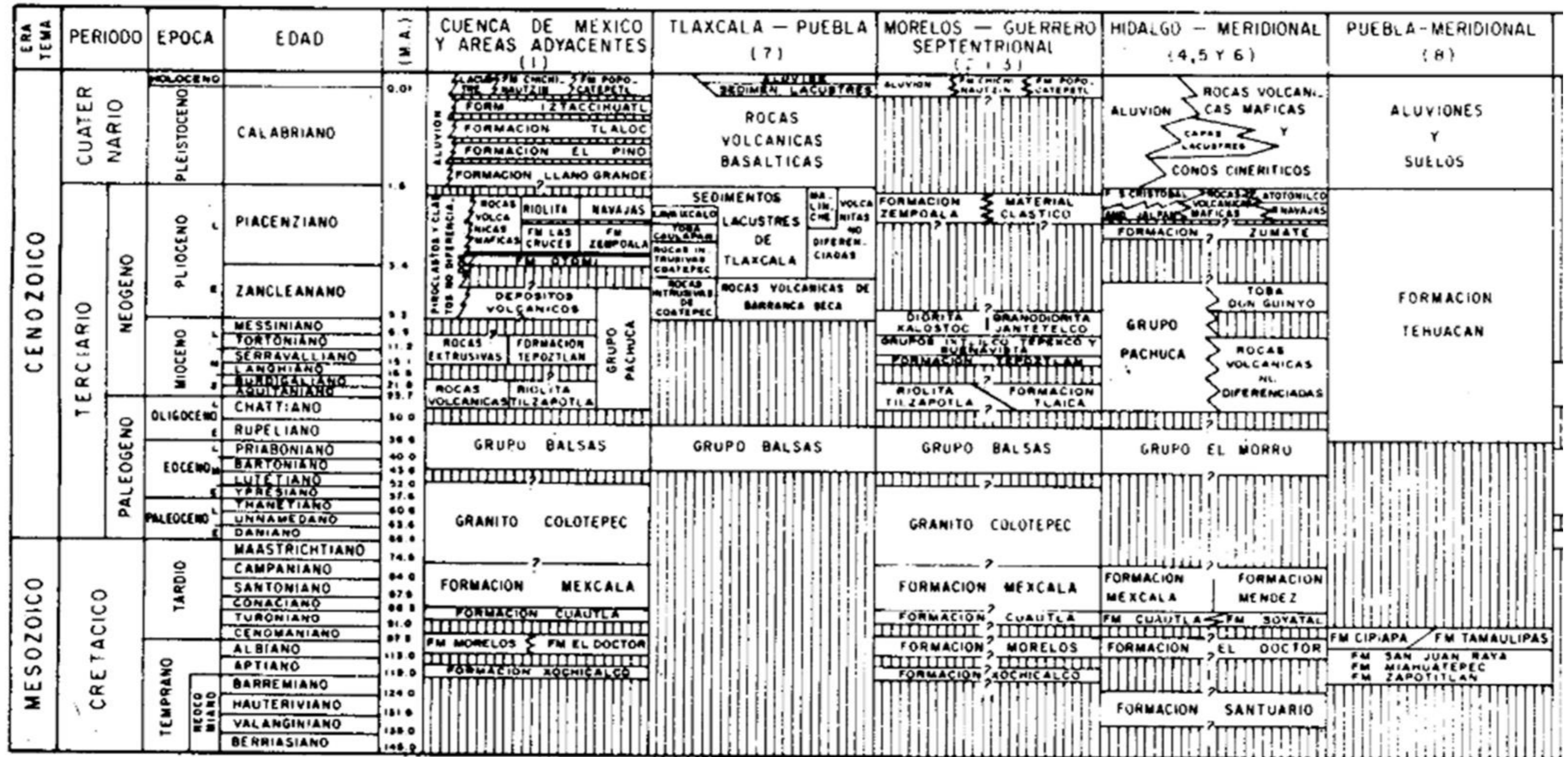
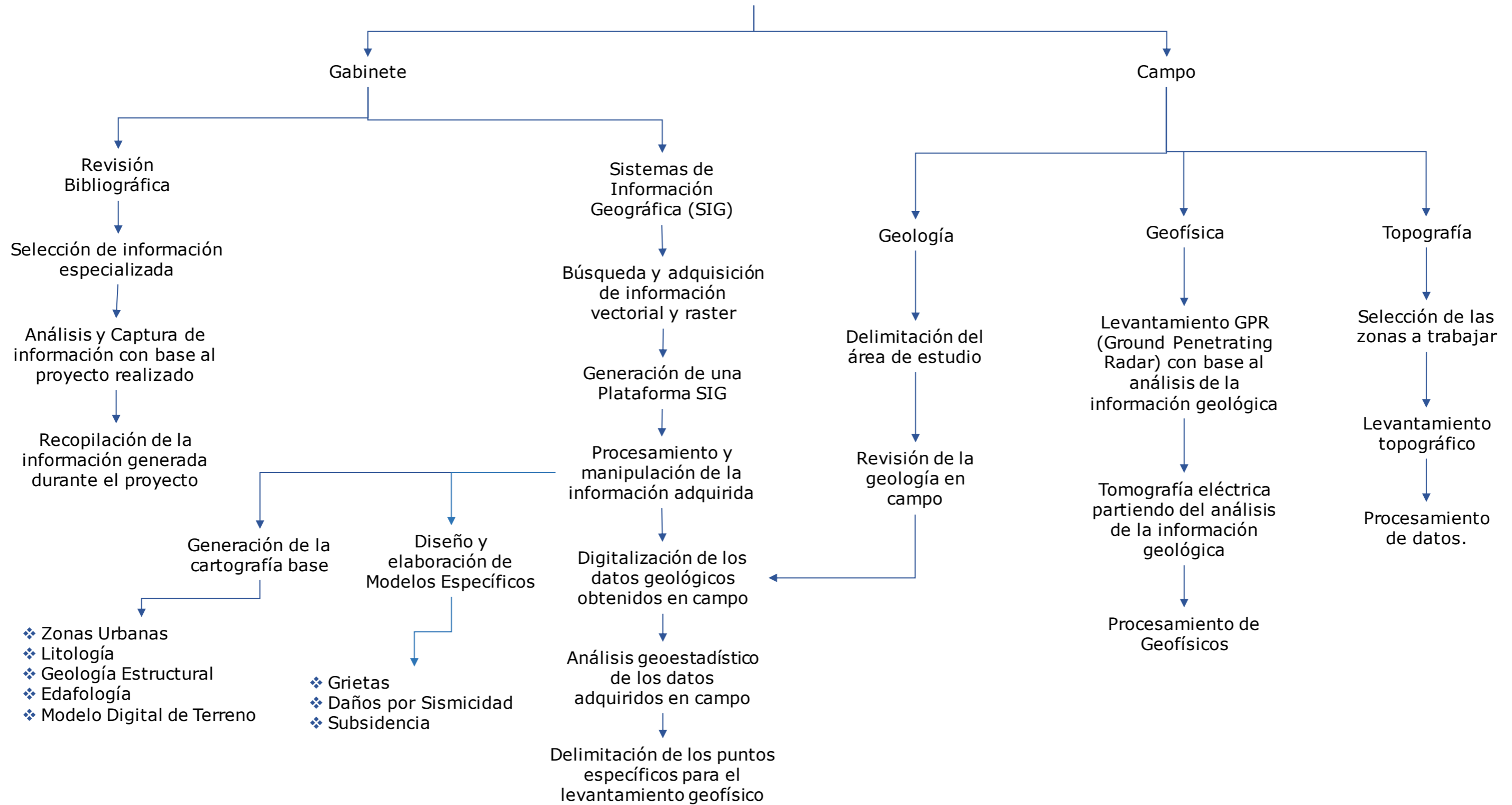


Figura 9. Correlación Estratigráfica de la Cuenca de México, Vázquez y Palomera, 1989



## Metodología



## 4. METODOLOGÍA

El presente trabajo comenzó con la búsqueda, recopilación y revisión de información bibliográfica con la finalidad de conocer aspectos técnicos sobre el área de estudio, de igual forma, se realizó la búsqueda y adquisición de información vectorizada y rasterizada de las dependencias de gobierno nacionales e internacionales como son: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional del Agua (CNA), Alaska Satellite Facility (ASF) y United States Geological Survey (USGS).

### 4.1 Trabajo de Geología

La geología de campo se ejecutó a partir de la revisión e identificación de grietas de origen geológico del área, levantando datos de lineamientos superficiales correspondientes a procesos geológicos (Figura 10).



Figura 10. Levantamiento geológico

### 4.2 Plataforma de Trabajo de la Ciudad de México

Partiendo de la adquisición de la información vectorial y raster se prosiguió a la generación de una plataforma para el procesamiento y manipulación de los datos espaciales, generando la cartografía base que delimito la zona de estudio (Figura 11).

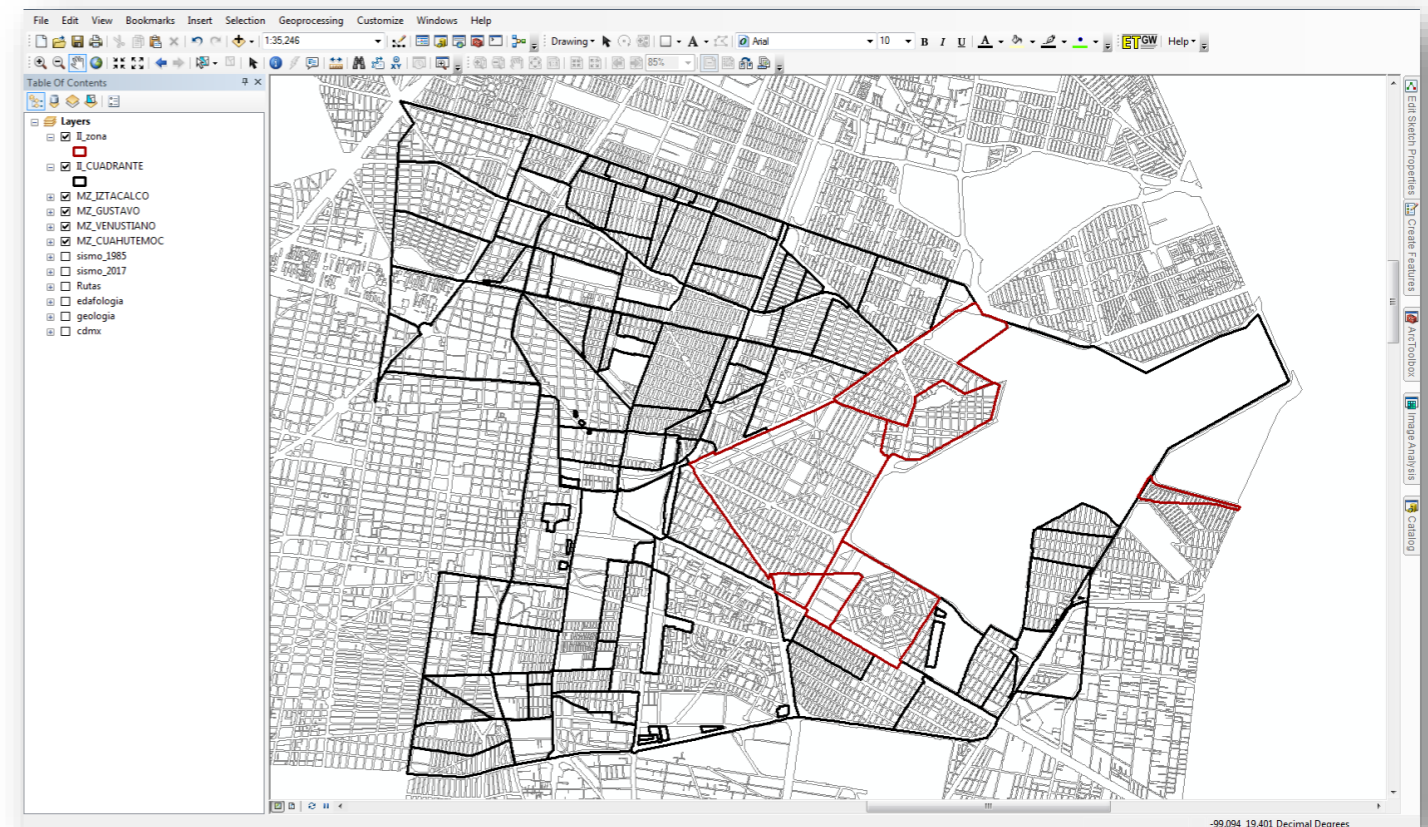


Figura 11. Generación de la Plataforma SIG

La geología de la zona se elaboró a partir del manejo los archivos vectoriales proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), generando archivos en formato \*.shp y \*.kmz, de la zona de estudio, donde se presentan dos unidades litológicas: depósitos lacustres y andesita basáltica (Figura. 12).

El mapa edafológico se obtuvo partiendo de los archivos vectoriales obtenidos de del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), generando archivos en formato \*.shp y \*.kmz, donde se presentan dos unidades edafológicas: Feozem y Solonchak (Figura. 13).

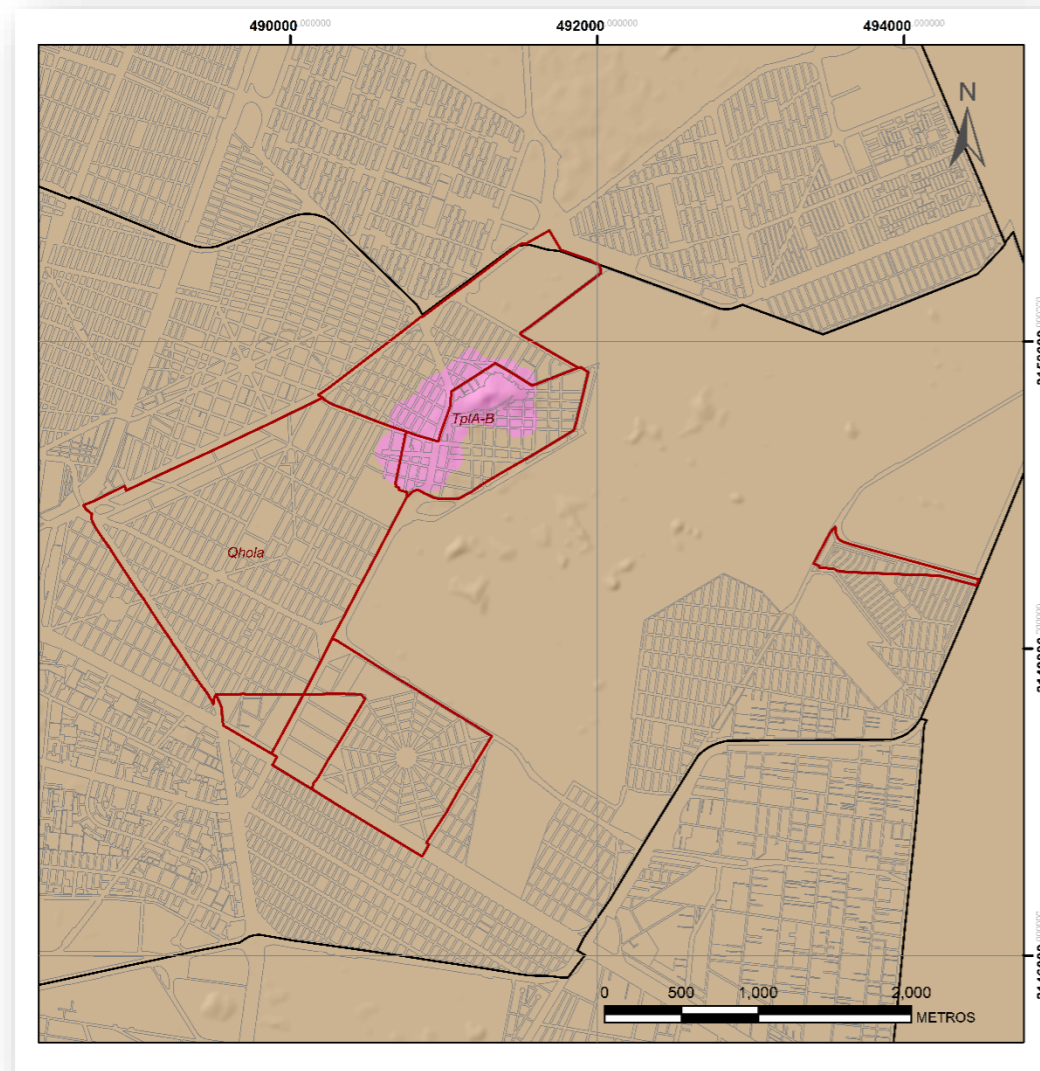


Figura 12. Mapa de Geología en donde la presencia de depósitos lacustres y andesitas basálticas pertenecientes al peñón de los baños.

Figura 13. Mapa de la Distribución del Suelo, en donde se observa con una tonalidad café los suelos feozem y en verde los suelos solonchak.

El mapa geológico estructural se creó a partir de la revisión bibliográfica y el análisis fotografías aéreas, obteniendo los lineamientos que corresponden a fallas inferidas y fracturas respectivamente (Figura 14).

Las fallas inferidas se adquirieron a partir del estudio gravimétrico que realizó Servicios Geofísicos, S. A., donde se ve una serie de lineamientos con tendencias NE-SW, así mismo, las fracturas se obtuvieron a partir de un estudio fotogeológico donde se observaron las fracturas generadas en las estribaciones del cuerpo volcánico del Peñón de los Baños, con tendencias que coinciden con la geomorfología de la estructura principal.

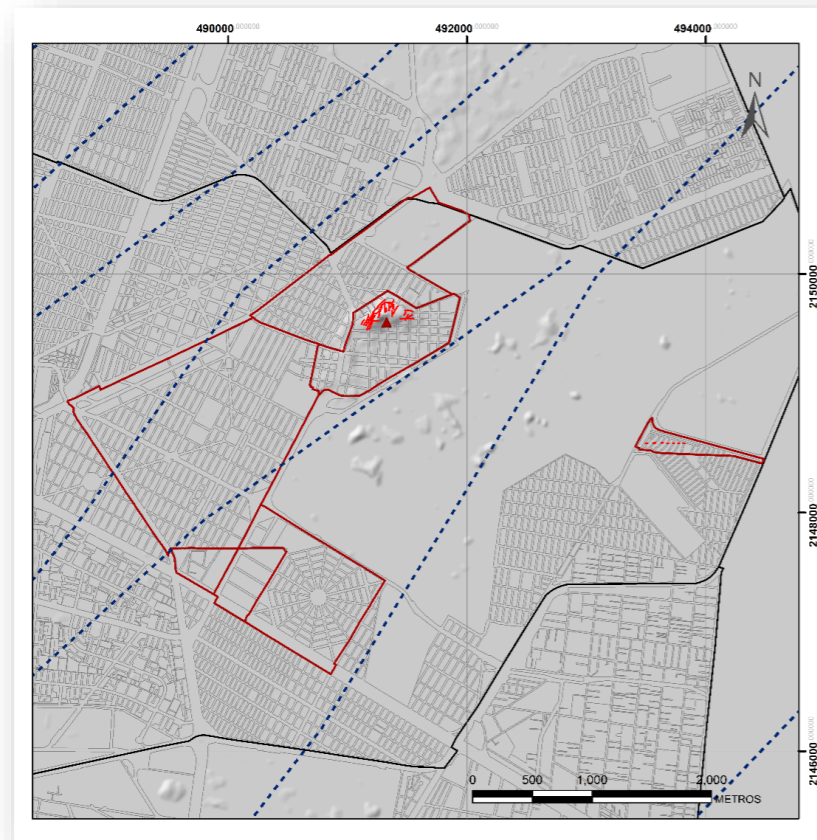


Figura 14. Mapa de grietas inferidas a partir de la gravimetría (azul) y fracturas generadas en el macizo rocoso del Peñón de los Baños (rojo).

#### 4.3 Diseño y elaboración de modelos específicos

A partir de los datos adquiridos en campo y su respectiva digitalización se generaron archivos en \*.kmz y \*.shp, en donde de manera gráfica se representa las zonas afectadas por grietas de origen geológico (Figura. 15).



Figura 15. Representación gráfica de las zonas afectadas por grietas.

La densidad de grietas se hizo a partir de la intersección del mapa de grietas y un mallado de la zona de estudio (50m x 50m), para así realizar el cálculo de la longitud de líneas por unidad de área, generando un archivo vectorial que clasifiqué a la zona con base a la longitud total presente en una unidad de área.

El siguiente paso fue el análisis geoestadístico de la densidad de grietas por unidad de área, utilizando el método de Kriging, para localizar las zonas en donde se concentran el riesgo por agrietamiento (Figura. 16).

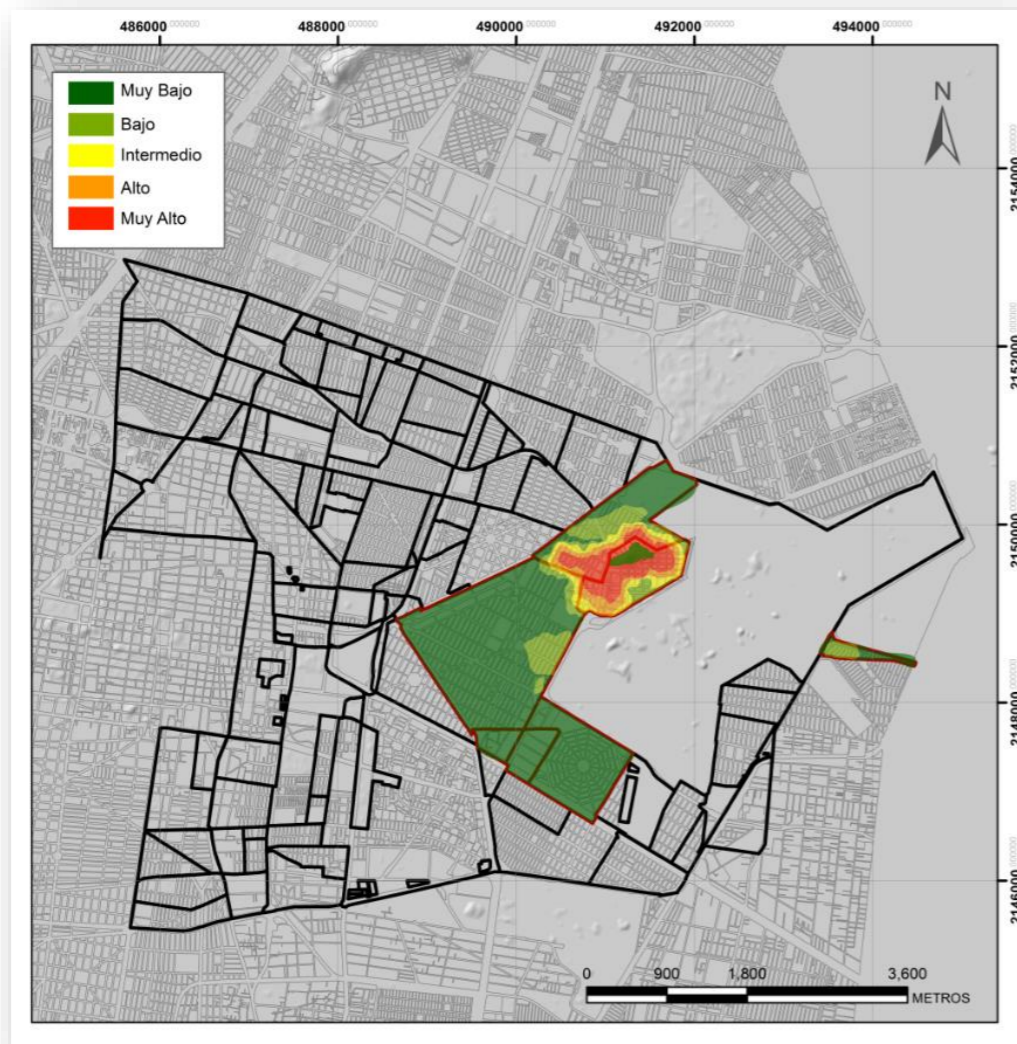


Figura 16. Mapa de densidad de grietas.

La generación del mapa de construcciones dañadas por los sismos que tuvieron lugar el 19 de septiembre del año de 1985 (Figura. 17) y 2017 (Figura. 18) fueron adquiridos y procesados a partir de información existente del área, complementando este último con trabajo de campo, generando una nube de puntos donde muestra la afectación de infraestructura dañada.

Consecutivamente se hizo un análisis geoestadístico de la densidad de puntos por unidad de área, utilizando el método de Kernel, para localizar las zonas en donde se concentró la mayor afectación a edificaciones.

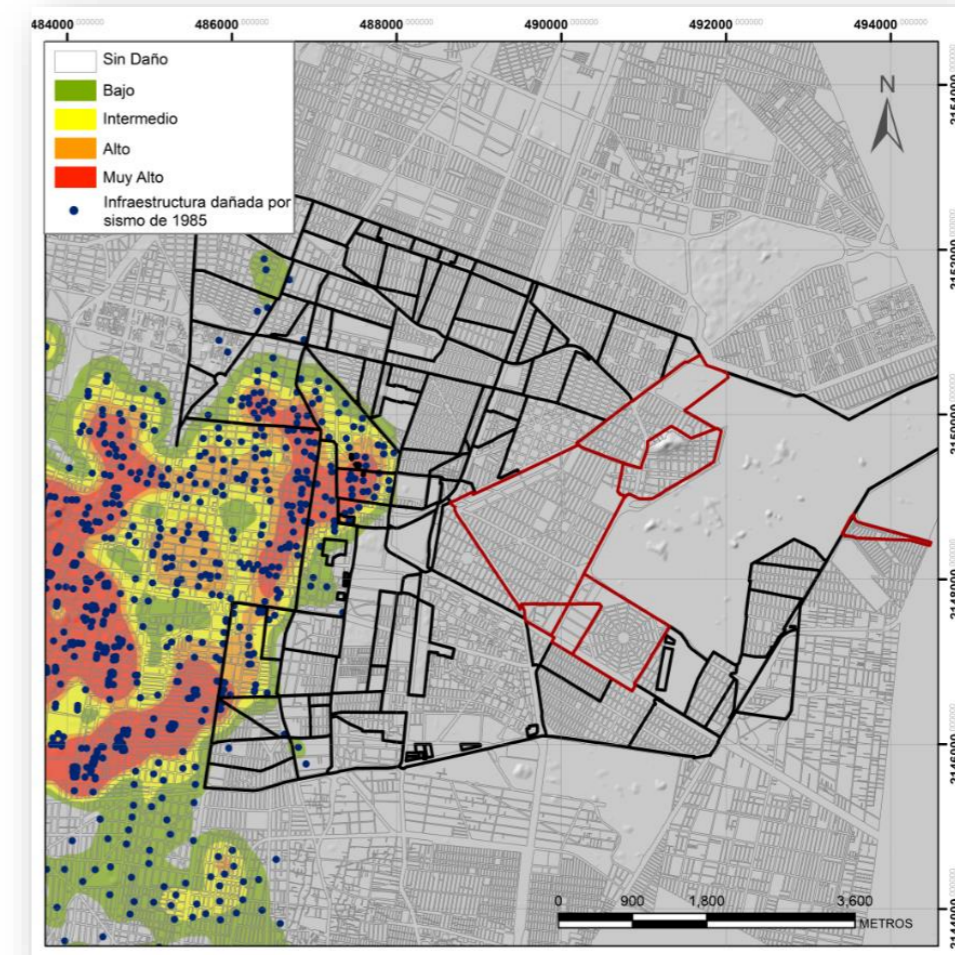


Figura 17. Infraestructura dañada por los sismos del 19 de septiembre de 1985

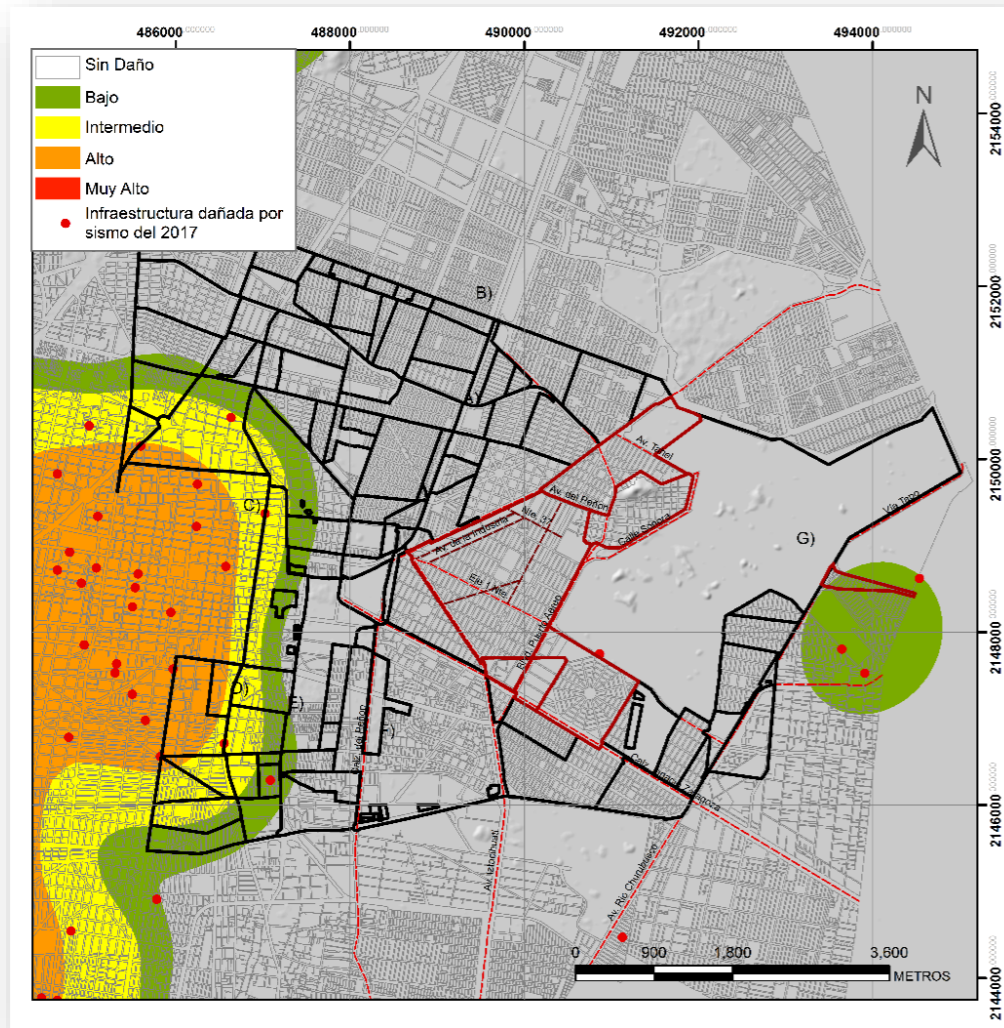


Figura 18 Infraestructura dañada por los sismos del 19 de septiembre del 2017

El mapa de riesgo se generó a partir del análisis multicriterio, con la integración de diferentes factores de acuerdo con la opinión de un especialista, en un marco de análisis. Cada uno de estos factores fueron tomados en cuenta con base a decisiones finitas denominadas problemas de Decisión Multicriterio Discreta, que involucra la discriminación de posibles alternativas, la perfección de diversas funciones objeto simultaneas, un agente decisor y operaciones de estimaciones racionales y consistentes.

Para el análisis de riesgo en la zona de estudio, comenzó por la generación y procesado de datos vectoriales y raster a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), dando como resultado capas temáticas que representan un estado de riesgo en tres niveles. Cada una de estas capas temáticas fue procesada y manipulada a fin de que cada factor seleccionado adquiriera un valor representativo para los riesgos que a futuro se vieran reflejados en la zona, con la intención de realizar lo que se conoce como algebra de mapas, el cual calculara pixel a pixel los valores otorgados a cada rasgo cualitativo, generando un raster de salida que refleje las regiones susceptibles a dichos fenómenos y cuál es su grado de influencia en las zonas urbanas (Figura 19)



Figura 14 Mapa de alertamiento por riesgo de grietas

#### 4.4 Levantamiento Geofísico

##### 4.4.1 Georadar

###### Fundamentos Teóricos

Como se mencionó anteriormente, el radar de penetración terrestre también llamado georadar (GPR), es un método de prospección geofísica, el cual se basa en la propagación de la onda electromagnética en la banda de microondas (UHF/VHF) del espectro radioeléctrico y por medio de su inducción al subsuelo, detecta las señales que refleja la estructura física del mismo.

Este tipo de metodología tiene la resolución más alta en la proyección de la imagen de la subsuperficie respecto a cualquier otro método geofísico, en los primeros estratos logrando precisiones de algunos centímetros bajo condiciones apropiadas.

Los instrumentos se pueden dividir en dos categorías dependiendo de la frecuencia de las antenas de transmisión y recepción. Si la antena emite señales iguales a los 400 MHz o inferiores (hasta 50 MHz) se tendrá un buen nivel de penetración que en ocasiones rebasa los 20 metros, sin embargo, la resolución desciende considerablemente. De la misma forma, si la antena opera con señales mayores a los 400 MHz, llegando hasta 1GHz se tiene muy alta resolución, pero una penetración menor variable desde 3 metros hasta unos centímetros.

El Ground penetration radar GPR (por sus siglas en inglés) cuenta con un generador de señales, es decir, una antena de transmisión (Tx) y una de recepción (Rx). La antena trasmisora genera un tren de ondas el cual viaja en el subsuelo y es reflejado a la superficie siendo así detectada por la antena transmisora. El sistema por manufactura es de una sola antena emitiendo una sola frecuencia a la vez, no existen antenas de generación variable de frecuencias.

El tiempo de viaje de la onda radioeléctrica de la antena transmisora a la antena receptora es del orden de unos diez a varios miles de nanosegundos. Las antenas pueden utilizarse

de dos maneras. La primera en la forma monoestática, que es cuando una misma antena se utiliza como receptora y transmisora. La segunda opción es la biestática, cuando se utilizan dos antenas, una actuando como receptora y otra como transmisora. Esta modalidad se utiliza de acuerdo con las necesidades que se presenten en campo y las opciones de configuración del equipo. Básicamente el transmisor generará pulsos de onda de radio a una frecuencia determinada y el receptor deberá estar configurado de tal manera que pueda barrer y recibir la señal. Los datos que se obtienen son de tipo puntual y son representados en un radargrama, que son registros de señales continuas.

En los radargramas de tiempo, el interés es mayor en la búsqueda de señales o trazas de amplitudes mayores, ya que estas representan las reflexiones en el terreno ocasionadas por cambios en las interfases del subsuelo.

Las propiedades electromagnéticas de los suelos están íntimamente relacionadas con su composición y contenido de agua. La velocidad de la onda de radio en cualquier medio depende de la velocidad de la luz en el vacío  $c = 0.2998 \text{ m/ns}$ , se sabe que la velocidad de las ondas estará dada por la siguiente ecuación:

$$V_m = \frac{c}{\left\{ \left( \epsilon_r \mu_r / 2 \right) \left[ (1 + P^2) + 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

$V_m$ , es la velocidad del medio

$c$ , es la velocidad de la luz en el vacío

$\epsilon_r$ , es la constante dieléctrica relativa

$\mu_r$ , es la permeabilidad magnética relativa

$P$ , es un factor de pérdida o absorción de energía

$P$  puede ser expresado como:

$$P = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$$

donde  $\sigma$ , es la conductividad del material si

$$\omega = 2\pi f$$

donde  $f$ , es la frecuencia.

$\varepsilon$  es la permisividad la cual está dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o$$

$\varepsilon_o$ , es la permisividad en el vacío,  $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}$

Cabe mencionar que cuando  $P \approx 0$ , la ecuación se podrá determinar de la siguiente forma, para la velocidad del medio es:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Algunos materiales son prácticamente transparentes a las ondas de radio como los suelos congelados. Otros materiales como el agua de mar y el agua saturada salobre de la arcilla absorben o reflejan la onda de radio que esto se vuelve una zona opaca.

El estudio del subsuelo consiste en determinar velocidades medias de propagación, junto con los tiempos registrados para cada evento, se localiza la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando tanto su posición horizontal, así como la profundidad a la que se encuentra. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones del medio analizado, así como del equipo utilizado. Dentro de este estudio las profundidades máximas alcanzadas fueron de 13.44 metros.

## Equipo

Se empleó una unidad central de georadar comercial de la casa Geophysical Survey System Inc. (GSSI), modelo SIR 3000, montado en un carro transportador. Las antenas que complementan el equipo son de frecuencias de 400MHz y 270MHz. El software que se utilizó para el procesado de la información fue el RADAN 6.5.3.

El procedimiento de registro es la medición continua de líneas a lo largo del transector. El instrumento de registro fue armado, calibrado y se procedió a indicar los puntos de partida fijándolos con pintura y posicionándolos con GPS, para su integración en un sistema de información geográfica. El equipo fue movilizado a lo largo de la línea planteada, a una velocidad media de 0.25 metros por segundo. En este estudio se obtuvieron 42 líneas (Tabla 1).

El radar de penetración terrestre también llamado georadar (GPR), es un método de prospección geofísica, el cual se basa en la propagación de la onda electromagnética en la banda de microondas (UHF/VHF) del espectro radioeléctrico y por medio de su inducción al subsuelo, detecta las señales que refleja la estructura física del mismo. Esto ocurre de forma cuantitativa y cualitativa al mismo tiempo, debido a los cambios en las características eléctricas y magnéticas del terreno, por lo que, se pueden identificar las discontinuidades de los parámetros de tipo electromagnético, debido a la conductividad y a la permisividad electromagnética. Esta herramienta es de fácil uso en zonas urbanas.

En la tabla 1 se muestran la distancia, la profundidad y el número de líneas que se trabajaron con georadar (Figura 20).



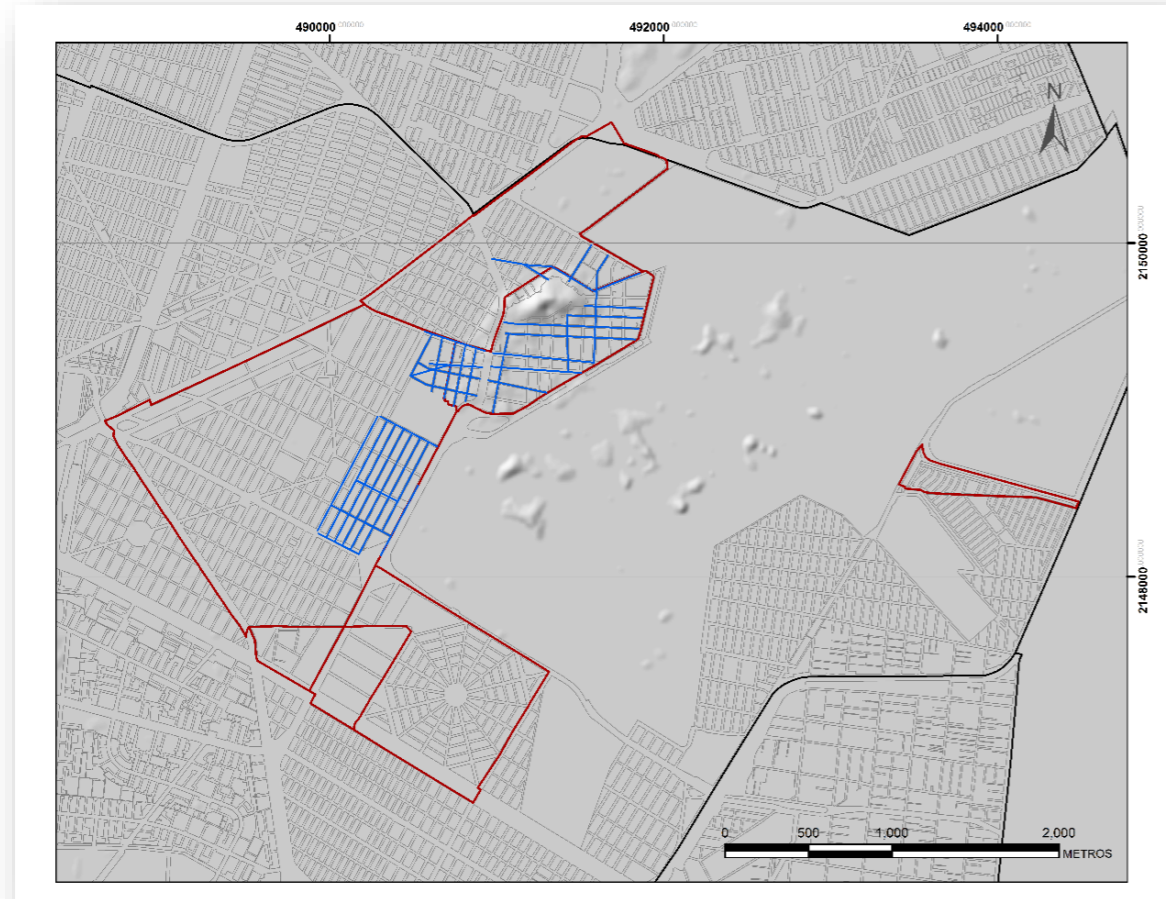


Figura 15 Líneas del levantamiento Geofísico por Georadar

Tabla 1. Líneas trabajadas con georadar en el Peñón de los Baños.

Número de Línea	Localización	Longitud (m)	Profundidad (m)
1	AV. DEL PEÑON	383.01	13.44
2	AV. TEXCOCO	154.17	13.44
3	B. PUERTO AEREO	418.59	13.44
4	C. PUERTO AEREO	314.27	13.44
5	CHIMALHUACAN A	340.19	13.44
6	CHIMALHUACAN B	123.44	13.44
7	COLONES	289.52	13.44
8	COLONES NTE 198	399.87	13.44
9	CORONADO	377.15	13.44
10	CUERNAVACA	355.12	13.44
11	EJE 1 NTE	283.76	13.44
12	HERMOSILLO	171.07	13.44
13	HIDALGO	564.56	13.44
14	IRAPUATO	371.60	13.44
15	LA PAZ	342.48	13.44
16	MATAMOROS	785.36	13.44
17	MORELOS	812.19	13.44
18	NTE. 21 A	343.05	13.44
19	NTE 21 B	63.17	13.44
20	NTE 25 A	229.59	13.44
21	NTE 25 B	300.08	13.44
22	NTE 33	405.25	13.44
23	NTE 174	282.43	13.44
24	NTE 176	321.73	13.44
25	NTE 180	337.52	13.44
26	NTE 194	264.12	13.44
27	NTE 202	165.89	13.44
28	OTE 33	414.69	13.44
29	OTE 35	394.27	13.44
30	OTE 37	262.11	13.44
31	OTE 172	768.61	13.44
32	OTE 174	771.55	13.44
33	OTE 176 A	369.47	13.44
34	OTE 176 B	392.49	13.44
35	OTE 178	767.12	13.44
36	OTE 180 A	364.72	13.44
37	OTE 180 B	393.35	13.44
38	OTE 182	762.96	13.44
39	OTE 184	602.31	13.44
40	PUEBLA	463.23	13.44
41	QUETZALCOATL	646.27	13.44
42	SOLES	682.05	13.44

#### 4.4.2 Geoelectrica

##### Fundamentos Teóricos

Todas las técnicas geofísicas intentan distinguir o reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante un parámetro físico, en prospección eléctrica por la resistividad.

Existen diversas técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso, la Conductividad. Los Sondeos Eléctricos Verticales se siguen utilizando por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. El objetivo en nuestro caso será delimitar varias capas en el subsuelo, obteniendo sus espesores y resistividades e identificar la litología de acuerdo a su valor de resistividad.

##### Fundamentos de Electricidad

Una carga eléctrica (positiva o negativa) genera a su alrededor un campo eléctrico que atrae a otras cargas de signo contrario y repele a las cargas de su mismo signo. La fuerza con que el campo repele o atrae una carga unitaria se denomina Intensidad de Campo.

Si existen varias cargas eléctricas, la fuerza con que una carga "q" es atraída o repelida se obtendrá sumando los vectores debidos a cada uno de los campos existentes. La unidad de carga eléctrica es el Coulomb.

El Potencial eléctrico es el trabajo que realiza el campo para repeler una carga de 1 Coulomb hasta el infinito.

La Diferencia de potencial es el trabajo que hay que realizar para mover una carga de 1 culombio de un punto a otro contra las fuerzas del campo (o el trabajo que hace el campo para mover una carga de un punto a otro)

Voltio. Entre dos puntos de un campo eléctrico hay una diferencia de potencial de 1 voltio cuando hay que efectuar un trabajo de 1 Joule para mover 1 culombio de un punto a otro (o el trabajo que efectúa el campo para mover dicha carga).

Las superficies equipotenciales son lugares geométricos de los puntos que tienen el mismo potencial. Aunque se trata de superficies tridimensionales, cuando hacemos una presentación en un papel (simplificamos la realidad tridimensional a las dos dimensiones del dibujo), traza de la superficie equipotencial sobre el papel es lo que llamamos línea equipotencial.

Flujo eléctrico: Intensidad Si existen cargas eléctricas libres en un campo eléctrico, se moverán empujadas por las fuerzas del campo. La medida de este flujo de cargas eléctricas es la intensidad.

Amper. Se dice que por una sección está circulando una intensidad de un amperio cuando está pasando un culombio por segundo.

Resistencia eléctrica. Resistividad. Ley de Ohm

Experimentalmente se demuestra que la intensidad de corriente que atraviesa un cuerpo por unidad de sección es linealmente proporcional al gradiente del potencial  $(\Delta V / \Delta l)^1$  Por tanto, para sección cualquiera será:

$$Intensidad = C. Sección. \Delta V / \Delta l = (1)$$

Donde la constante de proporcionalidad, C, es la conductividad del material.

Por otra parte, la resistencia (R) que opone un cuerpo al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la sección. La constante de proporcionalidad lineal  $\rho$  (ro) es la resistividad un parámetro característico de cada material.

$$R = \rho longitud / sección = (2)$$

Como la Conductividad (C) es el inverso de la resistividad ( $\rho$ ):

$$R = 1 / C \cdot \Delta I / \text{Sección} = (3)$$

Sustituyendo la parte derecha de (3) en (1), obtenemos:

$$\text{Intensidad} = \Delta V / R = (4)$$

Ohm ( $\Omega$ ). Un cuerpo ofrece una resistencia de 1 ohmio cuando sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio circula a través de él una intensidad de corriente de 1 amperio.

Resistividad de los materiales naturales

Los valores de la resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad).

En general, en el campo encontramos valores de este orden:

- Rocas ígneas y metamórficas inalteradas: 1000  $\Omega\text{m}$
- Rocas ígneas y metamórficas alteradas, o fuertemente fracturadas: 100 a 1000  $\Omega\text{m}$
- Calizas y areniscas: 100 a más de 1000  $\Omega\text{m}$
- Arcillas: 1 a 10  $\Omega\text{m}$
- Limos: 10 a 100  $\Omega\text{m}$
- Arenas: 100 a 1000  $\Omega\text{m}$
- Gravas: 200 a más de 1000  $\Omega\text{m}$

En materiales detríticos la resistividad aumenta con el tamaño de grano.

Métodos de Corriente Continua

Los métodos eléctricos de corriente continua se dividen en dos: los que usan como fuente las corrientes naturales que circulan en la corteza terrestre y los que requieren fuentes artificiales de corrientes introducidas al subsuelo. Del primer tipo sólo existe el método de potencial espontáneo.

Los métodos eléctricos de corriente continua con fuente artificial son los sondeos que miden la variación vertical y las calicatas que cuantifican variaciones horizontales, estos se enfocan a la detección de dos propiedades de los materiales del subsuelo; la resistividad eléctrica (sondeos y calicatas eléctricas) y la cargabilidad (capacidad que tienen los materiales para retener carga eléctrica durante un periodo de suministro de corriente para posteriormente deshacerse).

Sondeo Eléctrico Vertical y Polarización Inducida

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) y los sondeos de polarización inducida (PI) se realizan en campo mediante cuatro electrodos, separados a una cierta distancia, dos electrodos midiendo variaciones de potencial eléctrico originados en el terreno por corriente inyectada a través de los otros dos electrodos. Entre más distancias exista entre éstos, mayor será la profundidad de exploración en el terreno. El sondeo eléctrico vertical es el método eléctrico más común.

Calicatas y Métodos de corriente continúa

El segundo tipo se conoce como calicatas, aunque esencialmente es el mismo tipo de medición la forma en la que se realiza el trabajo permite conocer principalmente la distribución espacial, de las variaciones de la resistividad eléctrica (CE) o de la polarización inducida (PI) a lo largo de la línea que está levantando, manteniendo casi constante la profundidad de investigación.

Las calicatas consisten principalmente en mantener fijas las distancias entre los electrodos de corrientes y de potencial de tal forma que en el principio se mantiene la profundidad de investigación, después el arreglo de electrodos se mueve para hacer la medición en el próximo sitio (que normalmente está sobre una línea fijada previamente); se repite el proceso en los puntos subsiguientes hasta completar el perfil que se desea investigar.

#### Métodos de Corriente Alterna

Cuando se emplean métodos geoelectricos propiedad que está midiendo de los materiales del subsuelo es la resistividad eléctrica y que esta puede ser evaluada de formas diferentes, todas ellas emanadas de los principios básicos de la teoría electromagnética y las ecuaciones de Maxwell., utilizando las propiedades de los campos electromagnéticos generados al utilizar la corriente alterna.

#### Método Utilizado

Se Utilizó el método de prospección geoelectrica en su modalidad de dipolo-dipolo, con la finalidad de obtener una imagen del subsuelo con base en sus propiedades eléctricas y nos indique la presencia de alguna anomalía.

#### Equipo a Utilizar

El equipo empleado fue el Terrameter (abem) de baja frecuencia (4 hz) con oscilador electrónico y capacidad de medir resistencias comprendidas entre los 0.001  $\Omega$  y los 10000  $\Omega$  con periodos de hasta 16 ciclos. La resolución es de 1%. Los electrodos que se utilizaron son impolarizables y reducen el efecto electromagnético circundante. La información adquirida se procesó con el software RESMOD V 3.1 para Win XP en PC de 2 Gb en RAM y disco duro de 120 Mb.

Obtención de datos de campo.

La separación para la tomografía eléctrica se hizo de la siguiente forma. En la línea de la calle hidalgo se clavaron directamente los electrodos, sin embargo, en todas las demás líneas se precedió a realizar barrenos sobre el asfalto para introducir los electrodos a un espaciamiento de cuatro metros, cada uno, con esto se logra adquirir un número óptimo de datos para detectar las anomalías que pudieran estar.

#### Procesamiento, Inversión e Interpretación

El resultado obtenido es un conjunto de datos, dispuestos en forma de pseudosección de resistividad aparente, a partir de los cuales se efectúa la interpretación cualitativa de los datos, permitiendo inferir la existencia de Sectores subterráneos anómalos.

Posteriormente se lleva a cabo un post-procesamiento efectuando un modelado 2D introduciendo los datos en un algoritmo matemático que transforma, a través de rutinas de inversión aplicando el método numérico de cálculo por elementos finitos y diferencias finitas y aproximación por el método rapid least- squares, así como kriging (Loke and Barker 1996), la pseudosección de resistividades aparentes 2D en una sección de resistividades y profundidades verdaderas 2D, proceso denominado Inversión.

La Inversión de los datos arroja como resultado una "Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas" la que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc., a fin de delimitar, cualificar y cuantificar las anomalías detectadas en profundidad con objeto de lograr una Interpretación coherente.

#### Filtros utilizados.

El filtro pasa altas en la respuesta de frecuencia se atenúan las componentes de baja, pero no las de alta, las cuales incluso se pueden amplificar, en este caso se utilizó para atenuar

las componentes de la red eléctrica en zona, así como los ruidos que se encuentren entorno de los 60 hrz.

El filtro pasa bajas de manera inversa al anterior, solo permite el paso de las bajas frecuencias y elimina los efectos de las altas frecuencias, como señales de radiotransmisores y de telecomunicaciones.

El ancho de banda y filtros para promediar, fueron empleados para selecciones los datos representativos de nuestro muestreo con la finalidad de suprimir aquellos datos que se dispararan de la realidad física al adquirir los datos.

#### Muestreo e interpolación (Kriging)

El krigeaje o krigeado (del francés krigeage) es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Calcula los pesos que se darán a cada punto de referencias usadas en la valoración. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Dicho algoritmo se utilizó para el re mapeo de los datos, ya que como se planteó al inicio la adquisición esta igualmente espaciada a 4 m lográndose determinar espacialmente la información, permitiendo así la construcción de las secciones de resistividad.

Este metodo de prospeccion Geoeléctrico polo-dipolo, tiene como objetivo obtener una imagen del subsuelo e indicar la presencia de anomalia. Para la zona de estudio se levantaron seis líneas (Figura 21).

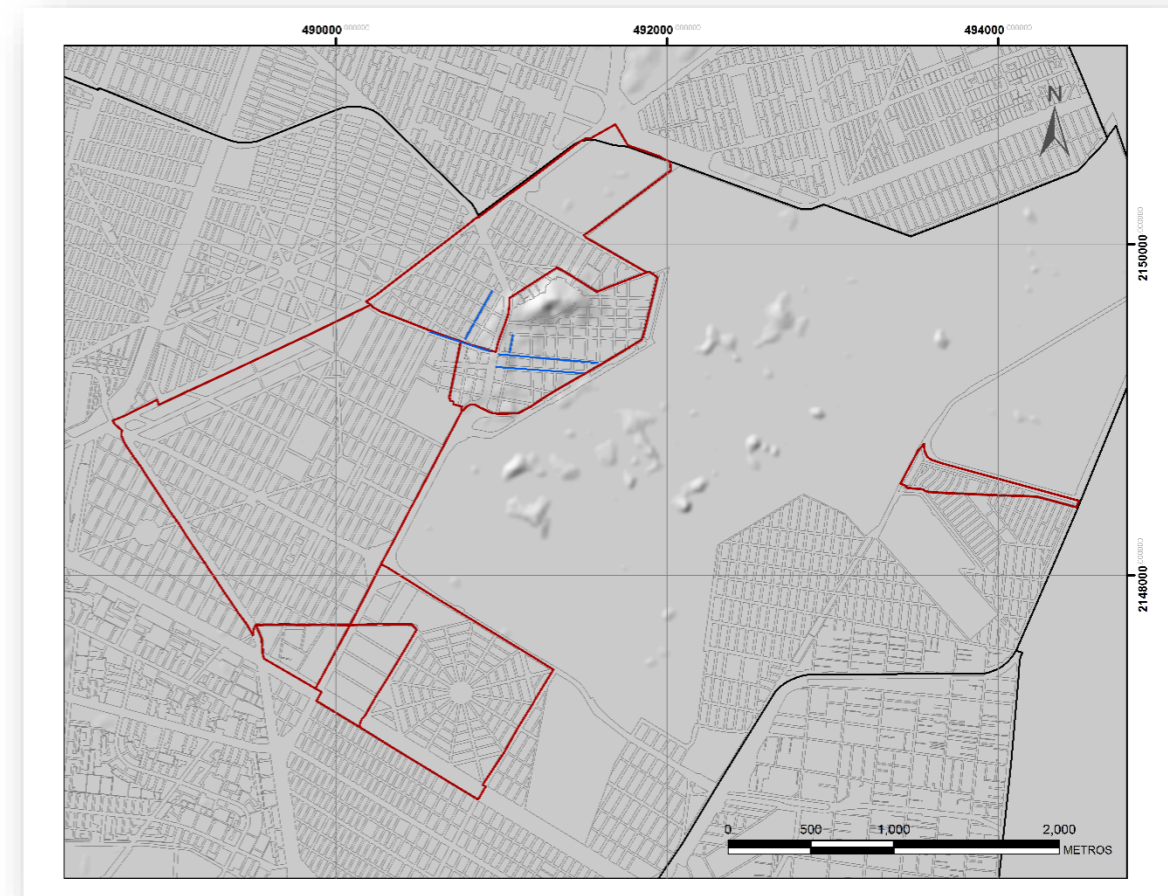


Figura 21. Líneas del levantamiento Geofísico por Geoelectrica

### 4.2.3 Sísmica

#### Método de Reflexión Sísmica Somera

En tierra, una de las técnicas de geofísica más útiles en la exploración de las estructuras en el subsuelo es el método de reflexión sísmica en donde ondas elásticas generadas por una fuente sísmica son registradas después de que se han reflejado de las estructuras y los estratos en el subsuelo.

Consiste en que una fuente impacta el suelo en una posición fija (referida aquí como tiro) y genera una energía en ondas elásticas que se transmiten en las capas de sedimentos subyacentes.

Esta energía es también reflejada de las subsecuentes interfaces profundas entre capas de sedimentos en el subsuelo. En geofísica, una interface es definida como un horizonte en el subsuelo que forme un contraste de impedancia acústica (velocidad sísmica x densidad) entre dos capas. Por general, la interface sísmica se correlaciona con los límites entre distintos estratos geológicos. Después de una infinitésima de tiempo, la energía reflejada regresa a la superficie donde es registrada usando una cadena de geófonos con un espaciamiento uniforme que están interconectados a un sismógrafo digital. Estos geófonos envían señales eléctricas a través del cable que son capturadas en forma de trazas sísmicas por cada tiro. Las trazas son un registro de las señales recibidas en tiempo desde el inicio en que se originó el tiro. La compilación de las trazas obtenidas a lo largo de una línea es referida como sección o perfil sísmico.

El eje horizontal en la sección sísmica representa la distancia y el eje vertical es el tiempo en que la señal toma en viajar hacia abajo rumbo al horizonte reflejado y de regreso a la cadena de geófonos. Este tiempo es comúnmente referido como el Tiempo Doble de Viaje (TWTT por sus siglas en inglés). Es importante tomar nota que las secciones sísmicas muestran los espesores de las capas en el subsuelo en función del TWTT y para conocer el verdadero espesor de las capas es requerido determinar el perfil de velocidades sísmicas

del subsuelo. Si estas velocidades son conocidas, entonces se podrá convertir el eje vertical de la sección sísmica que está en la escala del TWTT a la escala de profundidades. Como resultado la sección convertida es referida como la sección de profundidades. Durante un estudio sísmico en el campo, estas señales son también amplificadas y graficadas en la pantalla del sismógrafo a su vez que son registradas; este registro es referido como el registro de monitoreo.

Después del estudio en el campo, las trazas de las señales registradas son procesadas en el laboratorio para producir una sección sísmica. Dependiendo de la cantidad y tipo de ruido registrado en las trazas sísmicas, el procesamiento pudiera consumir un gran tiempo, y a su vez tomar más tiempo que el lapso que llevo la adquisición de datos en el campo. La calidad de los datos de reflexión sísmica depende de muchos factores, incluyendo la geometría de las interfaces en el subsuelo que pudieran reflejar la energía, el tipo de sedimentos, el contraste de densidades entre capas, el contenido de agua, la presencia de gas en los sedimentos, las condiciones ambientales y las actividades urbanas. Adicionalmente, las secciones sísmicas pueden ser afectadas por registros de reflexiones múltiples (ecos repetitivos provenientes del mismo reflector), reflexiones provenientes de superficies laterales al perfil, reflexiones de superficies irregulares, y ondas superficiales del terreno (ground rolling). En un ambiente urbano, las secciones sísmicas pueden ser fuertemente contaminadas por ruido generado de maquinaria y transporte cercano al perfil. Las amplitudes de este ruido pueden encubrir las reflexiones de las interfaces subyacentes, haciendo la interpretación difícil.

La resolución vertical está en función de la frecuencia del pulso originado por la fuente sísmica ( $\sim 1/4$  de longitud de la onda del pulso emitido). A través del subsuelo, frecuencias altas son atenuadas más rápidamente que las frecuencias bajas. También, material con grava o suelto atenúa la señal más rápidamente que el material consolidado. Por lo que, si una mayor penetración es requerida con baja frecuencia, una fuente de alta energía debería ser empleada, sacrificando la resolución vertical.

Debido a esta limitación, levantamientos de alta resolución (alta frecuencia) son solamente restringidos a los 100 a 200 metros de profundidad. Los sistemas para los levantamientos de alta frecuencia en tierra comúnmente emplean fuentes g-energadoras de impactos, por ejemplo, el golpe de un martillo de 10kg sobre una placa de acero o de una masa de 40 kg sobre una placa de aluminio, como fue el caso de este estudio.

La secuencia en la adquisición de datos a lo largo de un perfil consiste de transmitir un pulso sísmico con una masa de impacto a través del subsuelo, al mismo tiempo se dará inicio a la secuencia de registro de las trazas sísmicas. Las reflexiones son recibidas por la cadena de geófonos, que a la vez envían las señales eléctricas al sismógrafo digital para su captura. Las amplitudes de las señales que regresan son proporcionales al contraste de impedancia acústica de los horizontes reflejados.

El sismógrafo registra digitalmente la información por un tiempo predeterminado (referido como la duración del registro record length. El tiempo entre muestras digitales es referido como el intervalo de muestreo o simple rate. Después en un tiempo específico el operador determina el intervalo entre tiros también conocido como shooting rate, para que otro pulso sea generado, dando inicio de nuevo a la secuencia para producir una siguiente traza sísmica en la sección. Esta secuencia continúa como la fuente sísmica avanza para posicionarse para un nuevo tiro. Las trazas de las secuencias sincronizadas de los tiros son ordenadas en una sucesión de tiempo para formar la sección sísmica a lo largo del perfil, produciendo una imagen de la geología del subsuelo.

Para la sincronización de la fase del registro, el operador selecciona el óptimo del intervalo entre tiros, intervalo de muestreo y la duración del registro. Ganancia variable con tiempo (TVG) y un filtro pasa bandas son comúnmente aplicadas antes de capturar las trazas, para ajustar la señal de la pérdida de energía durante la transmisión y para remover el ruido de aquellas frecuencias que caen fuera del rango de frecuencia del pulso sísmico generado. Entonces la señal filtrada y amplificada con el TVG es capturada y archivada en el disco

duro del sismógrafo y después transferido a disco compactos para su resguardo permanente.

#### Prospección Sísmica

Para la prospección sísmica de alta resolución en las colonias cercanas al Peñón de los Baños, la penetración deseada debería de ser de más de 100 m con una alta resolución. Se utilizó una fuente de energía sísmica que impactaba sobre una placa de aluminio de una pulgada de espesor sobre la superficie del suelo con una masa de 40 kg, produciendo un pulso que generaba frecuencias hasta 150 Hz y podría alcanzar profundidades mayores a los 250 m. El uso de esta fuente de energía ofreció una buena relación entre la resolución y la penetración. La fuente que se uso es el PEG 40 ("Propelled Energy Generator of 40 kg") fabricado por R.T. Clark de Houston Texas. El impacto de esta fuente emite pulsos acústicos (ondas p) que viajan a través del subsuelo y sus ondas reflejadas son registradas por una cadena de 24 geófonos, que estuvieron igualmente separados cada 20 pies entre ellos. Estos pulsos reflejados y registrados por los geófonos son transmitidos a través de un cable conductor que se conecta a los 24 canales del sismógrafo portátil que operada el programa de adquisición de datos en el lenguaje DOS de Microsoft. El sismógrafo multicanal utilizado fue SMARTSEIS NS24 de 24 canales fabricado por Geometrics de San José, California, USA.

El paquete de adquisición en el sismógrafo desplegaba las 24 trazas y se capturaba en cada uno de los tiros realizados. Para cada sitio de los tiros realizados, se repetía una secuencia de más de 5 tiros en la misma posición, y en consecuencia se seleccionaba las mejores trazas de 5 tiros para ser apilados. La geometría del método fue diseñada para obtener un apilamiento de 4 trazas para cada CMP. Por lo que las resultantes secciones procesadas y apiladas están a 4 folds. Los intervalos de entre las posiciones de los CMP (punto medio común) fueron de 10 pies. Los intervalos de las posiciones entre tiros fueron

de 130 pies. Diez de los perfiles realizados se extendieron al menos de 8 o más posiciones de tiro. Mientras que solo dos perfiles se extendieron solamente hasta 5 posiciones de tiro.

Las coordenadas de los sitios de tiros y de las ubicaciones de los geófonos fueron tomadas de un sistema de posicionamiento, compuesto por dos receptores de GPS de doble frecuencia, marca Leica. El sistema de coordenadas utilizado en las mediciones está basado en el sistema de referencia WGS84. El receptor GPS con una antena Microstrip fue utilizado en forma portátil para realizar mediciones en un modo cinemático OTF. Después del trabajo de campo, se realizó el procesado de las mediciones a lo largo de los perfiles en conjunto con la información registrada por el GPS para obtener las posiciones geográficas (latitud y longitud) y altitudes (elevación) de los tiros y geófonos. El total de mediciones de posiciones con su elevación realizadas en el estudio fueron 275, y aproximadamente cada medición duro en promedio 10 minutos de ocupación.

#### Equipo

El equipo usado para el estudio de reflexión sísmica consistió en una fuente sísmica de impacto con una masa de 40 kg (PEG-40kg, Propelled Energy Source de R.T. Clark), controlada, que golpea una placa de aluminio de 1 pulgada de espesor, con dimensiones de 50 cm x 50 cm, para generar ondas sísmicas, un sismógrafo digital, SMARTSEIS S24 de la Marca Geometrics, de 24 canales para monitorear automáticamente y registrar las ondas sísmicas generadas por el impacto de la fuente sísmica, un "Hammer" switch que controla el inicio de la captura de los datos digitales de las trazas sísmicas para cada uno de los canales, 24 geófonos de 40 kHz fueron activados en cada uno de los impactos para las reflexiones sísmicas, dos baterías de 12 Volts fueron utilizadas para suministrar la corriente eléctrica a la fuente sísmica y al sismógrafo digital con sus geófonos, una camioneta pickup para transportar y fijar la fuente sísmica en cada una de las posiciones en que se llevaron los impactos, una camioneta Van para transportar los equipo, materiales

y protecciones que se utilizaron en el estudio, una camioneta Todo-Terreno para movilizar los participantes del estudio a lo largo de las líneas sísmicas, un receptor GPS fijo, de la marca Leica, de doble frecuencia, modelo SR520, con 12 canales en L1 y 12 canales en L2 en mediciones de código y fase, y con una antena anular L1/L2/ de tipo Dorne & Margolin., un receptor GPS portátil, de la marca Leica, de doble frecuencia, modelo SR520, con 12 canales en L1 y 12 canales en L2 en mediciones de código y fase, y con una antena Microstrip L1/L2., un vehículo de pasajeros para movilizar a los técnicos que operaron los GPS y realizaron el levantamiento topográfico, una PC de escritorio para el procesado de los datos en una oficina y un software profesional fue utilizado para el procesado sistemático de los datos de reflexión sísmica.

#### Datos Sísmicos y Procesamiento

Durante la prospección, todos los datos registrados en el SMARTSEIS fueron capturados a un intervalo de muestreo a 0.0125 ms, durante un intervalo de 0.512 ms en un formato SEG-Y.

#### Procesamiento

El primer paso en el post-procesado de los datos fue la eliminación de trazas muertas y el remover el ruido aleatorio y de alta amplitudes. Para el post-procesado restante, un flujo de operaciones secuenciales fue aplicado sobre los datos para obtener secciones sísmicas más nítidas. El siguiente diagrama es un ejemplo general del procesado estándar que se realiza para este tipo de estudios.

En este estudio, se convirtieron los archivos registrados en el campo en formato SEG2 al formato SPW. Se debe a que los archivos de campo en SEG2 tiene un apilamiento vertical de 5 tiros. Todos estos tiros fueron hechos en el mismo sitio, no se utilizó un arreglo de tiros (source array), se importaron los archivos al programa de procesamiento SPW, luego se introdujo la geometría del arreglo de tiros y geófonos a lo largo de los perfiles. Esto



incluye datos de las posiciones y elevaciones de los tiros, geófonos y de los puntos CMPs. Las correcciones por efecto de la estática fueron calculadas y empleados sobre un datum de elevación. Se empleó un datum de 2,250.04 metros que fue más alto que la topografía del sitio más elevado en los perfiles. Se utilizó una velocidad constante de 4500 ft/sec. Luego se localizaron y eliminaron las trazas incorrectas, se aplicó un filtro Notch de 60Hz, la corrección por divergencia esférica con una función de velocidad de 0.0sec:4500 ft/sec 0.5 sec:6,000ft/sec, un filtro pasa bandas de 10, 115, 200 y 225 Hz para cortes y esquinas de frecuencia y dos archivos con formato SEG. Se obtuvo, uno con encabezado REEL y el otro no.

Para el procesado anterior al apilamiento de trazas, se empleó un filtro pasa bandas de 55, 60, 150 y 175 Hz a las trazas sísmicas, un arreglo de las secuencias de los CMP (common middle point) para cada uno de los perfiles, una corrección por NMO (normal moveout) y el apilamiento de las trazas para cada uno de los CMP.

En el procesado posterior al apilamiento de trazas, la metodología empleada es la siguiente:

1. Utilizar un filtro de coherencia para toda la sección sísmica.
2. Emplear el algoritmo de Stolt para migrar los datos sísmicos.
3. Aplicar una limpieza espectral (spectral whitening) a la sección sísmica para esclarecer los pulsos comunes de un reflector.

#### 4.2.4 Gravimetría

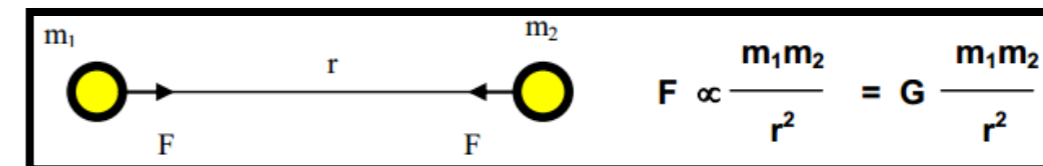
La prospección por métodos gravitacionales es una técnica para medir las variaciones del campo gravitatorio en la superficie terrestre y el empleo de los datos obtenidos de este modo para inferir la estructura del subsuelo. La propiedad física de los materiales del subsuelo que produce las anomalías gravitacionales significativas es la densidad.

La prospección gravimétrica suele realizarse en forma de malla (puntos equidistantes en ambas direcciones horizontales X, Y) de forma que se pueda definir un mapa 2D de gravedad, resultado de aplicar distintas correcciones (topografía, deriva, etc.) a los datos originales. Una vez aplicadas estas correcciones se obtendrán las imágenes en las que se pretende definir o aislar los cambios locales (anomalías gravimétricas) objetivo final del estudio.

El valor medio de la gravedad en la superficie de la Tierra es de aproximadamente 9,80 m/s<sup>2</sup>, o 980.000 mGal. La rotación y aplanamiento de la Tierra hacen que la gravedad aumente aproximadamente 5300 mGal desde el ecuador hasta el polo, lo que representa una variación de sólo el 0,5%. Por consiguiente, las mediciones de la gravedad son de dos tipos. La primera corresponde a la determinación de la magnitud absoluta de la gravedad en cualquier lugar; El segundo consiste en medir el cambio de gravedad de un lugar a otro.

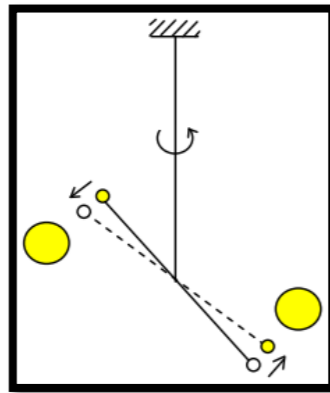
En estudios geofísicos, especialmente en prospección por gravedad, es necesario medir con precisión los pequeños cambios en la gravedad causados por las estructuras subterráneas. Estos requieren una sensibilidad instrumental del orden de 0,01 mGal. El levantamiento de gravedad se realiza generalmente con un instrumento portátil llamado gravímetro, que determina la variación de la gravedad en relación con uno o más lugares de referencia.

La Primera Ley de Newton establece que existe una fuerza de atracción entre dos masas m<sub>1</sub> y m<sub>2</sub> separadas por una distancia r, representada por la siguiente relación de proporcionalidad:



$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Para la determinación del factor de proporcionalidad, Cavendish en el año 1798 ideó una balanza similar a la de la figura siguiente, y como podía medir las masas y distancias, además de conocer el coeficiente de torsión del hilo de suspensión y medir el ángulo de rotación, pudo calcular el coeficiente de proporcionalidad que es la conocida Constante de Gravitación Universal (G) que vale:  $6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$ .



Si suponemos que la tierra es esférica e irrotacional con masa M, la atracción Newtoniana a una masa genérica m sobre su superficie será:

$$\mathbf{F} = \mathbf{GmM/R}^2 \quad \text{donde } \mathbf{R} \text{ es el radio medio de la Tierra}$$

La segunda ley de Newton establece que  $F = ma$ , y si definimos como g, aceleración de la gravedad, a la causada por la atracción de la masa de la tierra, entonces:

La segunda ley de Newton establece que  $F = m \cdot a$ . Entonces definimos como g a la aceleración de la gravedad, causada por la atracción de la masa de la tierra:

$\mathbf{F} = \mathbf{m \cdot g} = \mathbf{G \cdot m \cdot M/R}^2$  y finalmente tendremos que:

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

El objetivo del estudio consiste en determinar la distribución de la variación en la densidad del subsuelo en base a la respuesta gravitatoria de las estructuras geológicas presentes y su profundidad aproximada.

Es necesario mencionar que la respuesta gravimétrica no siempre corresponde a la topografía del terreno sino a las propiedades y condiciones físicas de los cuerpos y la cercanía con la superficie.

#### Perfiles geológico-estructural

Los perfiles geológicos estructurales se realizan a partir del modelado de datos gravimétricos obtenidos en campo. Se grafica la respuesta gravimétrica en un sistema coordenado con ejes X y Y; la respuesta geológica se determina a partir de valores de densidad correspondiente a los materiales que se encuentran en la zona, de esta forma podemos determinar la distribución de los elementos geológicos en el subsuelo.

Para el presente trabajo se realizaron dos perfiles geológico-estructurales con la finalidad de determinar la existencia de lineamientos producidos por los esfuerzos a los que la corteza se encuentra sometida y a los producidos por subsidencia.

Perfil 1.  
485190.24 mE; 2149638.31 mN  
496840.54 mN 2156423.11mE

Perfil de 13.5Km de orientación SE-NW y 1Km de profundidad.

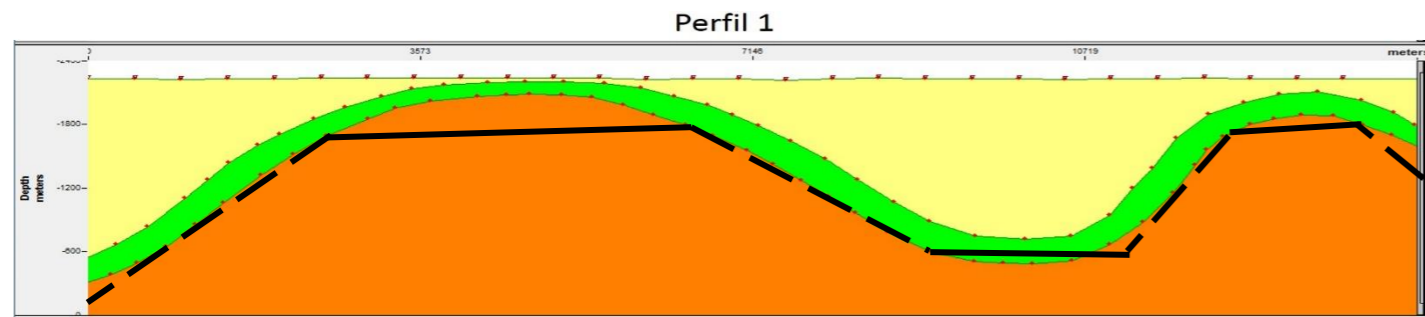


Figura 22. Perfil 1

En él se interpreta arcillas de forma superficial en color beige. En color verde se interpretan una capa de tobas. En la base del perfil se observa basalto. Los lineamientos inferidos en el modelo son determinados por la morfología y la compactación del material no consolidado. Como se observa en el modelo, estos lineamientos no llegan a la superficie por lo que no son visible, aunque los efectos producidos por ellos se manifiestan en forma de grieta en el terreno, subsidencia y cambios constantes en la topografía.

Perfil 2.  
486660.03 mN, 2147367.99 mE  
498472.06 mN, 2154010.10 mE

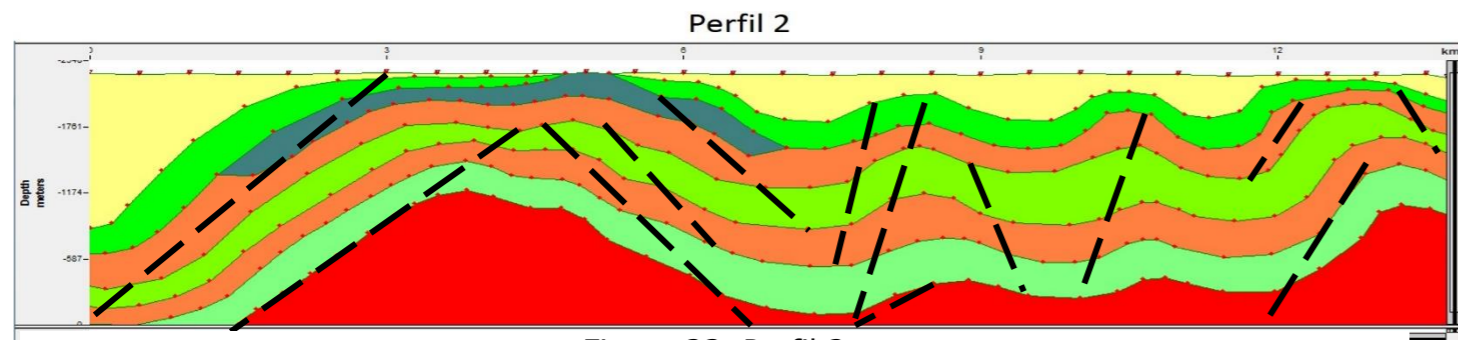


Figura 23. Perfil 2

Perfil de 13.6km de longitud y 1 km de profundidad de orientación SE-NW. Se interpretan arcillas en parte superficial con intercalaciones de tobas y basaltos a profundidad. Se observa un afloramiento de andesita al rededor del km 50. Los lineamientos inferidos en el modelo son determinados por la morfología y la compactación del material no consolidado. Los lineamientos inferidos en modelo son consistentes con el cambio en la pendiente de las capas de material, mismas que se encuentran bajo los esfuerzos producidos por la corteza.

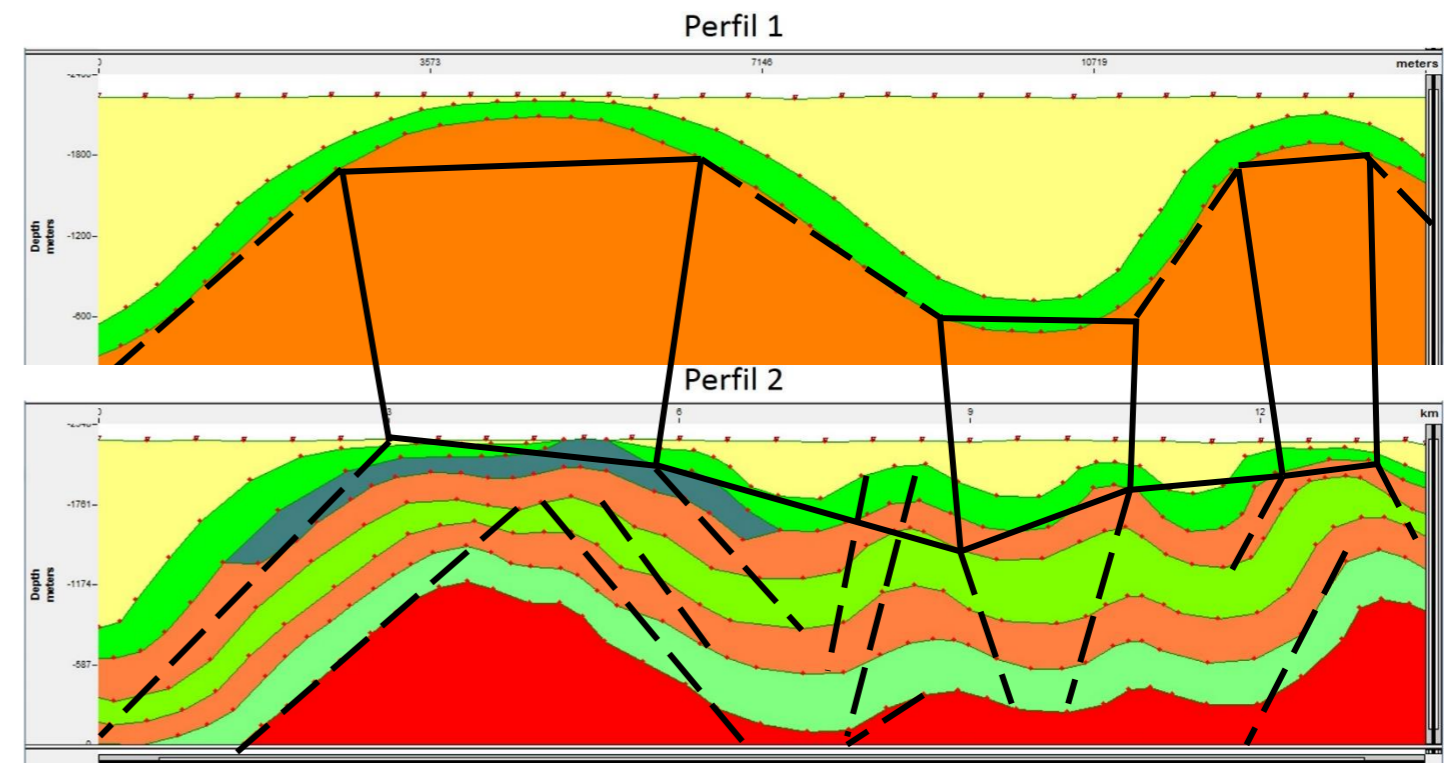


Figura 24. Correlación de lineamientos sobre los modelos.

La sobre posición de los modelos nos permite correlacionar los lineamientos inferidos en ellos, con el objetivo de determinar su origen y continuidad en el terreno (figura 24). Gracias a la correlación podemos inferir las estructuras geológicas asociadas a estos lineamientos y realizar una interpretación de la estructura que los origina. En este caso, se interpreta un sistema de posibles fallas geológicas sin expresión superficial

Los lineamientos inferidos a partir de los perfiles geológico-estructurales se muestran en la figura 25. Estos lineamientos interpretados en cada perfil se ubican en una imagen satelital

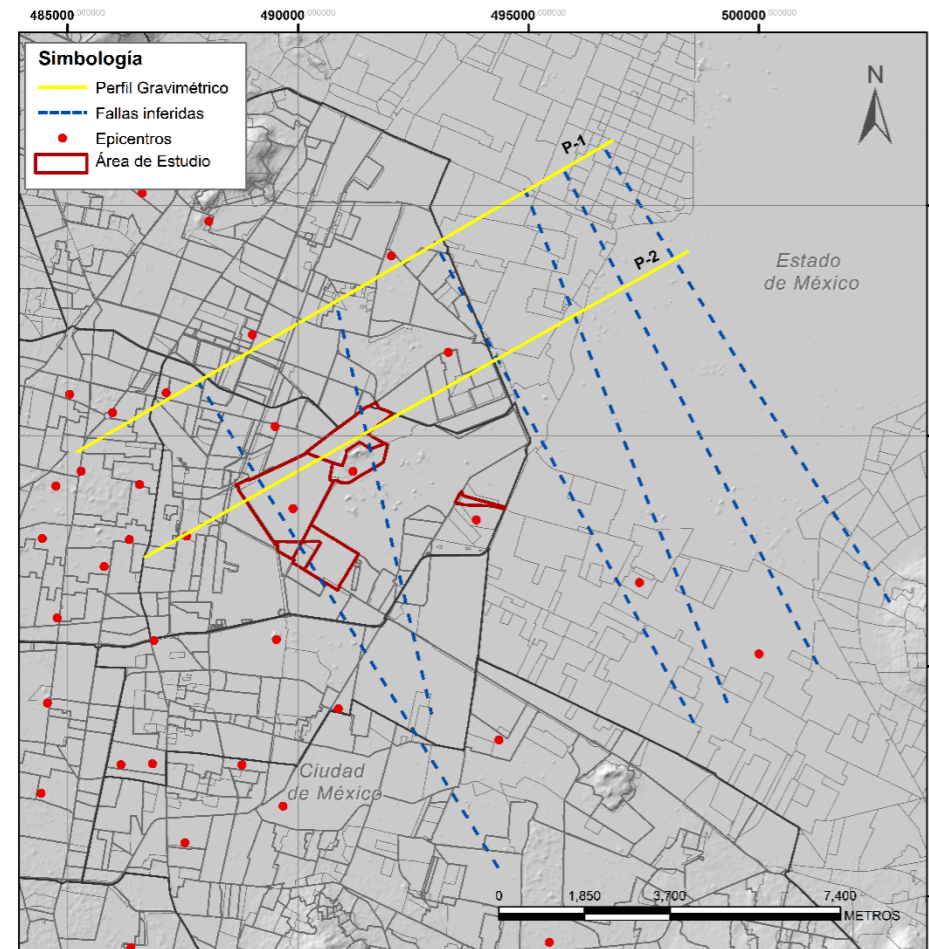


Figura 25. Lineamientos inferidos a partir de la gravimetría.

#### 4.5 Aspectos técnicos de Topografía

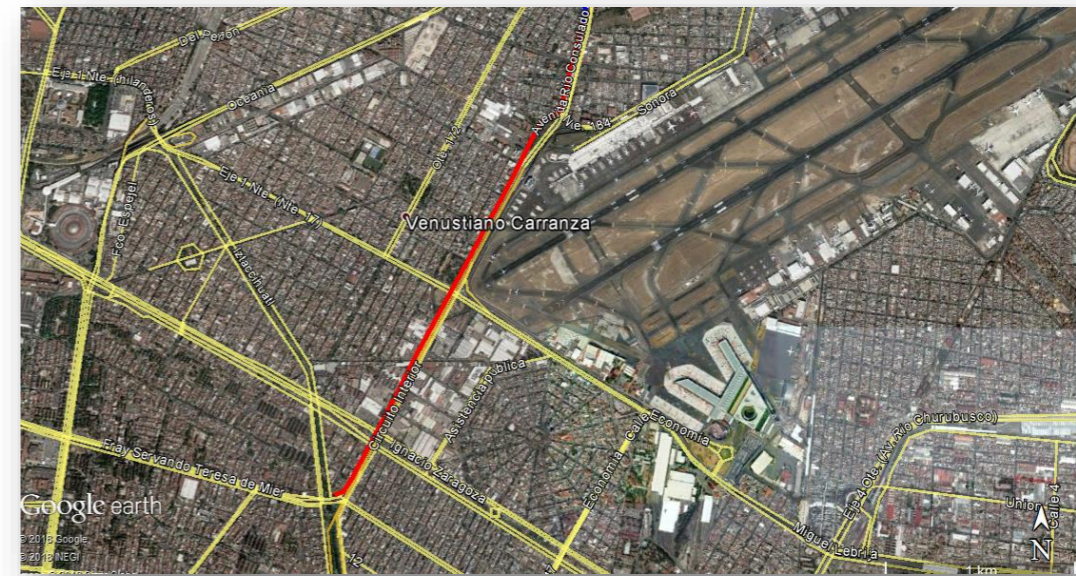


Figura 26. Rio Consulado (Placa Peñón de los Baños) a Avenida 8 (Fray Servando Teresa de Mier).



Figura 27. Eje 2 Nte. Transversal continua canal del norte De Río Consulado (Peñón de los Baños) a paseo de la reforma.



Figura 28. Peñón de los Baños – Av. Texcoco  
Morelos – Colones – Av. Texcoco – Tahel – Ruiz Cortinez – Av. 602 – Av. Texcoco

Conceptos técnico

GPS System

El Sistema 500 se emplea para recepción de señales de los satélites GPS, las cuales se procesan para obtener la posición de un punto sobre la superficie terrestre.

Puede emplearse en diversas aplicaciones, principalmente en Levantamientos Terrestres, Replanteos y Levantamientos Hidrográficos.

Los componentes principales del Sistema 500 son la Antena GPS y el Receptor.

Como complemento, se encuentran la Terminal, las baterías, Tarjetas PC y los cables.



Asimismo, para la extracción de los datos es necesario contar con un software para PC llamado Leica Geo-office para hacer el post-proceso de los datos GPS, así como transferir las coordenadas registradas en campo.

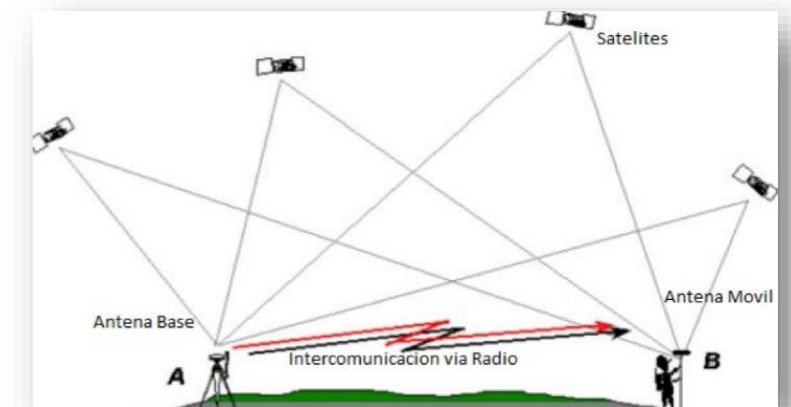
Levantamiento con GPS

Para realizar mediciones GPS satisfactorias, es necesario recibir las señales de los satélites con el mínimo de alteración. Esto significa que los sensores GPS deberán colocarse en sitios libres de obstrucciones, tales como árboles, edificios, montañas, etc., los cuales bloquean la recepción por parte de las antenas de las señales de los satélites GPS. Lo anterior debe observarse con mayor exigencia en aquellos sitios en donde se coloque el receptor de referencia.

La decisión del tipo de montaje a emplear, dependerá de las condiciones del sitio en el que se efectuarán las mediciones y del modo en que estas se realicen.

Para el presente proyecto se utilizó el método estático-dinámico, que consiste básicamente en colocar una antena base en un solo punto (en este caso se utilizó una placa de INEGI ubicada en Av. Reforma) y utilizar otra antena como móvil para colocarla en los puntos que serán medidos. La antena base debe permanecer estática durante todo el tiempo que la antena móvil sea utilizada para el levantamiento.

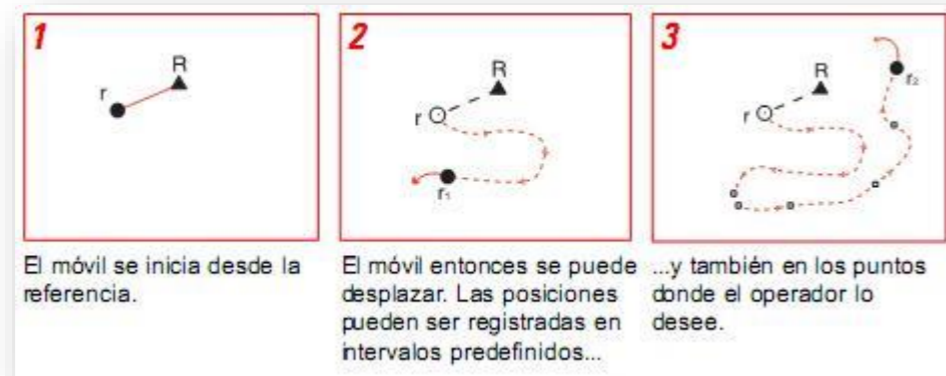
En mediciones estáticas, la antena debe tener total estabilidad durante la ocupación del punto.



El equipo debe centrarse y nivelarse, hecho esto se configura la interfaz como antena base para que reconozca los satélites y empiece a grabar los datos por el tiempo determinado.

Para la antena móvil, se coloca la antena sobre un bastón y un bípode, el cual también se centra y nivela en cada uno de los puntos a levantar.

En este caso para el levantamiento sobre Circuito Interior los puntos móviles se colocaron en los vértices 34 y 35 de los cuales se anexan fotografías en el reporte fotográfico de GPS.



Equipo y material empleado para el levantamiento con GPS

- 2 GPS marca Leica System 500
- 1 Baston
- 1 Bípode
- 1 Trípode de madera
- 1 Marro
- Clavos para concreto de 1"
- 3 Pinturas en aerosol color Naranja
- Chalecos de seguridad para vialidad

Levantamiento con Estación Total.

La Estación Total es utilizada tanto en levantamientos planimétricos como altimétricos, independientemente del tamaño del proyecto. Los levantamientos realizados con este instrumento son rápidos y precisos.

El modo de operar una Estación Total es similar al de un teodolito electrónico, se comienza haciendo estación en el punto topográfico y luego se procede a la nivelación del aparato. Para iniciar las mediciones es necesario orientar la estación total previamente, para lo cual se requiere estacionar el equipo en un punto de coordenadas conocidas o supuestas y conocer un azimut de referencia, el cual se introduce mediante el teclado del equipo, en este caso tal punto fue la placa 12054 de INEGI (las coordenadas y ubicación de esta placa se encuentran en el anexo 1).

Para la medición de distancias el distanciómetro electrónico incorporado a la Estación Total calcula la distancia de manera indirecta en base al tiempo que tarda la onda electromagnética en viajar de un extremo a otro de una línea y regresar.

En campo se hace estación con la Estación Total en uno de los extremos cuya distancia se desea determinar y en el otro extremo se coloca un reflector o prisma; es requisito indispensable que la visual entre la Estación Total y el reflector o prisma se encuentre libre de obstáculos. El instrumento transmite al prisma una señal electromagnética que regresa desde el reflector, la determinación precisa de la distancia se obtiene una vez que se han aplicado las correcciones atmosféricas de temperatura y presión.

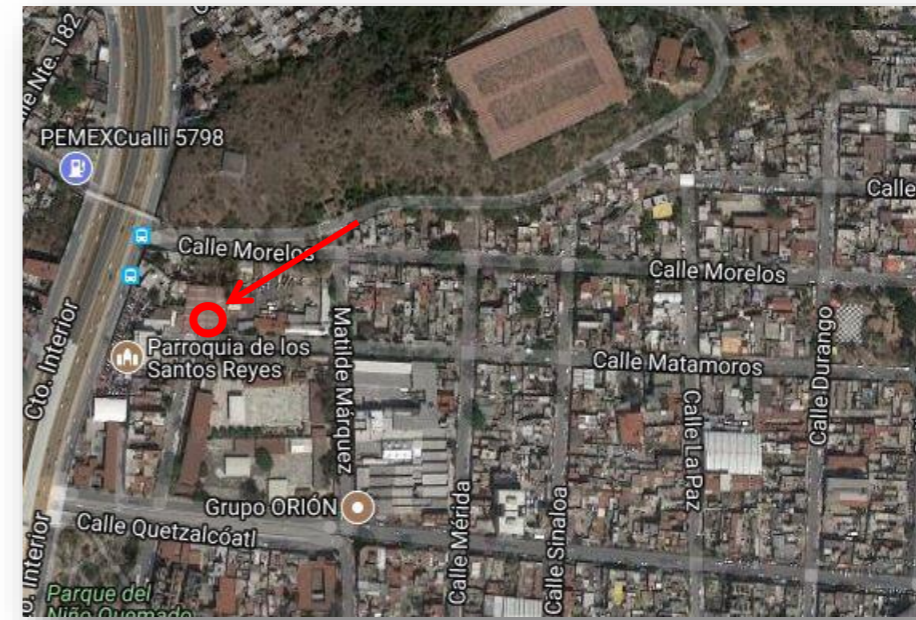
Para este caso el levantamiento se realizó con una estación Leica L1200 la cual tiene una precisión de  $\pm 3''$ . Los puntos utilizados para la poligonal fueron marcados con clavos y pintura naranja.

Equipo y material empleado para el levantamiento topográfico.

1 Estación total Leica L1200 con precisión de  $\pm 3''$

- 6 Bastones
- 2 Bípodes
- 6 Prismas
- 1 Trípode de madera
- 1 Marro
- Clavos para concreto de 1"
- 3 Pinturas en aerosol color Naranja
- Chalecos de seguridad para vialidad

Reporte Peñón – Av. Texcoco



Coordenadas Geográficas 19°26'24.02063" N  
99°05'05.91135" W

Coordenadas UTM X= 491,080.118  
Y= 2,149,516.480

Coordenadas Topográficas X= 491,080.205  
Y= 2,149,516.474  
Z= 2,247.053

Ubicación Delegación Venustiano Carranza, Col. Peñón de los Baños. Ciudad de México.

Observación V-2 ubicado en calle Morelos, a unos pasos de su intersección con Circuito Interior. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.



Coordenadas Geográficas 19°27'07.80335" N  
99°03'04.99320" W

Coordenadas UTM X= 494,635.837  
Y= 2,150,860.833

Coordenadas Topográficas X= 494,608.355  
Y= 2,150,863.593  
Z= 2,223.076

Ubicación Delegación Gustavo A. Madero, Col. Cuchilla del Tesoro. Ciudad de México.

Observación V-34 ubicado en Av. Texcoco, sobre la banqueta dirección Av. Ferrocarriles, Entre Oriente 14 y Oriente 15. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.



Coordenadas Geográficas 19°27'08.71319" N  
99°03'03.98040" W

Coordenadas UTM X= 491,048.423  
Y= 2,150,888.791

Coordenadas Topográficas X= 494,637.901  
Y= 2,150,891.585  
Z= 2,223.717

Ubicación Límites de la Delegación Gustavo A. Madero y el Estado de México.

Observación V-35 ubicado en Av. Texcoco, sobre camellón central, casi esquina con Av. Ferrocarriles y Calle Oriente 16. En registro, en el BN 07-33-R de la Gerencia de Aguas del Valle de México. Marcado con pintura color naranja y número de vértice.



Peñón – Blvr. Puerto Aéreo



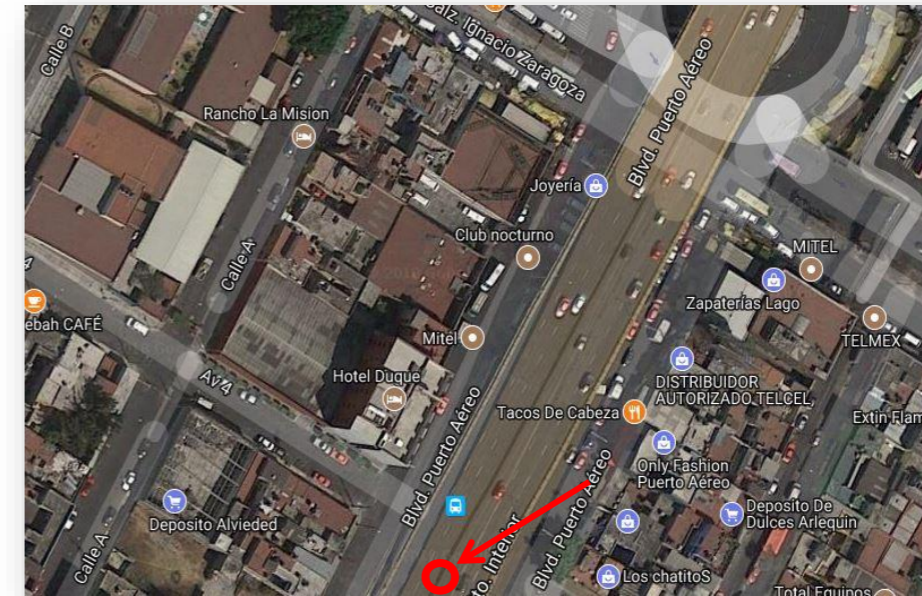
Coordenadas Geográficas 19°26'25.93802" N  
99°05'08.52206" W

Coordenadas UTM X= 491,004.024  
Y= 2,149,575.453

Coordenadas Topográficas X=491,004.024  
Y=2,149,575.453  
Z=2,243.708

Ubicación Delegación Venustiano Carranza, Col. Pensador Mexicano. Ciudad d México.

Observación V-1 ubicado en Av. Río Consulado, sobre la banqueta, frente a la gasolinera, casi esquina con Calle Siberia. Marcado con un



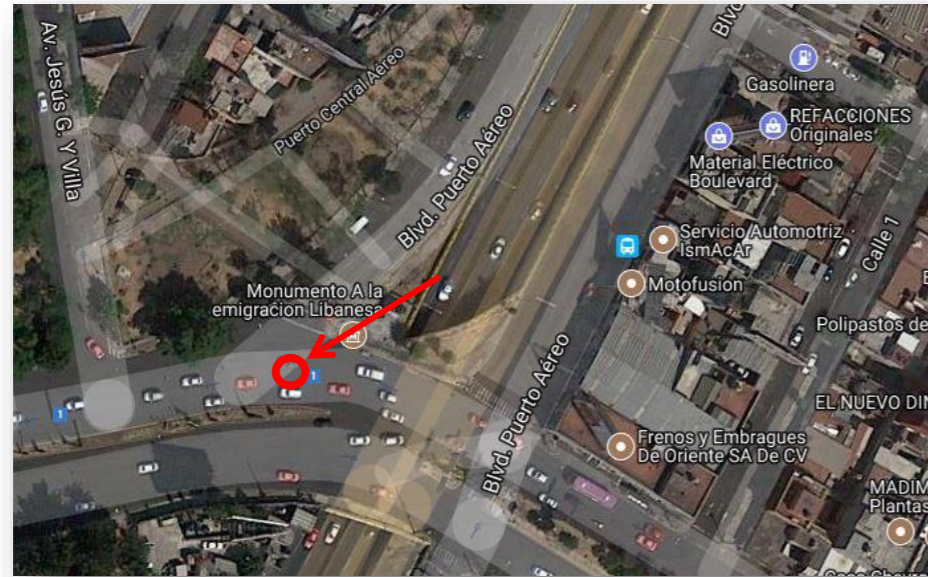
Coordenadas Geográficas 19°25'07.14800" N  
99°05'49.65555" W

Coordenadas UTM X= 489,803.275  
Y= 2,147,154.323

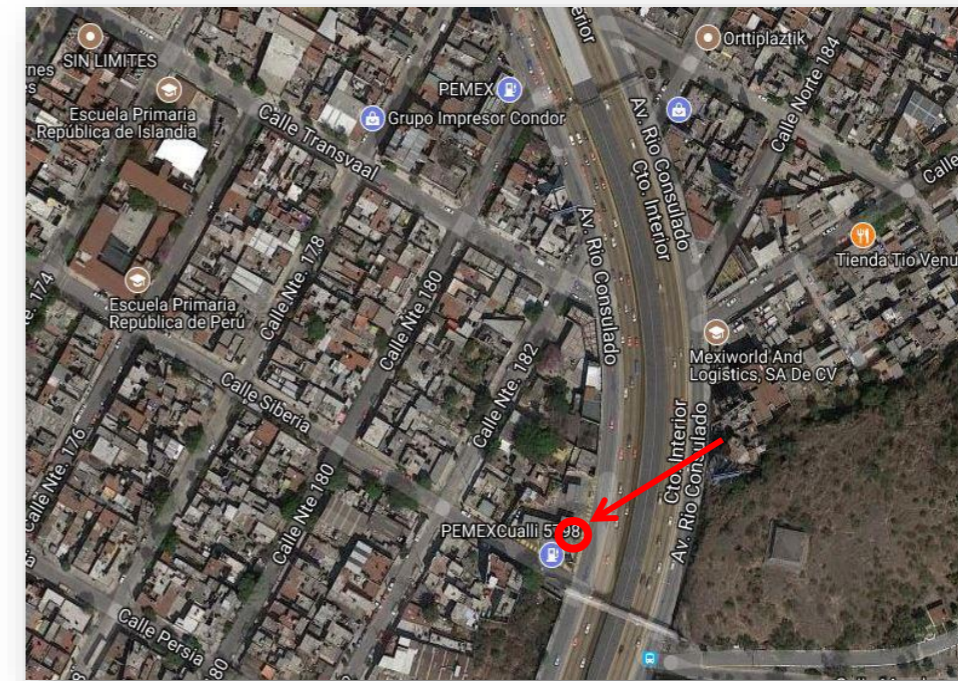
Coordenadas Topográficas X= 489,803.581  
Y= 2,147,151.916  
Z= 2,225.833

Ubicación Delegación Venustiano Carranza, Col. General Ignacio Zaragoza. Ciudad de México.

Observación V-16 ubicado en Boulevard Puerto Aéreo, sobre la banqueta inferior del final del distribuidor vial, frente al cruce con Av. 4. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.



Peñón – Paseo de la Reforma



Coordenadas Geográficas 19°25'02.37302" N  
99°05'53.12668" W

Coordenadas UTM X= 489,701.965  
Y= 2,147,007.612

Coordenadas Topográficas X= 489,702.269  
Y= 2,147,005.045  
Z= 2,225.59,1

Ubicación Delegación Venustiano Carranza, Col. General Ignacio Zaragoza. Ciudad de México.

Observación V-17 ubicado en Boulevard Puerto Aéreo, sobre la banqueta derecha, frente al Monumento a la Emigración Libanesa. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.

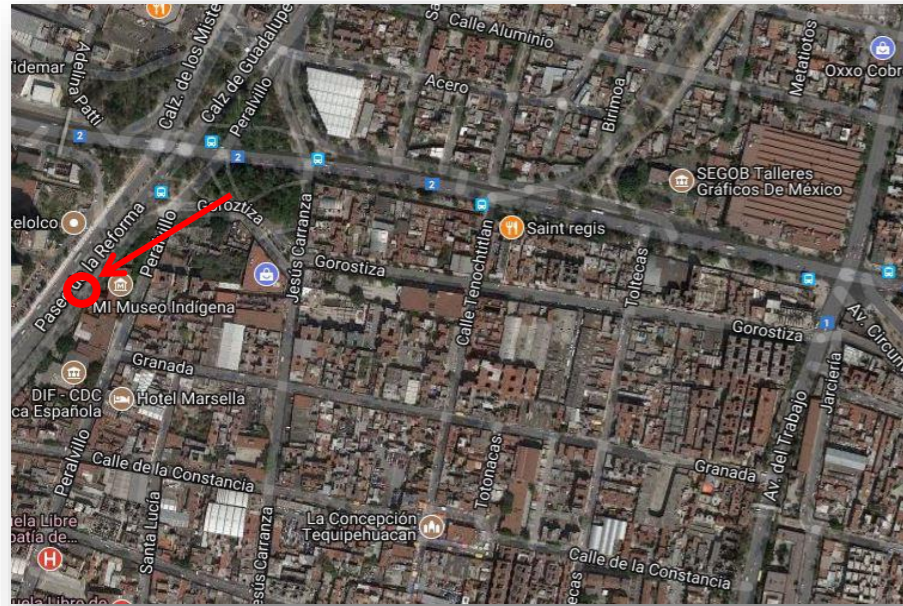
Coordenadas Geográficas 19°26'25.93802" N  
99°05'08.52206" W

Coordenadas UTM X= 491,004.024  
Y= 2,149,575.453

Coordenadas Topográficas X=491,004.024  
Y=2,149,575.453  
Z=2,243.708

Ubicación Delegación Venustiano Carranza, Col. Pensador Mexicano. Ciudad de México.

Observación V-1 ubicado en Av. Río Consulado, sobre la banqueta, frente a la gasolinera, casi esquina con Calle Siberia. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.



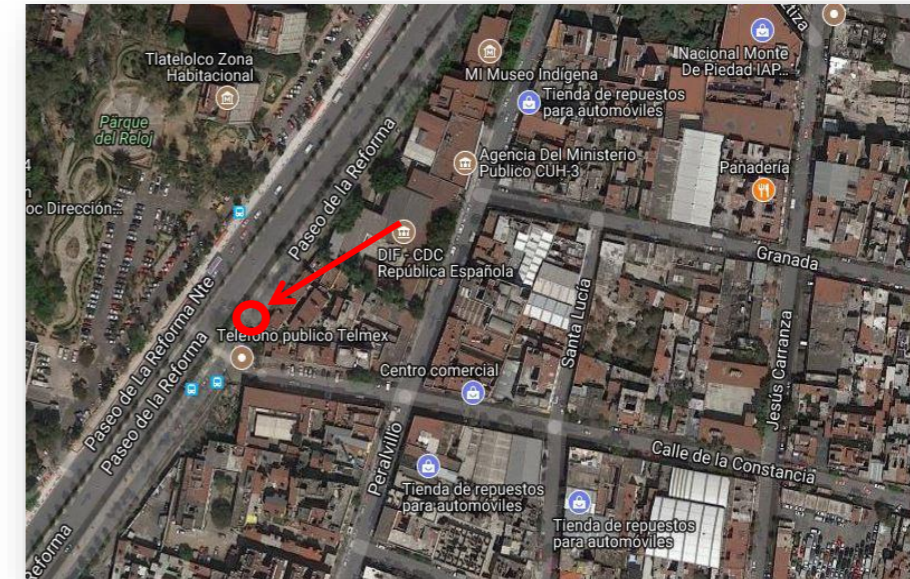
Coordenadas Geográficas 19°27'06.64112" N  
99°07'54.00747" W

Coordenadas UTM X=486,179.703  
Y= 2,150,829.593

Coordenadas Topográficas X=486,175.470  
Y=2,150,828.129  
Z=2,228.992

Ubicación Delegación Cuauhtémoc, Col. Morelos. Ciudad de México.

Observación V-28 ubicado en Paseo de la Reforma, sobre la banquetta, a unos pasos del monumento, frente al Museo Indígena. Marcado con un clavo de concreto, pintura color naranja y número de vértice.



Coordenadas Geográficas 19°27'03.50973" N  
99°07'56.49714" W

Coordenadas UTM X= 486,107.040  
Y= 2,150,733.399

Coordenadas Topográficas X=486,102.800  
Y=2,150,731.826  
Z=2,228.972

Ubicación Delegación Cuauhtémoc, Col. Morelos. Ciudad de México.

Observación V-30 en la Placa V09216 del INEGI.

## Observaciones y Recomendaciones

Como resultado del análisis realizado a partir de los datos de campo de geología y geofísica

Se identificó lo siguiente.

.- Existen en la zona dos sistemas de discontinuidades con distinto origen, uno debido al enfriamiento y deformación de la roca volcánica como unidad más antigua expuesta. Siendo material de origen volcánico asociados con derrames de lava, al enfriarse se contrae formando fracturas mismas que actual como zonas de debilidad mecánica. La orientación que presentan obedece al eje mayor de la estructura y del contorno de los derrames deducidos a partir de la morfología presentada. El segundo sistema de lineamientos es debido a la subsidencia regional de origen multifactorial, aunque primordialmente es debida a la extracción de agua del subsuelo, esas se presentan en los sedimentos lacustres poco consolidados que cubren parcialmente la estructura volcánica, su orientación es coincidente con las curvas de nivel que definen el relieve del área estudiada, evidenciando su origen por diferencia de competencia de los materiales involucrados y geotécnicamente asociados a zona de transición.

.- A partir de perfiles gravimétricos se identificaron lineamientos correlacionables, que además son coincidentes con epicentros someros registrados en el área de estudio, por lo que se asociaron a fallas activas, que por sus relaciones geométricas resultan ser tipo normal consistente con aquellas descritas en la literatura de escala regional.

.- El detalle de la información obtenida hace necesario que los estudios realizados se extiendan a áreas circundantes del resto de la ciudad para estimar sus efectos en caso de contingencia y su impacto a la población. La integración de información permitirá hacer una interpretación regional, contribuyendo en gran medida al conocimiento del subsuelo

de la ciudad de México, facilitando así la toma de decisiones en caso de posibles eventualidades.

## Bibliografía

- A. Jaimes, M., Reinoso, E., Ordaz, M., & Arredondo, C. (2009). Correlación entre la Aceleración y Velocidad Máxima del Suelo: Aplicación en el Análisis del peligro sísmico. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 19-35.
- Abraham, D.-R. J. (s.f.). *Los suelos Lacustres de la Ciudad de México* .
- Albano, M., Polcare, M., Bignami, C., Moro, M., Saroli, M., & Stramundo, S. (2016). An Innovative Procedure for Monitoring the Change in Soil Seismic Response by InSAR data: Application to the Mexico City Subsidence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 143-158.
- Angel, P. (1973). *Obras hidráulicas prehispánicas en el Sistema Lacustre del Valle del México* . Instituto Nacional de Antropología e Historia .
- Aroyo, D., Ordaz, M., Ovando-Shelley, E., C. Guasch, J., Lermo, J., Pérez, C., . . . Ramírez-Centeno, M. (2013). Evaluation of the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City producer by ground subsidence throw the use of site amplification factors. *Soil Dynamics and Earthquakes Engeenering*, 54-66.
- Arturo, M. R. (s.f.). *Interpretación Geológica de la Línea sísmica L2/13 del levantamiento sísmico de reflexión en la ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana .
- Avilés, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2010). Regional Subsidence of Mexico City and its effects on seismic response . *Soil Dynamics and Earthquake Enginnering* , 981-989.
- Cabral Cano, E., Díaz Molina, O., & Delgado Granados, H. (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.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., & Galloway, D. (s.f.). *Land Subsidence, Associated Hazards*.
- Castellazzi, P., Aroyo-Domínguez, N., Martel, R., I. Calderhed, A., C. L. Normand, J., Gárfias, J., & Rivera, A. (2016). Land Subsidence in Major Cities of Central Mexico: Interpreting InSAR - derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Apllied Earth Observation and Geoinformation*, 102-111.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Texcoco (1507) ,Estado de México* .
- Cortes, A., D.Arizabalo, R., & Rocha, R. (1989). Estudio Hidrogeoquimico Isotopico de manantiales de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional* , 265-282.
- Delgado , H., Molinero, R., Cervantes , P., Nieto-Obregón , J., Santa-Cruz, R., Marcías-González, H., . . . Silva-Romo , G. (1998). Geology of Xitle Volcano in Southern Mexico City - a 2000-year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revistas Mexicanas de Ciencias Biológicas*, 115-131.
- Dimitris, H. H. (2011). *Estratigrafía y Análisis Defacies de los sedimentos lacustres del cuaternario tardio de la cuenca de chalco,México* . Ciudad de México .
- Eduardo, H. P. (s.f.). *Sismicidad y el campo de Esfuerzos en la Cuenca de México* .
- Eduardo, R. A. (2007). *Riesgo Sísmico de la Ciudad de México* . Ciudad de México .
- Eduardo, R. (s.f.). *Características Sísmicas de la Ciudad de México: Amplificación de las ondas sísmicas en el Valle de México,características del movimiento del terreno y Microzonificación de la ciudad*.
- Efrain, G. V. (2003). *Comportamiento Dinamico de los Edificios Provistos con Dispositivos Disipadores de Enegia* .
- (2005). *Estudio Geohidrologico en el fraccionamiento ,Lomas Verdes*. Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México .
- Gabriela, L. I. (2014). *Respuesta Hidrogeofísica del Acuitardo de la Ciudad de México* . México D.F.
- García-Palomo, A., Zamorano, J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 158-178.
- González, C. J. (1993). *Ubicación e Importancia Del Templo De Xipe Tótec en la parcialidad Tenochca de Moyotlan*.
- Holzel, M., Faber, R., & Waigreich, M. (2008). DeCompactionTool: Software for subsidence analysis including. *Computers & Geosciences*, 1454- 1460.
- Jaimes-Palomera, L., Cortes-Silva, A., Vazquez-Sánchez, E., Aravena, R., Fritz, P., & Drimmie, R. (1989). Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Geofísica Internacional*, 219-244.
- María, C. A. (2008). *Atlas Multidisciplinario y de riesgo Geotécnico de la zona conurbada al Norponiente del valle de México*.

- Martínez-González, J., Lermo-Samaniego, J., Sánchez-Sesma, F., Ángulo-Carrillo, J., Valle-Orozco, R., & Ordoñez-Alfaro, J. (s.f.). *Effects of the Subsidence on the Changes of*. Cuernavaca ,México .
- Morales Casique, E., A.Escolero , O., & L.Arsel , J. (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Biológicas.*, 64-75.
- Osmanoglu, B., H. Dixon, T., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistence scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* , 1-12.
- Ovando- Shelley, E., Ossa, A., & Santoyo, E. (2013). Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* , 157-167.
- Ovando-Shelley, E., Lermo-Samaniego, J., Auvinet, G., & Méndez-Sánchez, E. (2012). Microtremor measurements to identify zones of potential fissuring in. *Geofísica Internacional*, 143-156.
- Réne Morales, L., Palacios Vélez, O., Marín Stillman , L., & Peña Díaz , S. (2000). Dirección de Flujo y Clasificación del agua Subterránea , en monte alegre ,Sierra de Ajusco México . *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe ,España y Portugal* , 667-687.
- Rodríguez C., R., & Ochoa A., C. (1989). Estudio geoelectrico del sistema acuifero de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 191-205.
- Rodríguez-Castillo, R., & Gonzalez-Moran, T. (1989). Comportamiento hidrodinámico del sistema acuifero de la subcuenca de Chalco, México. *Geofísica Internacional*, 207-217.
- Romero, R. d. (2011). *Sintesis de la Geología en México*. Barcelona .
- S., L.-G. (1989). Palinología y Paleoambiente Pleistocenicos de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 335-362.
- Sanchez, R. J. (1989). Geology and tectonics of the basin of Mexico and their relationship with the damage caused by the earthquakes of September 1985. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 17-28.
- SEDATU. (2014). *Atlas de Riesgos del Municipio de Naucalpan de Juárez*. Naucalpan, Estado de México.
- SGM. (2014). *Panorama Minero del Estado de México*.
- Sowter, A., Bin Che Amat, M., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., & Alshammari, L. (2016). Mexico City land subsidence in 2014-2015 with sentinel-1 IW TOPS: Results using the Inttermitent SBAS (ISBAS) Technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 230-242.
- Tapia-Varela, G., & López-Blanco, J. (s.f.). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la. *VareRlaevy iLstóap Meze-Bxilcaanncao de Ciencias Geológicas*, 50-65.
- Vanessa, R. O. (2014). *Interpretación Estructural con Secciones Sísmicas de la zona poniente del Valle de México* . Ciudad de México .
- Vazquez -Sanchez, E., & Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*.
- Vazquez-Sánchez, E., & jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 133-190.
- Yussim, S., Flores-Estrella, H., & Lomnitz, C. (2007). Seismic response of the Mexico City Basin: A review. *Springer Science+Business*, 357-372.

## Glosario de Términos

### A

**Aceleración sísmica.** Aceleración del terreno producida por las ondas sísmicas generadas por un terremoto.

**Acelerógrafo.** Instrumento que sirve para registrar la aceleración del terreno en función del tiempo.

**Agrietamiento:** fractura del terreno sin desplazamientos relativos de las partes separadas.

**Altitud.** El ángulo vertical entre el plano del horizonte y la línea al punto observado, como una estrella, por ejemplo. La distancia vertical entre un punto y un plano o datum de referencia, usualmente el nivel medio del mar o geoide.

**Anomalía.** Conjunto de valores de las propiedades física de los materiales que salen del parámetro normal.

**Anomalía De Aire Libre.** Residuo de aceleración gravitacional que queda luego de la corrección de una medida por una gravedad teórica, usualmente la fórmula gravimétrica internacional, y la corrección de aire libre.

**Anomalía de Bouguer** Es la atracción gravitacional que queda de residuo luego de corregir la medida de la componente vertical de la aceleración gravitacional en un punto por: A) La gravedad teórica en ese punto, usualmente utilizando el Campo Gravitacional de Referencia Internacional. B) La corrección de aire libre. C) La corrección de Bouguer. D) La corrección por elevación topográfica, usualmente corregida al nivel del mar. Esta anomalía fundamental de gravedad refleja todas las variaciones en densidad a partir de las esperadas para un modelo de Tierra homogéneo.

**Anomalía Gravimétrica.** Es la aceleración gravitacional restante luego de tener en cuenta otros factores que se sustraen o se suman. Son comunes las anomalías de Bouguer, de

aire libre, e isostática, pero también es anomalía gravimétrica cualquier aceleración restante luego de tener en cuenta diferentes modelos de atracción gravitatoria.

### B

**Basamento:** capa por debajo de los depósitos sedimentarios considerada la más antigua de todas.

### C

**Corrección De Aire Libre.** Corrección aplicada a una medida de gravedad que tiene en cuenta la variación de la gravedad con la altura sobre un nivel de referencia, generalmente el nivel del mar. Esta corrección asume que hay aire solo entre la estación y el nivel de referencia, y es de 0,3086 mgal / m.

**Corrección De Bouguer.** Es la corrección aplicada a la medida de la aceleración de la gravedad, debido al exceso y déficit de masa entre la estación de observación y alguna altura de referencia. La corrección es:  $0,4185 \rho h$ , donde  $\rho$  es la densidad de dicha masa en Kg. / m<sup>3</sup> y  $h$  es la altura entre los dos puntos.

**Cuenca:** Territorio rodeado de alturas, cuyas aguas afluyen a un mismo río, lago o mar.

### E

**Endorreico:** Que no cuenta con desembocadura hacia el mar.

### F

**Fallamiento:** rotura o abertura producida por esfuerzos con un desplazamiento evidente.

**Formación:** unidad litoestratigráfica fundamental. Cuerpo de rocas identificado por sus características litológicas y su posición estratigráfica.

**Fracturamiento:** rotura o abertura producida por esfuerzos.

**G**

**Geoide.** Superficie equipotencial del nivel-del-mar a la cual la dirección de la gravedad es perpendicular en todas partes. La figura de la Tierra considerada como una superficie del nivel-medio-del-mar si los continentes no existiesen.

**Gravedad.** La fuerza ejercida por la Tierra y por su rotación sobre la masa de los cuerpos; la aceleración que le imparte a un cuerpo que cae libremente en ausencia de fuerzas de fricción. La fuerza resultante sobre cualquier cuerpo de materia en la Tierra o cerca de su superficie exterior debido a la atracción por la Tierra y a su rotación alrededor de su eje.

**Gravímetro.** Instrumento para medir las variaciones de la gravedad terrestre.

**H**

**Horizonte:** Unidad litológica de tiempo geológico reducido.

**I**

**Intemperismo:** conjunto de factores externos que actúan sobre la roca produciendo alteraciones mecánicas y físicas.

**L**

**Lahares:** colada de lodo originada en las pendientes, cuando el material volcánico es saturado con agua.

**Laminación:** proceso geológico mediante el cual las rocas de textura fina, debido a las presiones, adelgazan llegando a formar estructuras semejantes a hojas.

**M**

**Micrítico:** depositado inorgánico o bioquímico formado dentro de la cuenca de deposición.

Facies: conjunto de características biológicas o litológicas que caracterizan a un conjunto rocoso.

**N**

**Nódulos:** concreciones que se forman en las rocas sedimentarias por precipitación de ciertas sustancias, generalmente carbonatos.

**P**

**Periglacial:** zona externa de los depósitos glaciares.

**Piroclástos:** detritos formados por la acumulación de partículas sólidas expulsadas por un volcán.

**Prospección.** Conjunto de trabajos en orden a la búsqueda de testigos o a la explotación de yacimientos de minerales. La prospección geofísica consiste esencialmente en la medición de constantes físicas (densidad, características magnéticas, rigidez) de las rocas del subsuelo. Va precedida de un estudio geológico encaminado a conocer datos relativos a la constitución estratigráfica y petrográfica del terreno y a conocer su tectónica. El último estadio lo constituye el sondeo mecánico.

**U**

**Unidades cronoestratigráficas:** Son las divisiones utilizadas en geología histórica que sirven de base material para formar la escala temporal geológica y pretenden representar el total de los cuerpos de roca de la tierra según su tiempo relativo de formación, y son conocidas como: Eonotema, Eratema, Sistema, Serie y Piso.

**V**

**Vetillas:** estructura paralelepípeda generalmente mineralizada, de espesor y longitud con rango de milímetros a centímetros.



## Z

**Zona de subducción:** término utilizado en la teoría de la tectónica de placas para señalar la penetración de la masa rocosa de una placa por debajo de la otra.

## Créditos

### **Jefe de Gobierno de la CDMX**

Dr. Miguel Ángel Mancera Espinosa

### **Secretario de Protección Civil de la CDMX**

Ing. Fausto Lugo García

### **Dirección General de Prevención de la SPC**

Andrés Escobar Maya

### **Director General de Emergencias**

Pedro Martínez Cornejo

### **Instituto Politécnico Nacional**

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán "Ciencias de la Tierra"

Departamento de Posgrado