

## **CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL ESTUDIO DETALLADO DEL FRACTURAMIENTO EN DIFERENTES RAMAS DE LA GEOLOGÍA.**

Dentro de los campos donde se emplea el estudio detallado del fracturamiento, podemos dar como ejemplo los referentes a los yacimientos petroleros, mineros, geotécnicos y a los acuíferos, los que corresponden a aplicaciones dentro de las áreas extractivas de interés social, como son las industrias mineras, hidráulica y en especial del petróleo, donde su aplicación es de gran importancia y de la cual nos hemos enfocado y concluiremos exponiendo un ejemplo de aplicación directa. Por otro lado, la aplicación de su estudio dentro de las áreas de la construcción y la geología urbana, nos permite proyectar y edificar estructuras más adecuadas a los diferentes tipos de terrenos y entornos geológicos.

Dentro de la materia de protección civil, existe la aplicación directa al estudio del fracturamiento en zonas urbanas, en el caso de que el terreno donde se localizan los asentamientos humanos comience a comportarse de maneja riesgosa cuando empieza a ocurrir agrietamiento y fracturamiento en las estructuras de las construcciones civiles, lo cual genere el riesgo de que estas pierdan su estabilidad y con ello poner en riesgo la integridad física de personas. Su aplicación dentro de la protección civil, es detectar y prevenir posibles afectaciones por condiciones geológicas y estructurales dentro del entorno de los asentamientos humanos vulnerables.

En el presente capítulo se comentan las aplicaciones del fracturamiento dentro de las áreas de la geología petrolera y de la geología urbana en materia de protección civil.

En el caso de la geología petrolera se trata como ejemplo uno de los yacimientos naturalmente fracturados dentro de los campos Ku, Maloob y Zaap, que se encuentran dentro de la región marina en el Golfo de México en la denominada Sonda de Campeche, que por sus volúmenes de producción de aceite, aporta al país entre 70 y 80 % de la producción diaria, lo cual la consolidan como la más importante región petrolera de México. En el caso de la Protección Civil, se tratará lo referente a los principales fenómenos geológicos que afectan a los asentamientos humanos dentro del área metropolitana en el oriente del Valle de México.

### **5.1.- los campos Ku, Maloob y Zaap, como ejemplo de yacimientos naturalmente fracturados en México.**

**5.1.1.- Condiciones generales.** Ku Maloob Zaap (KMZ) se localizan frente a las costas del estado de Tabasco y Campeche, a 105 kilómetros al noreste de Ciudad del Carmen, Campeche. Su historia comenzó con el descubrimiento del campo Ku en 1980 por el Pozo Ha-1A que dio inicio a su producción en marzo de 1981. Posteriormente se descubrieron los campos Maloob en el año 1984 y Zaap en el año 1991. En la actualidad este activo se conforma por el campo Ku, Maloob, Zaap (KMZ), Bacab y Lum, los cuales toman su nombre en honor a la cultura maya que predominó en la zona de Campeche y Yucatán. En lengua maya su

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

significado es el siguiente: Ku – Nido; Maloob – Bueno; Zaap – Braza; Bacab – Columna; Lum – Tierra.

KMZ es uno de los principales campos productores de crudo pesado. Hasta el 2008, era el segundo complejo petrolero en importancia en el país en términos de reservas probadas de hidrocarburos y producción de crudo. En el 2009, el activo KMZ se convirtió en el lugar número uno a nivel nacional en la producción de crudo, cuenta en la actualidad con 28 plataformas marinas de las cuales 2 son plataformas de enlace, 5 habitacionales, 16 de perforación, 4 de producción y 1 de telecomunicaciones. KMZ cerró el año 2009, con 130 pozos operando.

**5.1.2.- Ubicación.** El Activo Integral Ku-Maloob-Zaap (AIKMZ) se ubica geográficamente dentro de aguas territoriales de la República Mexicana en el Golfo de México, frente a las costas de los estados de Campeche y Tabasco a 105 kilómetros de Ciudad del Carmen, Campeche (Figura 5.1), cubriendo un área aproximada de 149.5 kilómetros cuadrados.

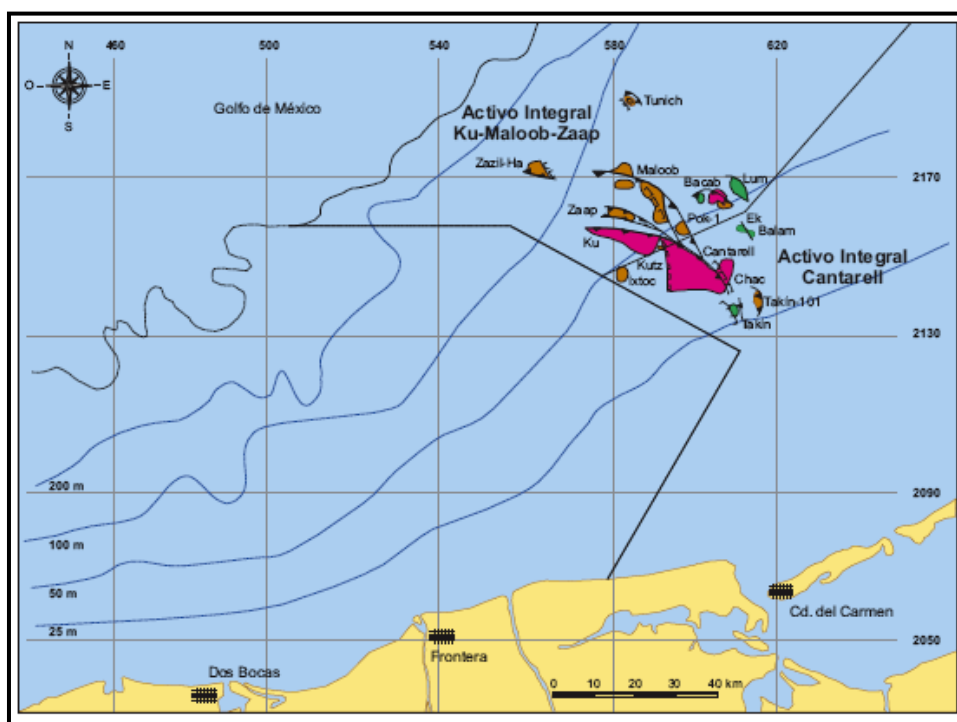


Figura 5.1. Ubicación del Activo Integral Ku-Maloob-Zaap (PEMEX, 2007).

Los Campos de KMZ, se localizan dentro de la llamada Sonda de Campeche la cual cubre un área aproximada de 16,500 Km<sup>2</sup>, a lo largo de las costas de los estados de Tabasco y Campeche en la parte Sur del Golfo de México. A su vez el Sureste de México se subdivide en varias provincias petroleras:

La figura 5.2, muestra las principales provincias productoras de petróleo en el Golfo de México: 1. Burgos. 2. Tampico-Misantla. 3. Veracruz. 4. Sonda de Campeche. 5. Salina del Itsmo. 6. Chiapas Tabasco. 7. Macuspana. 8. Sierra de Chiapas. Siendo la Sonda de Campeche la más importante por su producción y reservas, particularmente por los elementos geológico-petroleros que posee.

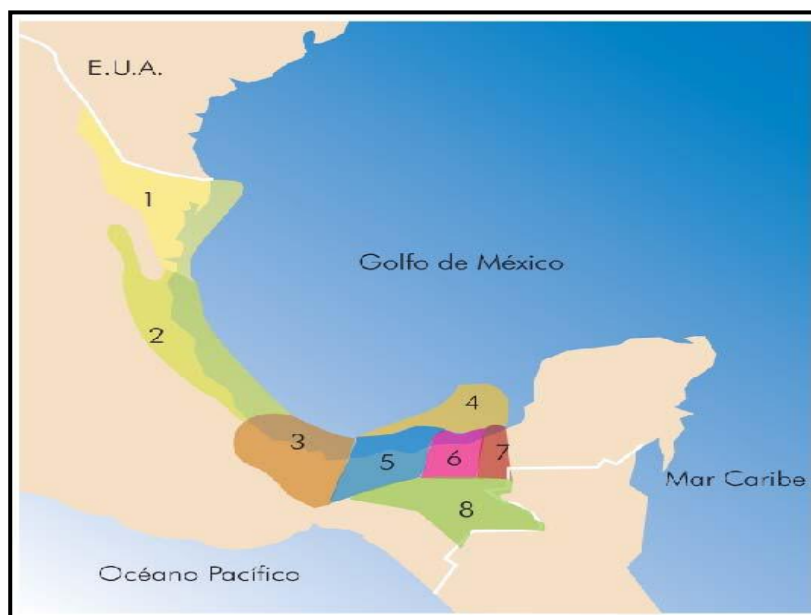


Figura 5.2. Provincias productoras de petróleo en el Golfo de México (Guzmán, 1999).

La administración y responsabilidad del AIKMZ, le corresponde a la Región Marina Noreste, localizada en el Sureste de México, costa afuera de los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, que incluyen parte de la Plataforma Continental y el Talud del Golfo de México. El Activo Integral Ku-Maloob-Zaap. Consta de los campos petroleros, Baksha, Kayab, Nab, Numán, Pohp, Tson y Zazil-Ha.

**5.1.3.- Marco Geológico Regional.** El marco geológico regional está encaminado a la evaluación geológica de una cuenca petrolera; permite contextualizar los modelos que serán utilizados para la caracterización de yacimientos y es la base para definir los sistemas petroleros de una región productora de hidrocarburos.

Las particularidades morfológicas, los estilos estructurales, las secuencias estratigráficas, y las propiedades roca-fluido que distinguen la geología de KMZ, son el resultado de eventos geológicos, tectónicos, estructurales y geoquímicos, que de forma regional y/o local actuaron en los periodos de la historia geológica de la región donde se localiza el complejo petrolero de KMZ.

Estos eventos naturales que han influido en los campos de KMZ, están íntimamente asociados a la sonda de Campeche, a la evolución del Golfo de México, y a las cuencas Cenozoicas del sureste. Estos acontecimientos, por una parte han propiciado fuertes deformaciones, como cabalgamientos, sistemas de fracturas, pilares y fosas tectónicas en el área, y de manera local han influido en la arquitectura de las trampas petroleras de los yacimientos; Los cuales cuando están en carbonatos son naturalmente fracturados. Por otro lado, los ambientes de depósito, los procesos geoquímicos y diagenéticos de la región, favorecieron primordialmente la formación de rocas carbonatadas con alta porosidad secundaria, así como rocas terrígenas principalmente arcillosas (lutitas), que empaquetan cuerpos delgados de arenas con buen potencial petrolero en KMZ y de manera general en la sonda de Campeche; la primeras secuencias sedimentarias depositadas se acumularon esencialmente en el Mesozoico y las ultimas secuencias en el Cenozoico.

Los elementos que constituyeron la fuente principal de aporte de sedimentos depositados durante el Mesozoico Tardío y todo el Cenozoico en la zona de estudio, estuvieron presentes desde los inicios del Jurásico, con la plataforma de Yucatán ubicada al norte del paleo Golfo de México y un paleo continente (Sierra de Chiapas) al suroeste. Es notable la presencia de horizontes de bentonita en varios intervalos de la secuencia sedimentaria, aunque son más abundantes en el Cenozoico, donde se encuentran intercaladas tanto en lutitas como en areniscas; estas cenizas volcánicas fueron transportadas por corrientes eólicas y acuáticas.

La actividad volcánica corresponde con una de las principales fuentes de aporte de sílice y magnesio, elementos que participan con mayor frecuencia en los procesos diagenéticos de las rocas. Otro hecho trascendente y considerable es la presencia y acumulación de lodos calcáreos y fragmentos de calizas integrados al depósito de los materiales clásticos, resultado de la erosión de la plataforma de Yucatán, constituyendo delgadas capas con detritos de carbonatos o cementando las rocas terrígenas; ocasionalmente se tienen flujos de detritos (brecha) como probable producto de la destrucción de bancos calcáreos.

En el contexto estructural, los esfuerzos transpresivos que plegaron las secuencias sedimentarias ocurrieron en el Oligoceno, evento ocasionado por la acción de la placa del Caribe con la placa de Norteamérica, formándose como resultado de la aplicación de esfuerzos los anticlinales alargados orientados NW-SE en la región marina, dando lugar al denominado evento Chiapaneco. Como resultado de este evento y por la gruesa carga de sedimentos clásticos del Paleoceno, la sal se plegó y se inyectó a niveles superiores donde fue expulsada formando diapiros y cuencas de desalajo de sal (minicuevas). Por efecto del movimiento de la sal, también se generan por sistemas de fracturas.

Los domos arcillosos que en forma errática se tienen en la columna Cenozoica donde no hay sal, tienen un origen muy parecido a lo anterior, ya que debido a su gran espesor, su alto límite elástico y a la abundante presencia de agua, se deformaron e inyectaron en niveles superiores de la misma manera que los domos, diapiros y canopies salinos.

Los cuerpos de sal y arcilla influyeron en forma directa en la formación de fallas normales ubicadas en el noroeste de nuestra zona de estudio incluyendo los yacimientos de KMZ, contribuyendo a la formación de trampas petroleras estructurales. Como culminación de este ciclo de deformación, durante el Mioceno-Plioceno ocurrieron esfuerzos compresivos verticales asociados a la carga litostática del relleno sedimentario terrígeno que origina extensión, por lo que se formaron los sistemas de fallas lítricas que delimitan la continuidad hacia el mar de las cuencas de Macuspana y Comalcalco; ocasionaron además, movimientos de la sal con el diapirismo a la Cuenca Salina del istmo. Esto generó una topografía muy irregular lo cual favoreció el que se originaran flujos turbidíticos de las arenas postmiocénicas que constituyen los yacimientos del Cenozoico tardío.

**5.1.4.- Generalidades de la cuenca del Golfo de México.** El origen del Golfo de México comienza desde el Triásico Tardío-Jurásico Temprano con el rompimiento del mega continente Pangea, el cual al separarse ocasionó la apertura de un

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

sector del Océano Atlántico y del Golfo de México; la etapa inicial de la apertura duró del orden de 46 Ma (Winker, Dickinson y Buffler, 1988), desde el Triásico Tardío (210 Ma) hasta el Jurásico Medio-Tardío (169 Ma).

El origen de la Cuenca del Golfo de México ha sido interpretado por muchos autores entre los cuales destacan: Moore y del Castillo, (1974); Pilger, (1978); Anderson y Schmidt, (1983); Dickinson y Coney, (1980); Coney, (1983); Pindell, (1985); Tardy (1986); Padilla y Sánchez (1986); Amos Salvador (1987 y 1991); Longoria (1987); Ross y Scotese (1988), Winker y Buffler (1988), Pundel (2005), Padilla y Sánchez (2007). Ellos coinciden en que el Golfo de México es consecuencia del rompimiento que deriva de las masas corticales en una zona de rift; en esta zona de divergencia ocurrió de forma contemporánea una fase de deformación distensiva que origina horst y grabens y en otros sectores fallamientos transcurrentes regionales; como son la falla transformante Tamaulipas-Oaxaca que tuvo un papel muy activo en la apertura y evolución tectónica del Golfo de México, y las fallas Texas, Walper, Megashear Mojave-Sonora, por mencionar algunas (Figura 5.3). Posterior al rompimiento de las masas corticales, la expansión y subsidencia del fondo oceánico durante el enfriamiento de sus márgenes pasivos, produjo el consecuente fracturamiento y fallamiento normal y lístrico de los bordes continentales, delineándose bloques sintéticos, antitéticos y rotacionales, como el Bloque de Yucatán y el Macizó de Chiapas entre otros.

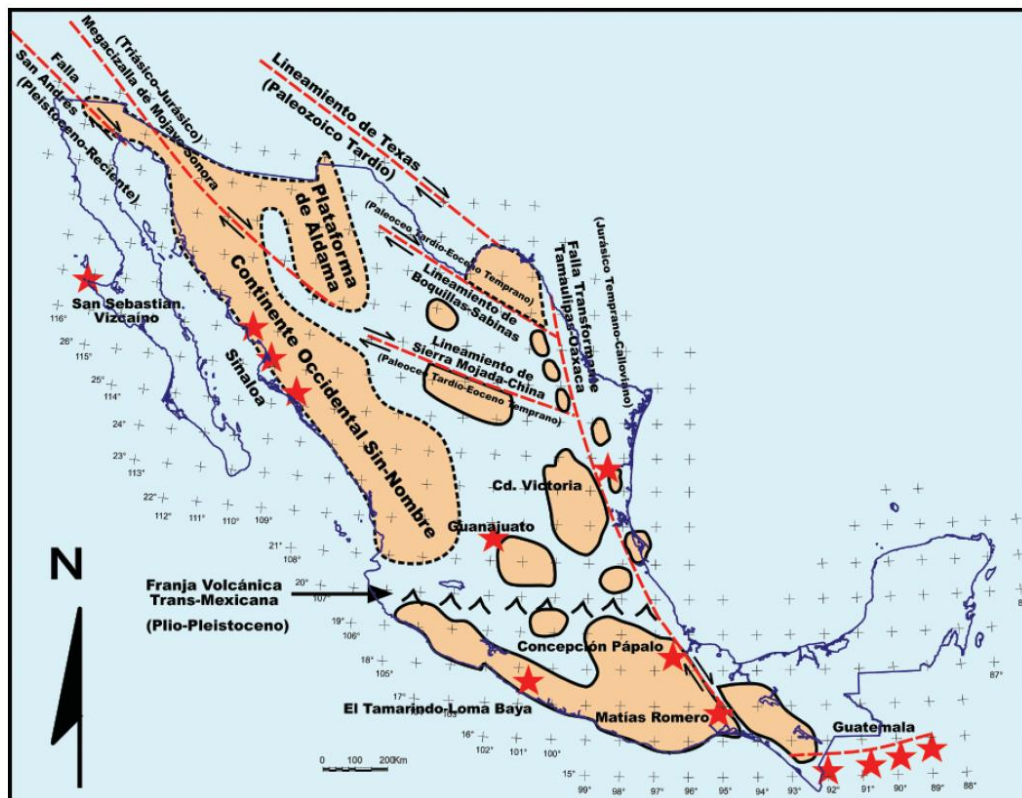


Figura 5.3. Estructuras regionales que se asocian al origen de la cuenca del Golfo de México (Padilla y Sánchez, 2007).

En la figura 5.3 se muestran las estructuras regionales que se asocian al origen de la cuenca del Golfo de México, la edad en que las fallas tuvieron movimiento

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

de desplazamiento lateral aparece en la imagen, las estrellas muestran la localización de afloramientos de rocas básicas y ultrabásicas serpentinizadas.

**5.1.5.- Unidades litoestratigráficas de los campos de KMZ.** Las rocas que conforman la columna estratigráfica de la zona (fig. 5.4), donde se ubican los yacimientos de KMZ, fueron depositadas en una cuenca sedimentaria dentro del ancestral Golfo de México, y han estado sujetas a varios factores que condicionan sus características, tales como la historia tectónica, los cambios globales del nivel del mar y la configuración y tipo de depósito dentro de la cuenca; más los procesos que controlan la sedimentación.

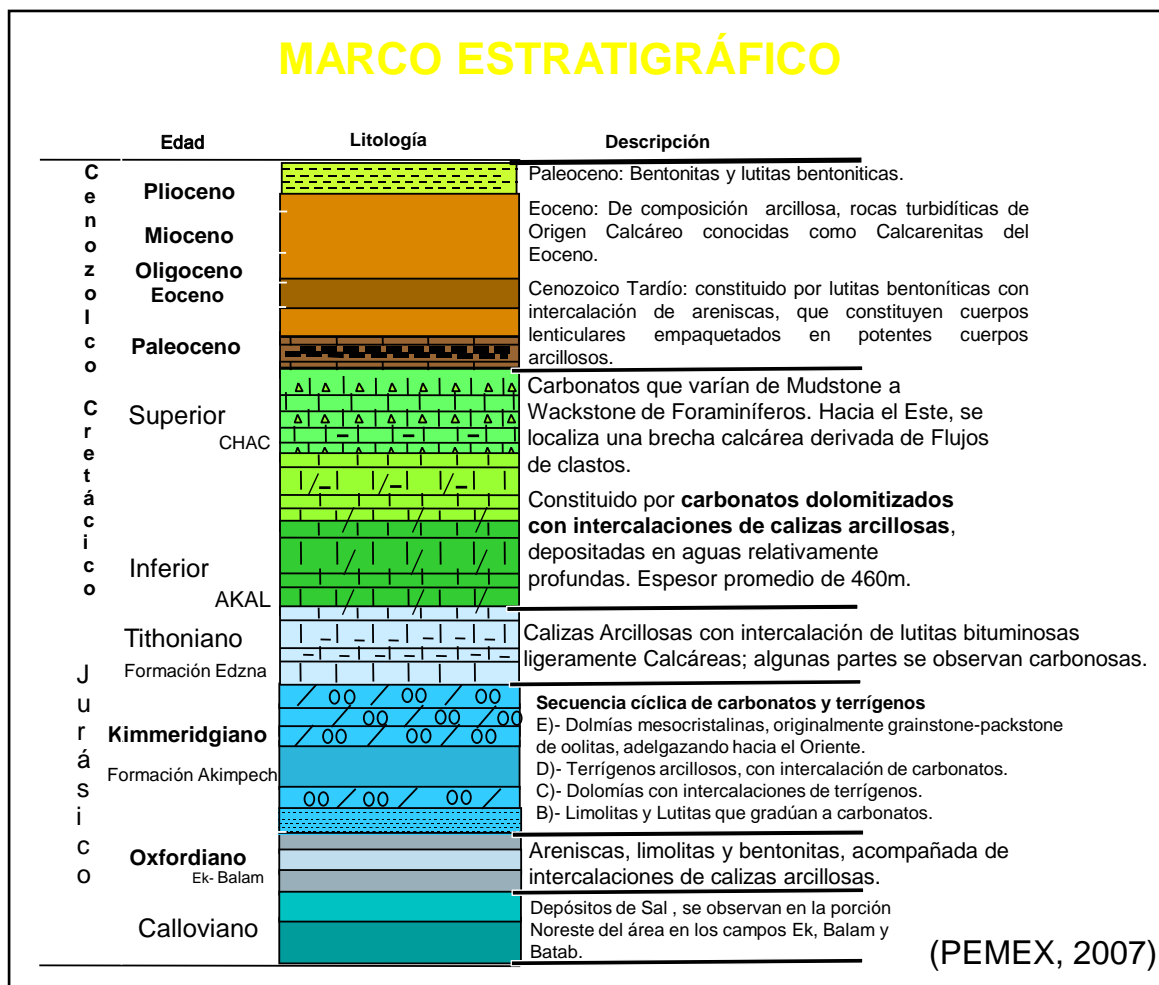


Figura 5.4. Columna Estratigráfica Regional de la Sonda de Campeche. (PEMEX, 2007).

Para el caso de la brecha calcárea, principal secuencia almacenadora de hidrocarburos se considera la concepción del modelo de depósito cuya arquitectura estratigráfica es producida por procesos normales en el talud de una plataforma calcárea (brecha de talud) y por un acontecimiento instantáneo y catastrófico que originó brecha de impacto (impacto del meteorito en Chicxulub Yucatán).

La columna estratigráfica de los campos de KMZ, está constituida por secuencias que van del Calloviano al Cenozoico, los sedimentos del Calloviano están formados por una gruesa columna evaporítica en la cual predomina la sal, los del

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Oxfordiano son principalmente mudstone y wackestone de litoclastos con intercalaciones de lutita, areniscas e intervalos donde predomina la dolomía; hacia la base presenta horizontes de anhidrita y sal.

Para el Kimeridgiano se tiene de manera generalizada dolomía mesocristalina con intercalaciones de lutitas, calizas oolíticas recristalizadas y ligeramente dolomitizados; en el Tithoniano también se han identificado lutitas negras calcáreas y fosilíferas, y lutitas con intercalaciones de wackestone y mudstone.

El Cretácico Inferior está compuesto por dolomía microcristalina, mudstone y wackestone de nanocónidos y tintínidos, hacia el Albiano-Cenomaniano predominan los carbonatos mudstone a wackestone arcilloso fracturados; también se tienen dolomías microcristalinas y nódulos aislados de pedernal. En el Cretácico Superior se tiene una secuencia compuesta de brechas derivadas de calizas dolomitizadas, con cementante arcilloso y calcáreo.

La estratigrafía del Terciario Tardío, se dividen en cinco unidades estratigráficas, algunas de las cuales han sido correlacionadas con sísmica en el área de estudio.

**5.1.5.1.- Mioceno Temprano.** se constituye principalmente de lutitas de color gris parcialmente arenosas con intercalaciones delgadas de areniscas ocasionalmente cementadas por carbonatos, también se llegan a observar pirita, micas diseminadas y horizontes de lodos calcáreos bentoníticos de color olivo interestratificados en la columna, o formando parte de las lutitas haciéndolas ligeramente calcáreas. En el área de estudio esta unidad se distribuye ampliamente, suprayace discordantemente a depósitos del Oligoceno y subyace concordantemente a depósitos del Mioceno Medio; la edad de estas rocas está fechada por la presencia del organismo *Globigerinoides Biesphericus*.

**5.1.5.2.- Mioceno Medio.** Está constituido por lutitas bentoníticas gris claro a olivo, que gradúan a lutitas arenosas con intercalaciones aisladas de areniscas gris claro, con cementante calcáreo y lodos calcáreos bentoníticos (mudstone bentonítico). También presenta horizontes calcáreos de probables algas estromatolíticas. Su distribución en el área es amplia, suprayace concordantemente a las rocas del Mioceno Inferior y subyace en forma parcialmente discordante, con rocas del Mioceno Superior en la porción oriental del área, donde también se observa afectada por fallas. Las rocas de esta edad están fechadas por la presencia del conjunto faunístico *Globorotalia mayeri*, *Globorotalia fohsi robusta*, *Globorotalia fohsi lobata* y *Globorotalia fohsi peripheroacuta*.

En los inicios del Mioceno Medio ocurrieron eventos tectónicos regionales que provocaron cambios en la sedimentación, estos eventos fueron:

- El movimiento lateral izquierdo del sistema de fallas Motagua-Palochic.
- Un episodio de metamorfismo dinámico a lo largo de la falla Tonalá-Motozintla localizada en el extremo sureste del Macizo de Chiapas (Meneses.1991, Ángeles-Aquino 1994).
- El movimiento lateral izquierdo a lo largo de las fallas de desplazamiento a rumbo de la sierra de Chiapas.

La contribución de estos esfuerzos, asociados al movimiento del bloque de Chortis (Coney, 1983) pudieron generar compresión oblicua, estructuras compresivas y transcurrentes. La subducción de la placa de Cocos debajo de la placa de Norteamérica y los eventos anteriormente descritos, es probable que hayan generado un sistema de esfuerzos compresivos máximos horizontales orientados hacia el noreste (Meneses, 1991; Miranda-Cansero, 1997), cuya consecuencia se infiere que fue la superficie de despegue en la secuencia salina, y las direcciones de los principales fallamientos y posición de las estructuras en la Sonda de Campeche y en los campos Ku, Maloob y Zaap.

**5.1.5.3.- Mioceno Superior.** Se compone de lutitas bentónicas de color gris verdoso a olivo, ligeramente plásticas, que gradúan a lutitas arenosas ligeramente calcáreas; se observan intercalaciones aisladas de lodos calcáreos bentónicos color café claro a olivo; también se presentan intercalaciones aisladas de arenas inmaduras con matriz arcillosa que gradúan a areniscas con cementante calcáreo. Su distribución en el área es amplia, suprayace en forma parcialmente discordante a depósitos del Mioceno Medio y subyace concordantemente a rocas del Plioceno Inferior. La edad de estas rocas está datada por la presencia del microorganismo fósil *Globorotalia juanai*. Al igual que el Mioceno Medio.

**5.1.5.4.- Plio-Pleistoceno.** Por sus características litológicas las secuencias que comprenden al Plioceno-Pleistoceno en la Sonda de Campeche, se divide en tres unidades estratigráficas de la siguiente forma:

**5.1.5.5.- Plioceno Temprano.** Está integrado por lutitas gris claro suaves y plásticas que gradúan a lutitas arenosas ligeramente calcáreas; se observan intercalaciones aisladas de arenas arcillosas y de lodos calcáreos de color café claro. Su distribución en el área es amplia pero irregular, debido a la paleomorfología del Mioceno que constituyó bloques escalonados a manera de fosas y pilares, se le encuentra formando grandes espesores: suprayace en forma concordante a rocas del Mioceno Superior y subyace en forma parcialmente discordante con rocas del Plioceno Medio. Las rocas de esta edad están definidas por la presencia de los organismos índice *Globorotalia margaritae* y *Globigerina nephentes*.

**5.1.5.6.- Plioceno Medio.** Está constituido por cuerpos potentes de lutitas gris claro semiplásticas parcialmente arenosas, con intercalaciones aisladas de cuerpos delgados de arenas claras translúcidas, de grano fino a medio con cuarzo detrítico ocasionalmente cementadas por carbonato de calcio (areniscas), tienen de buena a regular porosidad primaria intergranular. También se observan intercalaciones de lodos calcáreos bentónicos (Mudstone bentónico) de color crema a olivo y presencia de bioclastos. Al igual que el Plioceno Inferior su distribución regional es amplia pero de espesores irregulares debido a la paleomorfología del Neógeno, sin embargo en el área de estudio su distribución es muy regular. Los depósitos correspondientes a esta edad están definidos por la presencia del fósil denominado *Globigerinoides obliquus extremus*.

**5.1.5.7.- Plioceno Superior-Pleistoceno.** Las rocas de esta edad han sido fechadas por un gran conjunto faunístico, sin embargo la aparición de los organismos *Globorotalia tosaensis* y *Globorotalia miocénica*, marcan su inicio. Los



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

depósitos de este nivel estratigráfico de acuerdo a sus características litológicas se pueden dividir en dos partes:

La base, que constituye rocas primordialmente arcillosas, está representada por lutitas gris a gris claro semiplásticas parcialmente arenosas, con intercalaciones aisladas de cuerpos delgados de arenas arcillosas que gradúan a areniscas, con cementante calcáreo y porosidad primaria intergranular. También se observan en este nivel intercalaciones aisladas de lodos calcáreos bentoníticos (Mudstone bentonítico) y presencia de bioclastos.

La cima, constituye una secuencia de cuerpos potentes de lutitas bentoníticas con intercalaciones de cuerpos delgados de arenas. Las lutitas son de color gris a gris olivo, suaves semiplásticas, en partes calcáreas y arenosas. Las arenas son color gris claro, de grano fino a medio, constituidas por cuarzo detrítico cementado por carbonato de calcio, constituyendo areniscas con cementante calcáreo, con porosidad primaria intergranular. Estas arenas contienen horizontes de lodos calcáreos color crema, abundantes bioclastos y como accesorio presentan pirita diseminada.

Finalmente, es importante comentar que durante el periodo Mioceno Medio-Pleistoceno, ocurrieron varios eventos tectónicos como fueron: la actividad epirogenética expandida; el movimiento de la falla regional y el deslizamiento arrumbo; la actividad volcánica que modificó el relieve de la sierra Madre del Sur; la subsidencia activa de las cuencas cenozoicas de la Costa del Golfo de México, con depositación contemporánea de paquetes de sedimentos clásticos del Mioceno, y el movimiento halocinético activo generando diapiros de sal.

El sometimiento de esfuerzos de tensión generados a consecuencia de lo ya mencionado, contribuyó a la formación de numerosas fallas lítricas y normales, con una combinación de fallamiento sintético y antitético así como diapirismo lutítico, prevaleciendo como estilos dominantes de deformación en la región noreste de la Sonda de Campeche.

**5.1.6.- Geología estructural.** En la región donde se localiza Ku-Maloob-Zaap y en general en la Sonda de Campeche, podemos reconocer tres estilos estructurales principales:

Uno consecuencia de esfuerzos que originaron el ancestral Golfo de México, causando deformación con extensión, que se llevó a cabo durante el Triásico-Jurásico Medio, que generó fallas normales con sensible dirección norte sur en toda la región; en conjunto este sistema formó horst y grabens que se reconocen en el subsuelo.

Otro ocasionado por esfuerzos de compresión con direcciones horizontales y subhorizontales, llevados a cabo durante el Cretácico Tardío-Terciario Temprano que provocó el basculamiento de bloques, fallamiento inverso y plegamiento.

Un tercero transpresivo llevado a cabo durante el Oligoceno-Mioceno que ocasionó deformaciones con fallas laterales con sensible dirección NW-SE, sobreponiéndose en ocasiones los estilos anteriores y favoreciendo la

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

deformación de cuerpos salinos que inyectaron la sal a niveles superiores formando domos y diapiros, además fallas normales radiales y fracturamiento en bloques.

Como última etapa ocurrió un periodo de relajamiento de la cubierta sedimentaria más reciente dando lugar a una gran cantidad de fallas normales, lístricas y de crecimiento que generaron cuencas de depósito como lo son las de Macuspana y Comalcalco.

Como culminación de este ciclo de deformación durante el Mioceno-Plioceno, ocurrieron esfuerzos que originaron deformación por extensión que dieron lugar a un sistema de fallas lístricas que delimitan las cuencas que se extendieron hacia el mar. Esto generó una topografía muy irregular que condicionó los depósitos que constituyen los yacimientos del Cenozoico Tardío. Ángeles-Aquino (1982), clasificó dicha topografía de la sonda de Campeche en seis provincias morfoestructurales (figura 5.5), dentro de una de las cuales está ubicada el área de KMZ.

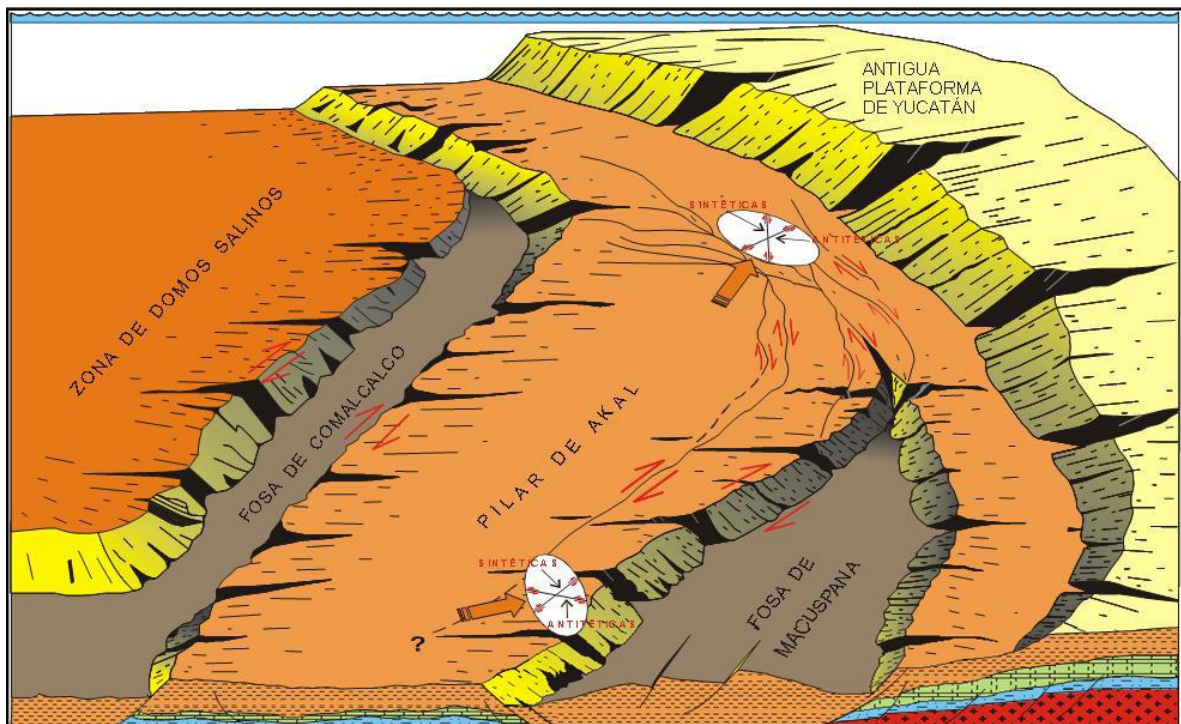


Figura 5.5.- Esquema de la morfología estructural de la sonda de Campeche. 1.- Antigua Plataforma de Yucatán, 2.- Zona de talud, 3.- Fosa de Macuspana, 4.- Pilar de Akal, 5.- Fosa de Le-Acach, 6.- Zona de domos salinos (Ángeles-Aquino, 1982).

Las principales características de estas provincias son:

**5.1.6.1.- Antigua Plataforma de Yucatán:** Se localiza en la porción oriental de la Sonda de Campeche, la constituyen principalmente carbonatos de plataforma.

**5.1.6.2.- Zona de Talud:** Es la zona de transición entre la cuenca y la antigua plataforma de Yucatán, la constituyen principalmente brechas de talud.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

**5.1.6.3.- Fosa de Macuspana:** Es la prolongación de la cuenca de Macuspana al mar, se caracteriza por intensa deformación salina y rellenos terrígenos del Terciario Tardío.

**5.1.6.4.- Pilar de Akal:** Se localiza en la porción central de la sonda de Campeche. Esta provincia es la principal productora de hidrocarburos en rocas carbonatadas fracturadas del Mesozoico y en las brechas del límite K – T.

**5.1.6.5.- Fosa de Le-Acach:** Es la prolongación de la cuenca de Comalcalco hacia el mar, la constituyen principalmente rellenos terrígenos del Terciario Tardío.

**5.1.6.6.- Zona de Domos:** Se localiza en la porción occidental de la sonda de Campeche y está constituida principalmente por domos e intrusiones salinas.

**5.1.7.- Elementos Estructurales de la Sonda de Campeche.** Se han definido los principales elementos estructurales de la sonda de Campeche y KMZ, estos son: cinturón plegado Chuktah-Tamil, cinturón plegado Akal, cuenca de Macuspana marina y cuenca Le-Acach (Comalcalco marina). A continuación se describen sus principales características:

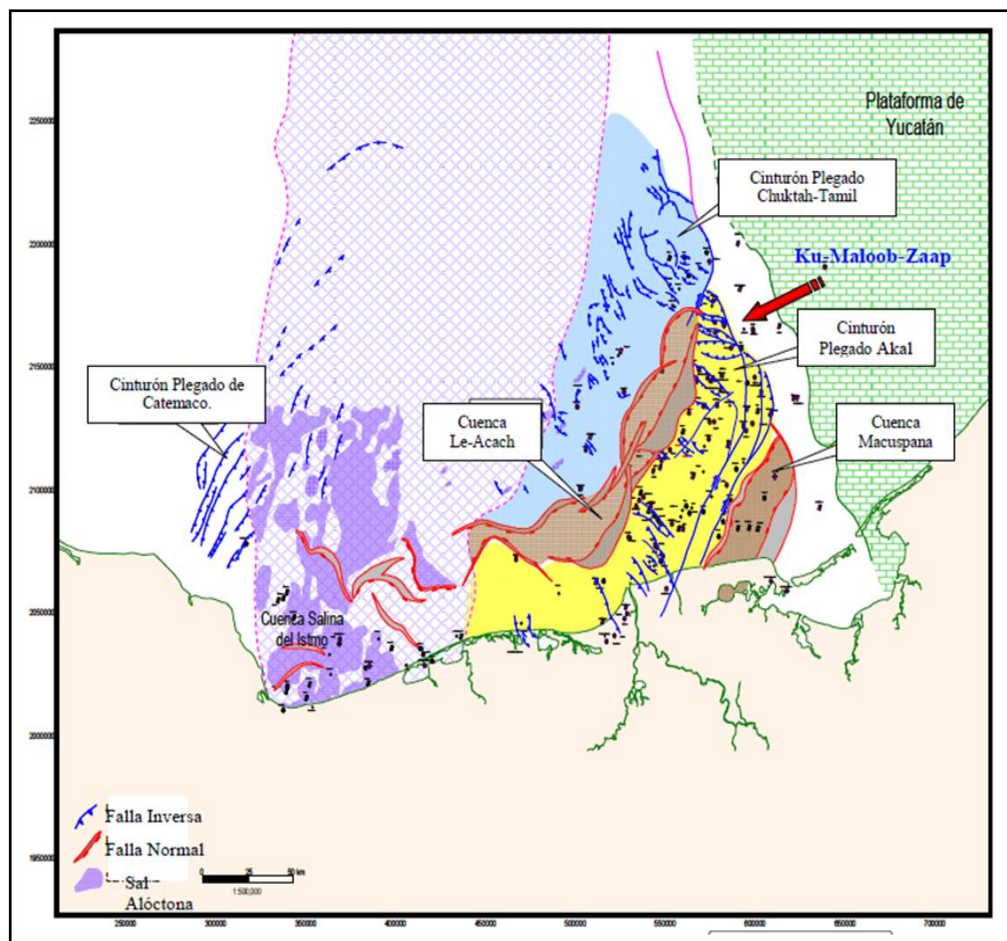


Figura 5.6. Mapa de los principales elementos estructurales de la Región Marina (PEMEX 2007).

## Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Los principales rasgos estructurales que forman las trampas en las que se alojan los yacimientos de Ku-Maloob-Zaap en el Mesozoico y Cenozoico, son producto de diferentes fases de deformación que originaron estructuras de plegamiento, fallamiento inverso, fracturamiento, etc. También se observan sistemas de fallas normales dentro del paquete pre-deformación Mioceno. Las estructuras características en KMZ, se han agrupado de acuerdo a sus características en los siguientes 7 tipos:

- Fallas de desplazamiento lateral.
- Estructuras de cabalgamiento.
- Fallas antitéticas.
- Fallas inversas y pliegues.
- Superficie de erosión.
- Fallas normales.
- Estructuras producidas por gravedad.

La figura 5.7, corresponde con una sección sísmica representativa de KMZ en la que se pueden observar 13 estructuras típicas.

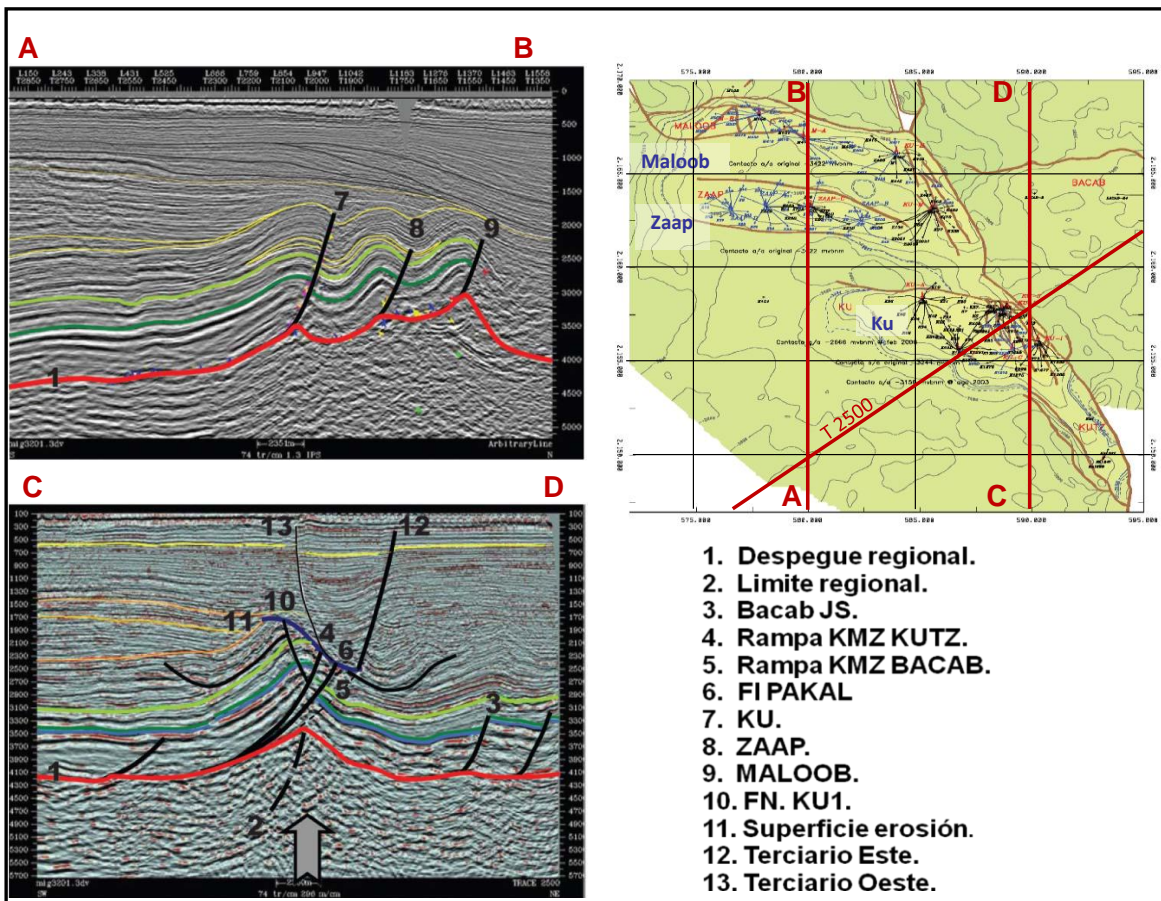


Figura 5.7. Interpretación sísmica con secciones en dirección N –S, en la traza 2500, donde se observan las estructuras presentes en los yacimientos de Ku-Maloob-Zaap (PEMEX 2007).

**5.1.7.1.- Falla de desplazamiento lateral.** La principal falla de este tipo se denomina límite-regional, es probable que esté relacionada con varias fallas paralelas, pero debido a que la resolución de la información sísmica en esta zona

de fallas es muy compleja, se infiere que se trata de una zona principal de desplazamiento de cizalla integrada por falla de desplazamiento lateral derecho, dicha zona de fallas tiene una orientación NW-SE (Azimut 330°), además la zona de fallas de desplazamiento presenta cabalgamiento, como se manifiesta en la repetición de formaciones Cretácicas.

**5.1.7.2.- Estructuras de cabalgamiento.** El efecto del esfuerzo compresivo principal generó cabalgamientos, los cuales están presentes por lo menos desde Ku hasta Maloob, en el campo Ku es más evidente dicho cabalgamiento, ya que ha sido posible interpretar una estructura duplex o cabalgamiento imbricado.

De acuerdo con Murillo y Figueroa (2004), la carpeta sedimentaria dentro de la sonda de Campeche se desplazó originalmente hacia el norte cuando actuaron los esfuerzos compresivos, encontrando resistencia en las proximidades del bloque de Yucatán, donde ocurrió una segmentación vectorial de los esfuerzos, ocasionando una compresión neta con cabalgamiento en el área de Cantarell, y desplazamiento lateral en el área Ku-Maloob-Zaap, como consecuencia, los cabalgamientos de Ku y del alto estructural de Maloob son de escala muy inferior al de Cantarell sobre Sihil, y por lo mismo la deformación interna no es comparable; es importante considerar que la orientación de las estructuras en Ku y Maloob están influidas por la ubicación dentro de la principal zona de desplazamiento, no obstante, todas las estructuras plegadas y cabalgadas son el producto del mismo sistema de esfuerzos compresivos regionales que originaron estructuras con características de pliegue en curvatura de falla y en el caso de Ku y Akal con formación de duplex o cabalgamientos imbricados.

**5.1.7.3.- Fallas antitéticas.** Se presentan en dirección NW-SE, con dirección de inclinación opuesta pero paralela a la falla Ku-Maloob-Zaap, (figura, 5.7). Dichas fallas antitéticas parecen ser el resultado de la compresión y el desplazamiento de los paquetes sedimentarios, lo cual provocó su expulsión anticlinal segmentada, paralelamente a la zona de desplazamiento, con estructuras positivas simples.

**5.1.7.4.- Fallas inversas y pliegues.** Las fallas inversas están orientadas WNW-ESE, corresponden con los flancos al norte de cada una de las estructuras anticlinales de los campos KMZ. Los pliegues sinclinales y anticlinales asimétricos constituyen el componente estructural de las trampas de hidrocarburos. Las tres fallas inversas principales de KMZ, están dispuestas en los ángulos oblicuos de la falla de desplazamiento (límite regional) a rumbo en un patrón de echelon (figura, 5.7). En estas fallas inversas se han cartografiado saltos en la dirección del echado de hasta 600 m en Ku, 200 m en Zaap y 600 m en Maloob. El estilo estructural que presentan las fallas inversas parecen haberse desarrollado como resultado de fallas de desprendimiento, por el mismo efecto de esfuerzos compresivos que provocó el acortamiento estructural N-S, que generaron los pliegues que constituyen las estructuras anticlinales almacenadoras de hidrocarburos.

**5.1.7.5.- Fallas normales.** En los campos de KMZ y Cantarell, se encuentran distribuidas las fallas normales, de manera perpendicular a las fallas inversas principales (figura 5.7); son el producto de un efecto de extensión o de relajamiento tectónico en dirección opuesta a la compresión. Para el campo Ku,

las fallas normales se presentan en la cresta de la estructura, son previas a la superficie de erosión y corresponde a fallas con rumbo NNW-SSE, formando pequeños complejos de fallas que cortan los yacimientos del Eoceno al Kimeridgiano, con saltos de 50 a 100 metros. En la figura 5.7 se presenta la falla normal más cercana a la principal zona de desplazamiento, la cual en su parte superior se intersecta y termina en la superficie de erosión, en tanto que en su parte inferior está en contacto con la falla inversa que actúa como rampa para el campo Ku sobre Akal.

**5.1.7.6.- Superficie de erosión.** El límite superior de las estructuras compresivas a lo largo de la principal zona de desplazamiento, se presenta truncado a causa de una superficie de erosión (discordancia) de amplia distribución dentro del área de estudio. Los cabalgamientos a lo largo de la principal zona de deslizamiento presentan una superficie de erosión sindeformacional; por lo que se le clasifica a este tipo particular de estructura como un cabalgamiento emergente; este rasgo de estructuras no lo presentan los pliegues que forman las estructuras de KMZ en el sentido longitudinal, donde sus respectivas fallas inversas no emergen. La superficie de mayor erosión se presenta hacia el área de Maloob, sin embargo, el relieve estructural y las formaciones rocosas erosionadas son menores, en tanto que hacia el campo Ku la erosión afecta rocas del Eoceno, y hacia el campo Kutz la erosión llega a afectar rocas Cretácicas, esto hace suponer que la erosión afecto las regiones más elevadas topográficamente, es decir la superficie de erosión en el área de estudio se asocia con la denudación de los relieves topográficos elevados.

**5.1.7.7.- Estructuras producidas por gravedad.** En el área de estudio se han reconocido algunas estructuras tipo cabalgamiento que no son producto directo de la compresión tectónica o de intrusiones de sal o arcilla, sino que están asociadas con estructuras resultantes del desplazamiento de bloques por gravedad provenientes de altos topográficos, estas estructuras se han reconocido por otros autores en localidades diferentes al área de estudio, como estructuras formadas por deslizamiento gravitacional. En la porción donde se localizan los campos de Ku y Kutz, es muy frecuente observar bloques que han sido removidos o deslizados por gravedad hacia los flancos que constituyen el anticlinal de Ku-Kutz originados por la ya conocida tectónica compresiva.

A continuación se describen los principales eventos que permiten interpretar el modelo geológico – estructural:

**5.1.7.7.1.- Evento distensivo.** Esta etapa ocurrió a finales del Triásico y en el Jurásico, originando bloques escalonados tipo graben separados por fallamiento normal, que se describe como tectónica de dominó, presentando un echado preferencial hacia el este-sureste. Muchos autores consideran que esta etapa relacionada con la apertura del Golfo de México (Rifting) está identificada por los datos sísmicos de un reflector de baja frecuencia que es correlacionable en casi todos los campos de la región marina.

**5.1.7.7.2.- Estabilidad Tectónica.** Es durante esta etapa donde se desarrollan los grandes depósitos carbonatados a nivel mundial y en muchas plataformas de México; ocurre desde el Cretácico temprano hasta el cretácico tardío. En la

información sísmica esta etapa se reconoce por el paralelismo y continuidad de sus reflectores, condiciones que confirman un periodo tectónicamente estable (figura 5.8). El evento orogénico Laramídico de fines del Cretácico y principios del Terciario tiene poca repercusión en los patrones de depósito de esta zona. Dentro de esta etapa es posible distinguir superficies de erosión en rocas del Eoceno y Oligoceno que fueron deformadas por eventos tectónicos posteriores, es de mencionarse que en esta zona, el límite K-T (Cretácico Terciario) se muestra como un cambio litológico, pasando de un ambiente carbonatado a un ambiente siliciclástico, con su correspondiente cambio microfaunístico, pero conservando los patrones de paralelismo y horizontalidad, lo que indica continuidad en las condiciones tectónicas, pero cambio absoluto en las condiciones paleoambientales

**5.1.7.7.3.- Evento compresivo.** Inicia al fin del Mioceno temprano, prolongándose hasta el fin del Mioceno medio, afectando prácticamente toda la secuencia sedimentaria desde el Jurásico hasta el Mioceno temprano, durante esta etapa se formaron las principales estructuras que constituyen los yacimientos de hidrocarburos en la sonda de Campeche. Este evento es distinguible en las facies sísmicas por la presencia de superposición transgresiva y cambios de espesor (figura 5.8), indicativos de depósitos sinsedimentarios, algunas fallas normales preexistentes de la morfología jurásica, fueron reactivadas por este sistema de esfuerzos provocando su inversión tectónica.

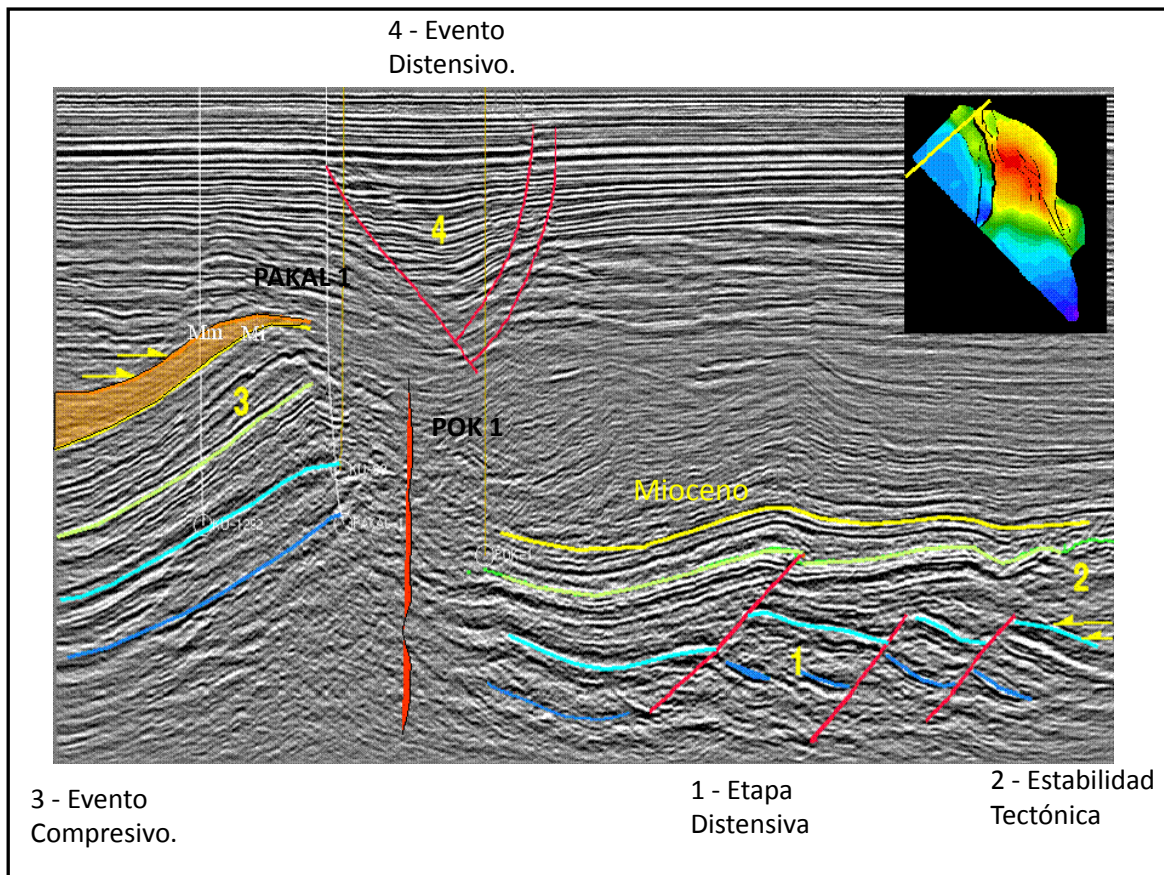


Figura 5.8. Línea sísmica tipo en donde es posible distinguir las cuatro etapas tectónicas del modelo geológico estructural propuesto para KMZ (PEMEX, 2007).

**5.1.7.7.4.- Etapa distensiva.** Esta etapa es el resultado de la descomposición del vector principal del esfuerzo compresivo, que originó una etapa de extensión que está condicionada por la geometría del límite del bloque de Yucatán sobre la que actuó, dando como resultado en esta zona la formación de cuencas sedimentarias en el Neógeno, que a nivel regional corresponden a las cuencas de Comalcalco y Macuspana, cuyos límites oriental y occidental respectivamente, definen el pilar reforma-Akal. A nivel de los campos de este estudio, el límite oeste del campo Cantarell corresponde al límite este de una cuenca local, esta etapa es distinguible en los depósitos del Neógeno como fallamiento normal en dirección preferencial NE-SW (figura 5.8); El análisis evolutivo de las estructuras geológicas fue efectuado en el campo Ku, debido a la mejor calidad de la información y a que es una estructura con suave relieve.

En los patrones de facies sísmicas de los depósitos del área de KMZ, es posible distinguir las cuatro etapas tectónicas descritas, a partir de la línea sísmica tipo de la figura 5.8, se interpretan los patrones de sedimentación relacionados a los diferentes eventos tectónicos; hasta la cima del Mioceno Inferior se observa paralelismo y en su parte superior se tiene, la presencia de superposición transgresiva correspondientes a eventos sintectónicos.

Durante el Mioceno medio y superior se aprecia un depósito sedimentario sincrónico a la deformación, esto se identifica en el cambio de espesor del paquete con límite superior. La superposición transgresiva en esta parte es reflejo del término de la actividad compresiva al final del Mioceno tardío, por último es posible identificar la etapa de distensión del Pleistoceno a través del fallamiento normal que disloca a los paquetes de rocas sedimentarias.

**5.1.8.- Desarrollo de las estructuras de Ku-Maloob-Zaap.** Es posible reconocer dos patrones de depósito y deformación en el área estudiada; uno correspondiente a sedimentos depositados sobre el bloque de Yucatán caracterizado por la horizontalidad y espesor del paquete sedimentario Cenozoico; y otro depositado sobre la porción colindante que corresponde al campo Cantarell, afectado por procesos de deformación, reflejándose esta condición en la presencia de superficies de erosión, acuñaamientos y variación de espesores. El límite entre estas dos áreas con estilo de deformación diferentes fue identificado en los levantamientos sísmicos, dando como resultado una línea que lo define y que constituye el borde del bloque de Yucatán en el área de los yacimientos de Ku-Maloob-Zaap (figura 5.9).

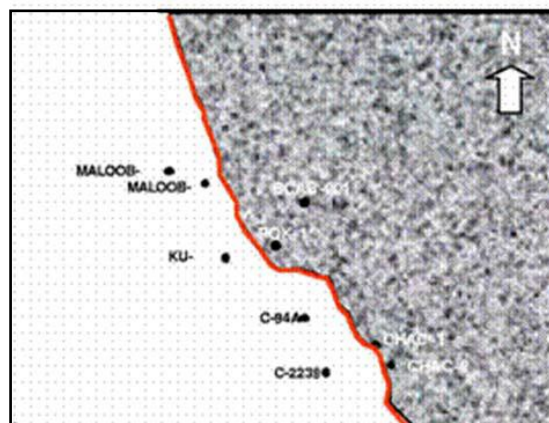


Figura 5.9.- Límites del bloque de Yucatán en la porción marina, los principales campos de KMZ y Cantarell se encuentran fuera del bloque (PEMEX, 2002).



Considerando las evidencias en los ejes de las estructuras de KMZ y Cantarell la dirección del esfuerzo compresivo que las originó, se interpreta que fue predominantemente en dirección SW-5°-NE, con sentido hacia el NE, impactando el extremo norte del campo Cantarell (figura 5.9), como consecuencia del límite del bloque de Yucatán en esta porción del campo Cantarell, el esfuerzo compresivo se dividió en dos vectores con ángulos resultantes de 155° y 85° (figura 5.10). El primer ángulo resultante de 155°, en la porción mayor, dio como resultado la descomposición del vector fuerza en dos direcciones, generando el desplazamiento hacia el NW del paquete sedimentario en dirección paralela al límite y dando lugar a la aparición de una zona de ruptura, la cual compensó la compresión relajando los esfuerzos (figura 5.11).

El segundo ángulo resultante, de 85°, en el segmento frente al límite norte del campo Cantarell, generó, en una primera etapa, deformación en lo que ahora conocemos como la estructura Sihíl (Figura 5.11). Posteriormente, al continuar el esfuerzo compresivo, tuvo lugar la aparición, en la parte sur de la estructura, de un plano de ruptura a nivel de rocas del Eoceno-Oligoceno (figura 5.12), que permitió el cabalgamiento que compensó la compresión y dio lugar a la formación de la estructura Akal. Lo anterior se ilustra en las figuras 5.11 – 5.13. La culminación del cabalgamiento entre los campos Zaap y Maloob, se representa en la figura 5.14.

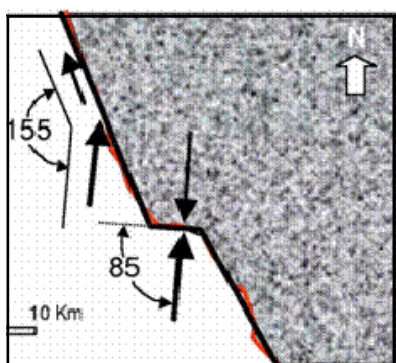


Figura 5.10. Descomposición del Vector fuerza de acuerdo al modelo propuesto (Murillo A; Figueroa C., PEMEX 2002).

Figura 5.11. Inicio de la estructuración formando lo que constituirá la estructura de Sihíl (Murillo, Figueroa, PEMEX 2002).

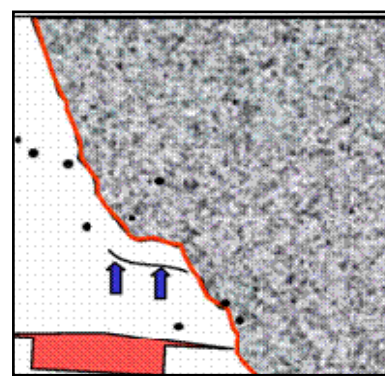
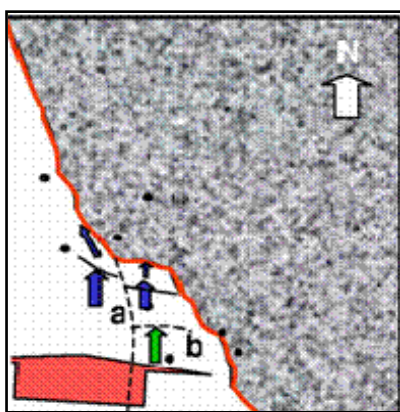


Figura 5.12. Aparición de las zonas de ruptura: a) Falla de transcurrancia, b) Falla Sihíl (Murillo, Figueroa, PEMEX, 2002).

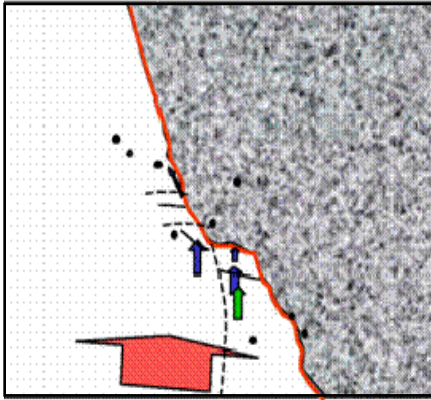


Figura 5.13. Inicio del cabalgamiento Cantarell-Sihil, y formación de las estructuras Kutz y Ku (Murillo, Figueroa, PEMEX 2002).

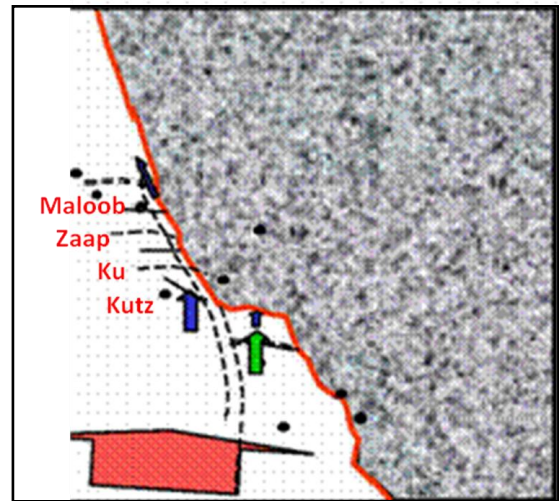


Figura 5.14. Finalización del cabalgamiento Zaap y Maloob (Murillo, Figueroa, PEMEX 2002).

Como resultado de los sistemas de esfuerzos antes descritos se desarrollaron las estructuras del área de estudio, las cuales se pueden separar en cuatro patrones de deformación diferentes (figura 5.15).

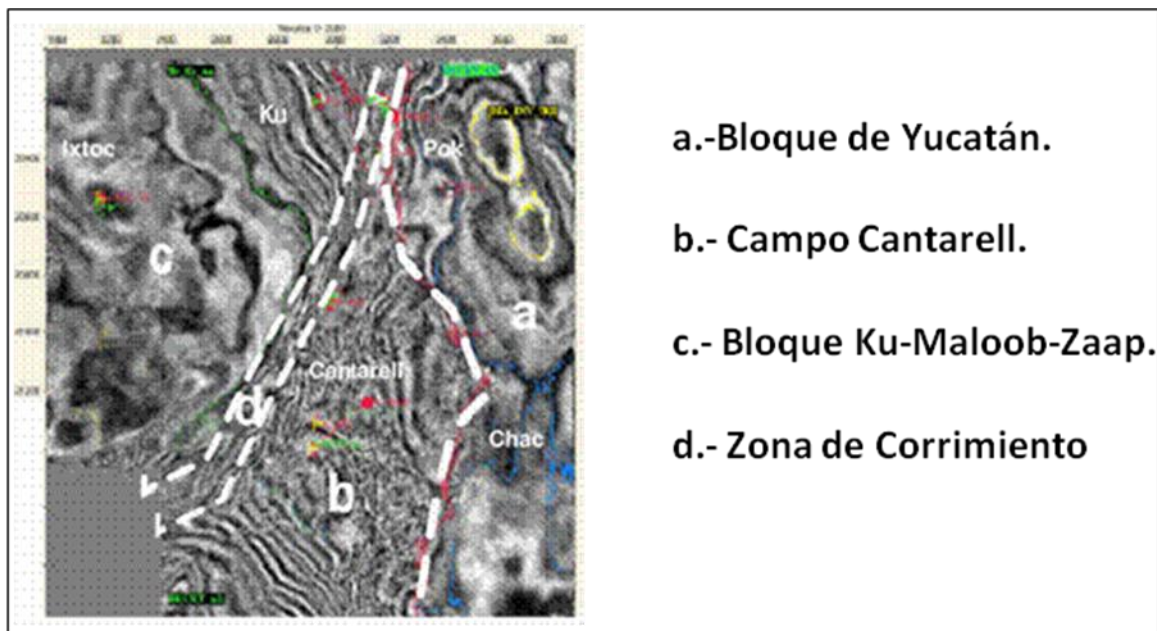


Figura 5.15. Corte en tiempo a 3000 m, mostrando la diferencia en los estilos de deformación corresponde a cada zona en la Sonda de Campeche (PEMEX, 2004).

Finalmente, podemos calcular que la longitud estimada para el cabalgamiento (desplazamiento neto) de la estructura de Cantarell sobre Sihil es de 10 a 12 Km,

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

lo cual es cercano a los 12-13 Km de desplazamiento horizontal que presentan las cimas de las estructuras Sihil y Ku. El efecto combinado de los elementos que interactuaron en el área de estudio, originaron corrimiento en los tres altos estructurales de KMZ, los cuales se desplazaron a través de la zona de corrimiento mostrada en la figura 5.15.

**5.1.9.- Evolución tectónica estructural.** Los campos de Ku-Maloob-Zaap corresponden con una de las áreas más complejas de la republica Mexicana; esta complejidad se debe a que los movimientos de las placas tectónicas Norteamericana, del Caribe y de Cocos, convergen en esta región (figura 5.16) desde el Oligoceno Tardío (Morán- Zenteno, 2000); además de los eventos tectónicos previos a este periodo.

La placa norteamericana tiene como rasgos tectónicos importantes la trinchera mesoamericana límite con la placa de Cocos, tiene un movimiento relativo hacia el oeste respecto a la placa del Caribe, la cual limita con el sistema Motagua-Polochic hacia el sur. La placa de Cocos por su parte, se mueve hacia el noroeste en dirección a las dos primeras y sufre un proceso de subducción con respecto a las placas referidas. El área que conforma los campos de KMZ y la sonda de Campeche forman parte de la porción sur de la placa de Norteamérica, misma que al sureste limita con la placa del Caribe por medio del sistema de fallas Motagua-Polochic.



Figura 5.16. Movimientos de las placas tectónicas (Aguayo- Camargo, 1996).

Las cuencas del sureste mexicano incluyendo el área de KMZ, evolucionaron mas intensamente a partir del Paleógeno, durante este tiempo se incrementó la interacción entre los elementos tectónicos: Bloque de Chortis, Macizo Granítico de Chiapas, Sierra de Chiapas y Bloque de Yucatán; posteriormente durante el Mioceno Inferior, el choque entre las placas de Cocos, Norteamérica y del Caribe determinaron la evolución tectónica de la región. Las estructuras resultantes de esta actividad tectónica durante el Mesozoico y Cenozoico presentan tendencias

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

estructurales diversas, así como también edades de deformación diferentes. Por ejemplo, la sierra de Chiapas está constituida por rocas carbonatadas que varían en edad desde el Jurásico tardío hasta el Paleógeno, mismas que fueron deformadas durante el Mioceno tardío, dando lugar a un conjunto de pliegues asimétricos orientados NW-SE y con una vergencia general al NE. Después de este evento orogénico, como resultado del desalojo de grandes volúmenes de sal y arcilla, se formaron cuencas extensionales cuya dirección de extensión está orientada casi a 90° de los ejes de los pliegues de la cadena plegada.

En la sonda de Campeche se reconocen tres eventos geológicos regionales que involucran y explican con fundamento el origen de las Cuencas Mesozoicas y Cenozoicas del sureste y particularmente las estructuras de Ku-Maloob-Zaap; estos eventos son:

- I. Rifting durante el Triásico y Jurásico Medio.
- II. Empuje salino sin-sedimentario.
- III. Periodo tectónicamente activo durante el Jurásico Tardío y pasivo en el Cretácico.
- IV. Compresión desde finales del Cretácico hasta el reciente.

**5.1.9.1.- Superficie de despegue.** Generalmente las superficies de despegue ocurren donde se tienen secuencias de rocas incompetentes o de comportamiento plástico, para permitir el desplazamiento sobre ellas de paquetes sedimentarios de mayor competencia mecánica (Figura 5.17). Con exactitud, no se sabe cuál es la composición litológica de la superficie de despegue, pero por lo que se interpreta en las secciones sísmicas es un hecho que se trata de rocas evaporíticas, probablemente en una interface entre la sal Pre-Oxfordiano y las anhidritas del Oxfordiano.

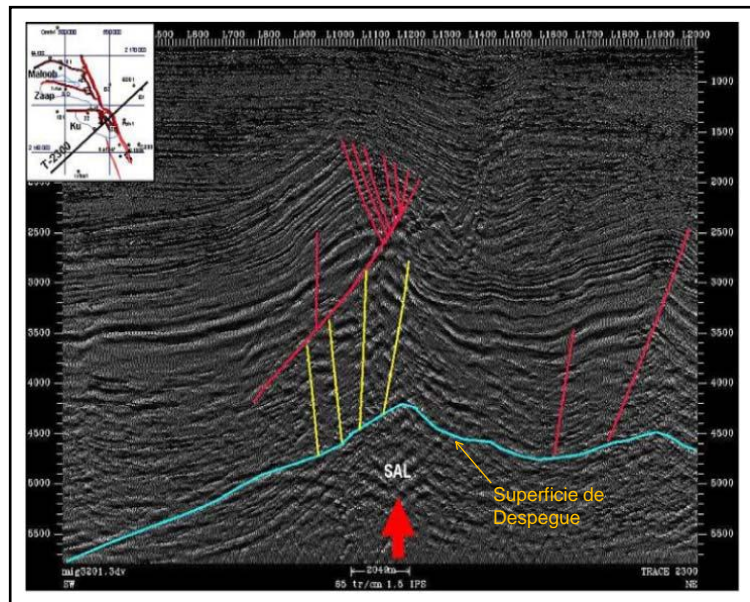


Figura 5.17.- Efecto del empuje vertical de la sal en las estructuras de KMZ, se define la zona de despegue (PEMEX 2007).

Para los campos de KMZ y Cantarell, la interpretación de una superficie de despegue ha sido esencial para indicar el desprendimiento de las fallas durante la estructuración de los campos productores, y está asociada con los diferentes esfuerzos y deformaciones de los paquetes sedimentarios que le sobreyacen a lo largo del tiempo geológico. La superficie de despegue tuvo un comportamiento

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

bastante dinámico en los campos de Ku-Maloob-Zaap y Kutz respecto a la porción oriental en la que está el campo Bacab, donde la estructuración es significativamente menor.

## 5.2.- Metodología empleada en la caracterización del fracturamiento en los yacimientos naturalmente fracturados.

El proceso de caracterización del fracturamiento es una etapa fundamental en el estudio de la estructura y comportamiento de los yacimientos naturalmente fracturados; para tal tarea es necesaria la adecuada obtención de la información estructural y su correspondiente interpretación. La figura 5.18, nos representa un esquema del proceso de caracterización del fracturamiento de yacimientos petroleros.

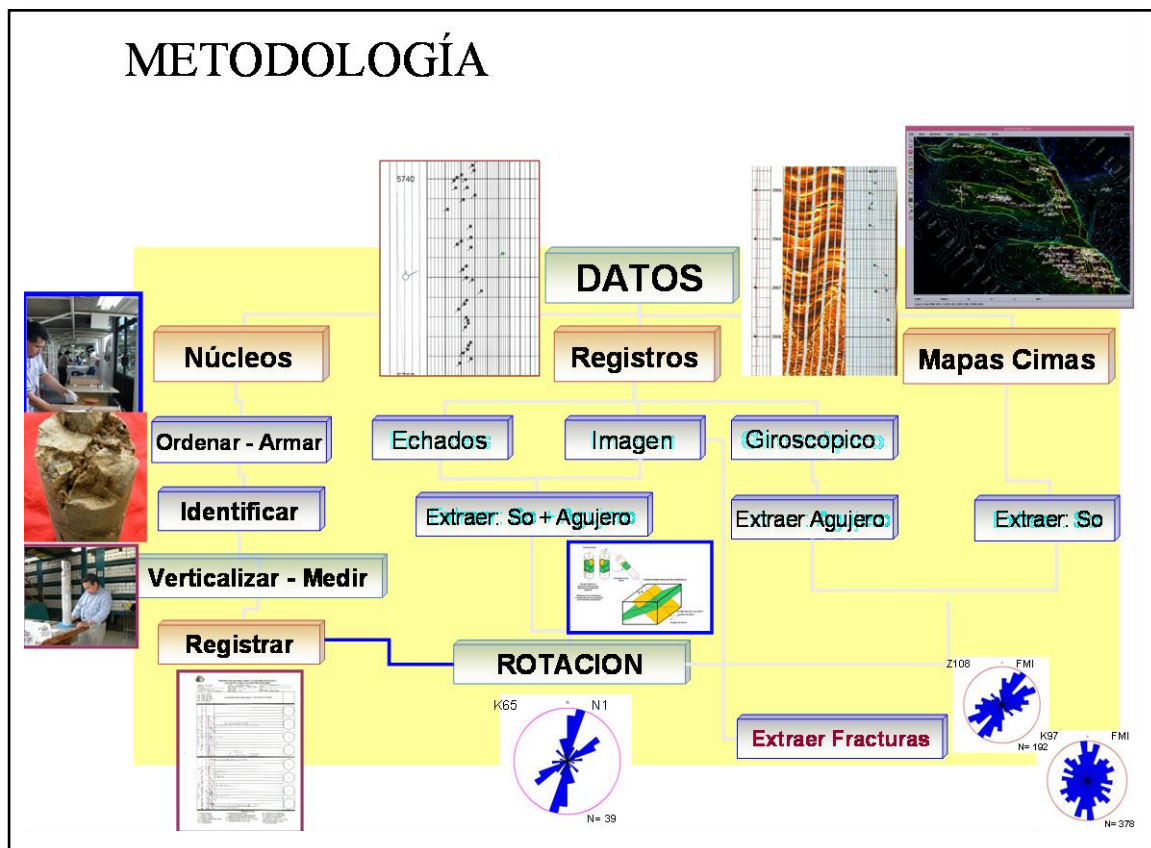


Figura 5.18.- Esquema de las actividades que se realizan en el proceso de la caracterización del fracturamiento en un yacimiento fracturado.

Evidentemente el paso inicial es la obtención de la información del fracturamiento en forma directa proveniente de núcleos y afloramientos, e indirectamente de registros geofísicos, posteriormente se realiza la clasificación, identificación y procesamiento de la información para proceder con la representación grafica, 2D y 3D, principalmente con el uso de la red estereográfica, la roseta de rumbos, los mapas de cimas, las secciones y cubos sísmicos etc. Con esta información estructural organizada e identificada, se realiza la interpretación fracturamiento del yacimiento en cuestión.

El estudio de los núcleos como lo hemos comentado anteriormente, es la fuente de información directa más representativa que se puede obtener del subsuelo, por

lo cual su tratamiento en laboratorio y preservación en las nucleotecas debe ser adecuado. La figura 5.19, muestra dos núcleos con litología diferente, a la izquierda de composición clástica y a la derecha carbonatada; ambas pertenecientes a los campos KMZ.

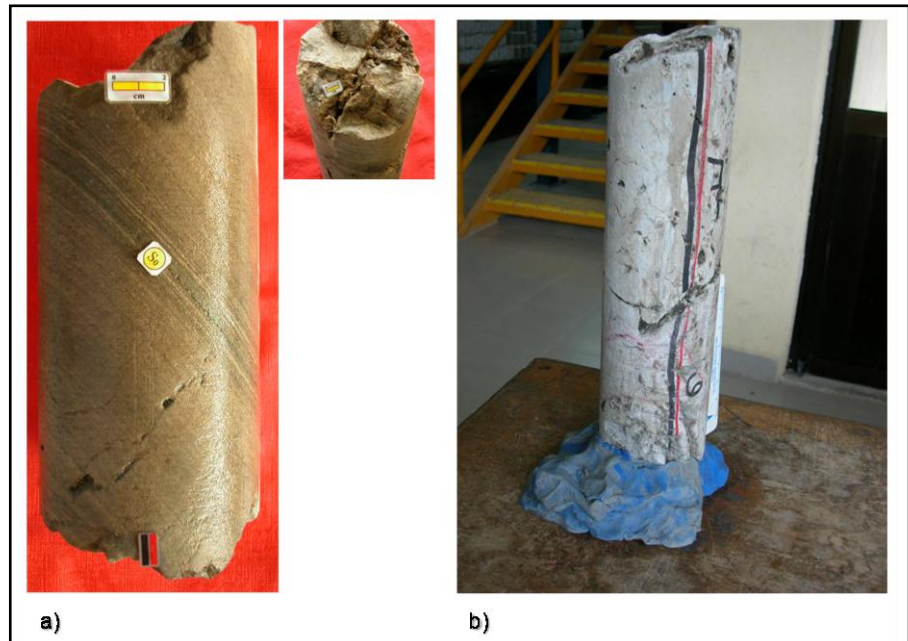


Figura 5.19.-  
Imágenes de dos  
núcleos de  
diferente litología  
obtenidos de los  
campos KMZ.

Inmediatamente después de la extracción del núcleo, éste es llevado a la nucleoteca y se procede a la verticalización, ordenar la secuencia y armar la columna estratigráfica, posteriormente se identifican las estructuras se orientan y se comienza a medir las características del fracturamiento directamente o con la ayuda del giroscopio, para proceder paralelamente a registrarlas en un formato definido principalmente con la referencias del pozo e información del núcleo, donde se indican la ubicación, profundidad, orientación, datos estructurales y litológicos etc. Las cuales posteriormente se trataran estadísticamente y se representaran gráficamente con el uso de la red estereográfica o roseta de rumbos, las cuales se referenciaran y adjuntaran a los mapas de cimbras, secciones y cubos sísmicos.

Existe una gran variedad de tipos de registros geofísicos que determinan diferentes propiedades físicas de las rocas en el subsuelo, para la identificación del fracturamiento se emplea junto a los registros geofísicos, las secciones sísmicas a las que se aplican diferentes atributos, como son las componentes de amplitud, frecuencia, fase y semblanza: con las cuales se pueden crear una variedad de secciones y volúmenes o cubos sísmicos utilizando la información de diferentes pozos localizados a distancia (figura 5.20), asociándolos por medio de procesos de interpolación entre cada pozo, con este procesamiento se puede obtener un registro relativamente continuo del subsuelo y con ello se puede inferir la continuidad de las formaciones de roca y discontinuidades estructurales, principalmente fallas y en cierta forma zonas de fracturamiento cuando este es muy intenso. En la figura 5.20 se muestra la primera etapa en la construcción de un cubo sísmico, la cual consiste en la referenciación espacial de los pozos y el despliegue de sus respectivos registros geofísicos.

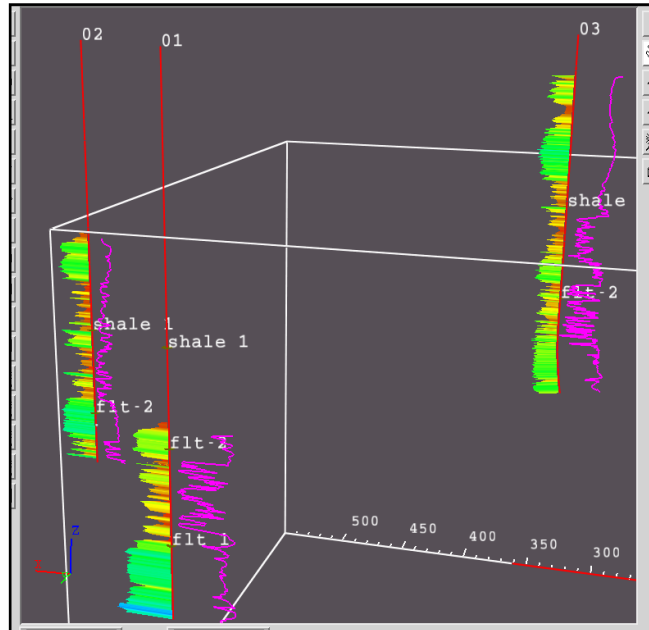


Figura 5.20.- Ubicación dentro de un cubo sísmico de algunos pozos con sus respectivos registros geofísicos (Landmark inc. 2003).

Posteriormente a esta etapa, se lleva a cabo el proceso de interpolación de la información geofísica para asociar los pozos y tener un medio continuo para poder ser manipulada aplicando los diferentes atributos y con ello definir con mayor claridad los rasgos estructurales y petrofísicos.

Las secciones y en especial los cubos sísmicos (figura 5.21) complementados con la información obtenida de los registros geofísicos, nos permiten diferenciar los principales rasgos de las discontinuidades mayores del subsuelo y son una herramienta muy valiosa que al complementarla con la información obtenida de los núcleos nos proporciona una alta certidumbre sobre los sistemas de fracturamiento subterráneo.

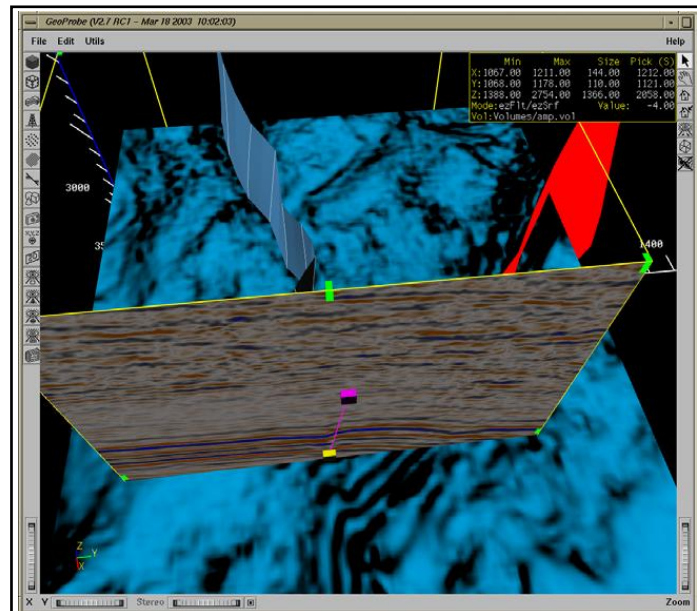


Figura 5.21.- Ventana del programa GeoProbe, con una representación de secciones sísmicas (Landmark inc. 2003).

Las figuras 5.21 y 5.22 corresponden con dos ventanas del programa GeoProbe (Landmark inc. 2003), donde se muestran secciones sísmicas 2D y cubos sísmicos 3D; las secciones y volúmenes en tonos pardos con azul y naranja están procesadas con el atributo sísmico de la amplitud, y los que están en azul discontinuo y negro corresponden a secciones y volúmenes procesados para el

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

atributo sísmico semblanza, con el cual es posible definir claramente las superficies y zonas de discontinuidades mayores, fallas, fracturas, cambios litológicos; las cuales se encuentran definidas en las imágenes con los planos en color rojo, rosa y azul (Landmark inc. 2003).

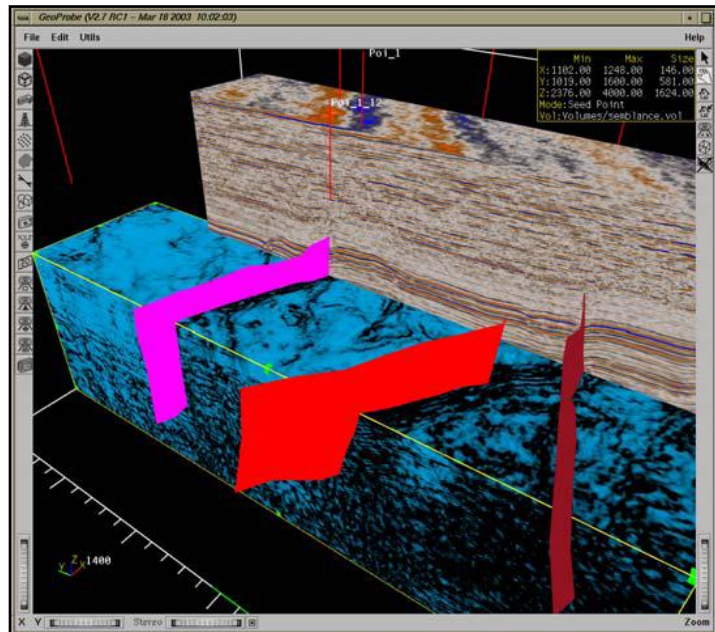


Figura 5.22.- Ventana del programa GeoProbe, con una representación de cubos sísmicos (Landmark inc. 2003).

El programa GeoProbe permite desplegar simultáneamente los volúmenes de amplitud y semblanza (figuras 5.23 Y 5.24), lo cual ayuda a visualizar las zonas de falla y con ello seguir su entramado o trayectoria, e interpretar sistemas de fracturas asociadas.

Figura 5.23.- Cubo sísmico desarrollado con la combinación de los atributos amplitud y semblanza, en este se puede distinguir con mayor claridad el entramado del fallamiento y fracturamiento (Landmark inc. 2003).

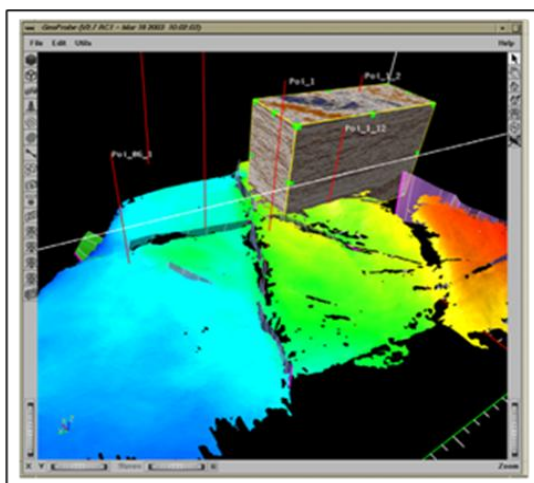
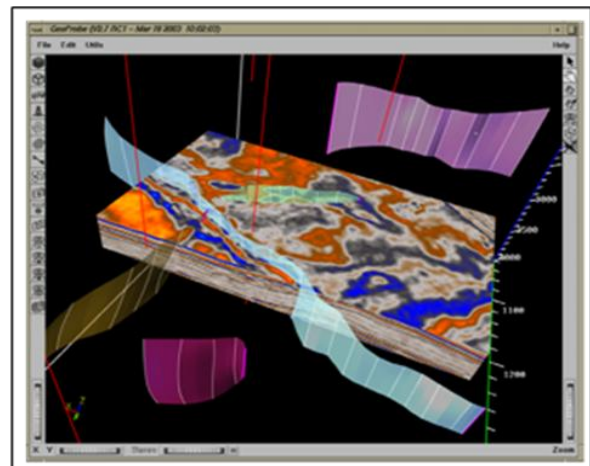


Figura 5.24.- Cubo sísmico desarrollado con la combinación de los atributos amplitud y semblanza, en este se puede distinguir con mayor claridad el entramado del fallamiento y del fracturamiento (Landmark inc. 2003).



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Otra aplicación de la información adquirida indirectamente y posteriormente modelada gráficamente hasta obtener una configuración de las superficies o cimas de yacimientos de interés petrolero (figura 5.25). Se puede obtener la representación grafica de una cima, utilizando el programa Z-MAP Plus, de las plataformas Landmark, y obtenida por la interpolación de la información de varios pozos. Con la obtención de estas cimas se complementan añadiéndoles la información estructural recopilada.

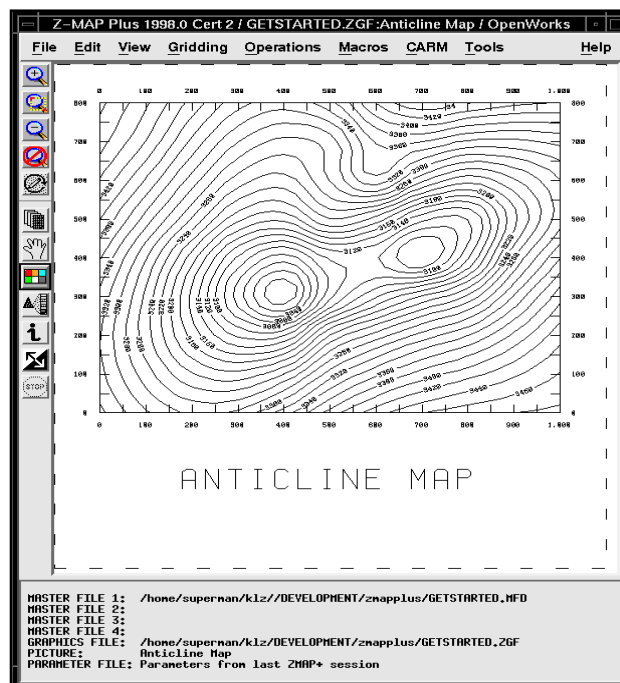


Figura 5.25.- Ventana del programa Z-Map Plus, que muestra la grafica de una cima (Landmark, 2003).

Posteriormente sobre este elemento grafico obtenido se le sobrepone la información sintetizada del fracturamiento representada con las rosetas de rumbo y la proyección estereográfica (figura 5.26). La sobreposición de esta información nos permite relacionar la topografía de los horizontes del subsuelo deseados con las direcciones preferenciales de los vectores e interpretar la dirección de los esfuerzos principales, a las cuales han sido sometidas las rocas de interés; con esta relación se visualiza las probables rutas de migración y almacenamiento en yacimientos con porosidad ocasionada por las fracturas.

En la figura 5.26, se muestran las representaciones graficas de algunas zonas de fracturamiento obtenidos de los campos KMZ. El círculo oscuro en la parte superior izquierda es la representación estereográfica y el círculo inferior claro es la roseta de rumbos.

La representación estereográfica muestra dos direcciones principales la primera marcada con la letra (a) con una dirección predominante SW 10° - 25° NW, y la otra dirección predominante (b) es NE 50° - 50° SE.

En la representación con la roseta de rumbos. (c) corresponde a la dirección predominante del fracturamiento NE-SW, 10°, y (d) la representación de menor intensidad con una dirección promedio NE-SW 50°, la diferencia predominante entre ambas representaciones es que con la estereográfica muestra los rumbos y echados del fracturamiento - fallamiento, y la roseta solo muestra los rumbos.

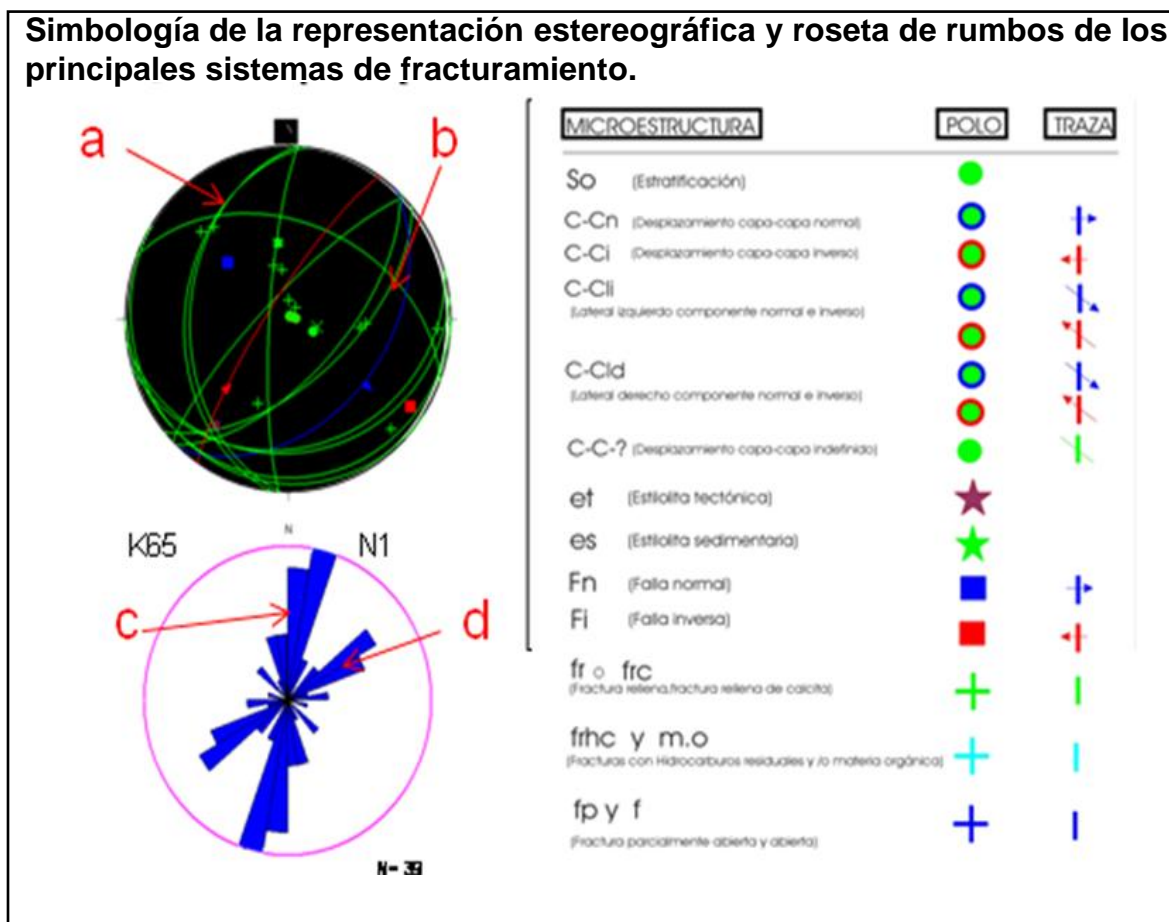


Figura 5.26.- Imágenes de las representaciones graficas del fracturamiento y fallamiento (2009).

Con la información obtenida y procesada sobre los planos base se representan las características estructurales del subsuelo que se han obtenido. En la figura 5.27, se muestran las cimas de la brecha productora de los yacimientos Maloob y Zaap y adjunto a estas se muestran las rosetas con las direcciones preferenciales de fracturamiento en esta brecha; las rosetas de la figura muestran las direcciones promedio del fracturamiento en los campos Ku, Maloob y Zaap, (KMZ), ambas comparten una dirección principal que varía con una dirección predominante de NE-SW que varía de 3° a 20° y una menor con dirección NE-SW que varía de 30° a 45°. En la imagen se notan las estructuras plegadas formadas por contracción, estas son de forma alargada y semiparalelas en la margen inferior izquierda del plano de cimas de yacimientos.

La complejidad de los sistemas de fracturamiento en los campos KMZ, es atribuible principalmente a los diversos sistemas de deformación a los que han sido sometidas las secuencias sedimentarias, las cuales han desarrollado plegamientos, fallas inversas, normales y laterales, y un complejo sistema de fracturamiento generados por diferentes eventos tectónicos con diferentes direcciones e intensidades de esfuerzo, tales características han producido la complejidad de los sistemas de fracturamiento y en consecuencia de los sistemas de porosidad secundaria.

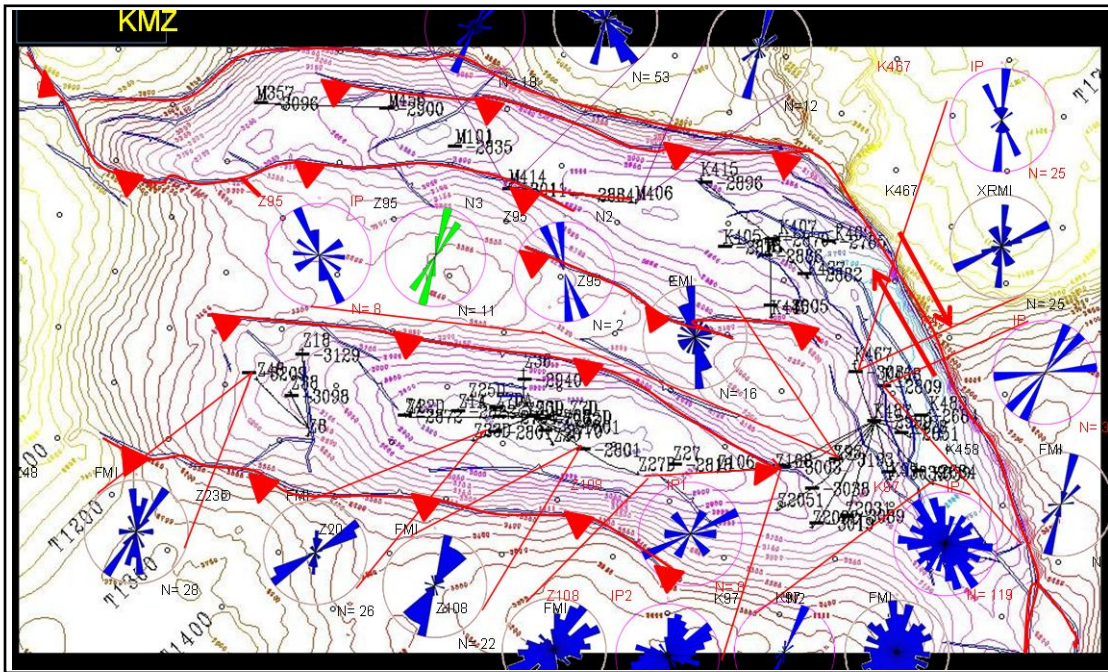


Figura 5.27.- Representación estructural de una cima obtenida con la información estratigráfica y estructural recolectada de los campos KMZ (2009).

El campo KMZ se localiza en la culminación de tres altos estructurales uno para cada campo, lo cual sumado a las características estratigráficas ha generado trampas de tipo combinado. En la figura 5.28 se muestra la ubicación de los campos KMZ, con la información estructural representativa de la región.

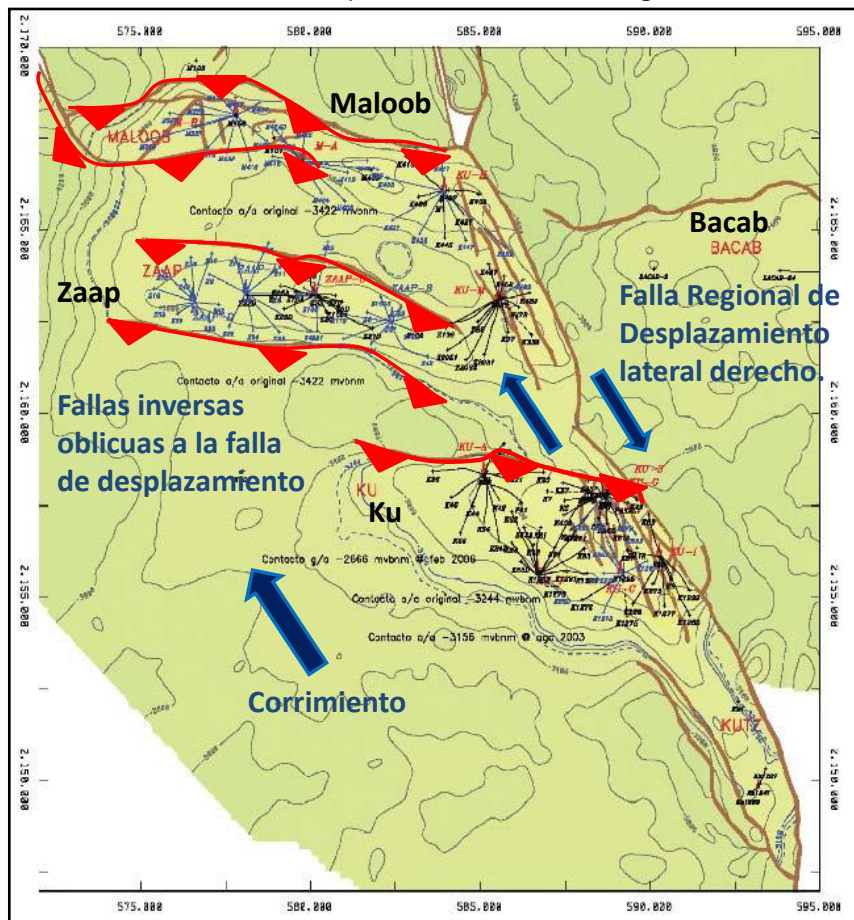


Figura 5.28.- Imagen que representa la ubicación de los campos KMZ, con la información estructural (2009).

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

En el área lateral derecha de la figura 5.28 se distingue el trazo de la falla regional de desplazamiento lateral derecho que divide un área llana en la margen superior derecha y otra de estructuras alargadas y plegadas divididas por fallas inversas subparalelas y oblicuas a la falla de desplazamiento.

Con la información representada en este tipo de mapas se puede realizar una deducción de las probables trayectorias de migración y acumulación de hidrocarburos, puesto que se pueden definir las zonas más intensamente fracturadas, las direcciones preferenciales de fracturamiento y su posición con respecto a los pliegues y fallas; esta información es muy importante para definir la ubicación de los yacimientos y tener parámetros adecuados para definir y cuantificar la producción.

### **5.3.- Aplicación del estudio del fracturamiento en suelos y estructuras civiles como base en la determinación de los parámetros de riesgo aplicados para evaluar la vulnerabilidad de los asentamientos humanos.**

El descontrolado crecimiento carente de planificación de las zonas urbanas en gran cantidad de ciudades del mundo, ha expuesto en manifiesto las diversas circunstancias de riesgo generados por los entornos geológicos y características naturales de los suelos, los cuales han sufrido la alteración antropogénica del terreno provocada por los asentamientos humanos.

La aplicación del estudio del fracturamiento dentro del campo de la geología urbana es de gran importancia, por lo que se deben conocer cuáles son los mecanismos que originan dichas discontinuidades, ya que en muchos casos son parte natural del entorno geológico donde se han establecido las ciudades. Es importante conocer la ubicación, geometría, progresión e interpretación de la génesis del fracturamiento; aunque es común que ocurran donde exista hundimientos y deslizamientos del suelo, desprendimiento y rodamiento de rocas y ocasionan afectación a los seres humanos y a las estructuras civiles. Conocer los factores constituye una importante herramienta al fundamentar la vulnerabilidad del entorno y con ello implementar medidas preventivas que nos permiten definir criterios de riesgo, los cuales son aplicados dentro de la Protección Civil. El conocimiento generado tiene la finalidad de resguardar y proteger la vida humana y la infraestructura superficial y subterránea.

Las principales zonas donde ocurre el fracturamiento son las susceptibles al movimiento o reajuste del suelo, principalmente en lugares de laderas con altas pendientes y suelos finos no cohesivos, con peñascos de roca fracturada e inestable en las partes altas con posibilidad de desprendimiento y rodamiento; zonas sobre la corona o base de taludes inestables; zonas que presentan cambios litológicos y de pendiente, con topografía relativamente llana donde se presenta el fenómeno de la subsidencia donde el suelo está predominantemente constituido por materiales poco consolidados, altamente compresibles y en consecuencia de baja resistencia al peso de grandes edificios u obras civiles, las fracturas también se forman por la extracción de grandes volúmenes de agua en acuíferos confinados o semiconfinados poco profundos.

En el área metropolitana de cuenca de México, por sus características geológicas, geomorfológicas, por la extracción del agua etc; es susceptible en gran medida de la afectación por estas fenomenologías, por lo que a continuación se describen las características más recurrentes o sea la subsidencia con fracturamiento, el deslizamiento del suelo, y el desprendimiento con rodamiento de rocas.

**5.3.1.- Problemática de fracturamiento y hundimiento del suelo en la zona oriente de la cuenca de México.** En la zona oriente de la cuenca, los fracturamientos y hundimientos de suelo se están desarrollando con mayor periodicidad, principalmente en las áreas urbanas de Ecatepec, Valle de Chalco en el estado de México, y Santa Cruz Meyehualco, Lomas de San Lorenzo, Ejercito de Oriente, El Edén, Presidentes de México, en la Delegación Iztapalapa; Peñón de la baños en la Delegación Venustiano Carranza; Zapotitlan, Colonia del Mar, Zapotitlán, Mixquic en la Delegación Tlahuac; y San Antonio Tecomic en Milpa Alta. son algunos que han afectado a la ciudad de México, los cuales en la mayorías de los casos se pueden considerar genéticamente similares, si se comparan las características geológicas de los sitios donde han ocurrido.

En la figura 5.29, se muestra el hundimiento del suelo en Junio del 2009, en un taller en la calle de Vista Hermosa, en la colonia San Lorenzo, de la Delegación Iztapalapa. Este hundimiento fue de menor volumen en comparación con el sucedido dos años antes en el 2007, a unos 30 m sobre la misma calle, en el cual se hundieron una persona y un automóvil. Ambos hundimientos coinciden con el trazo de la grieta IZT – 47 (TGC, Julio 2009),

Figura. 5.29.- Hundimiento de suelo ocurrido en un taller de la calle Vista Hermosa, Colonia San Lorenzo Tezonco; Delegación Iztapalapa (Junio de 2009).



En la zona oriente de Distrito Federal, se han incrementado los reportes de afectación en gran cantidad inmuebles, estas afectaciones van desde fracturamientos en paredes, losas y estructuras de concreto, hasta hundimientos locales, los cuales pueden estar acompañados por inclinación y/o basculamiento de los inmuebles.

## Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Los hundimientos varían en el orden de centímetros a metros de profundidad con velocidades de varios centímetros al año; los desplomes o inclinaciones de las estructuras oscilan entre los 2° hasta 15°. Regularmente, estos movimientos están asociados con el hundimiento y agrietamiento de banquetas, guarniciones, carpeta asfáltica, afectando frecuentemente a los sistemas de distribución de agua potable, drenaje, y alcantarillado; en la proximidad de los inmuebles también se ven afectados las vías de circulación de vehículos particularmente por el transporte pesado, que contribuye al hundimiento.

Si tomamos en cuenta el incremento de las afectaciones en la infraestructura urbana y la periodicidad e intensidad de estos eventos, podemos considerar que esta fenomenología es progresiva y en consecuencia en el futuro existe la factibilidad de que se presente en nuevos lugares de la cuenca de México. Un claro ejemplo del complejo comportamiento del subsuelo por las fracturas y la afectación a viviendas, es el que se manifiesta a través de varias manzanas de la colonia el Edén, en la Delegación Iztapalapa (Figura 5.30), en estas imágenes se trata de representar las formas de afectación por hundimiento local en la periferia de un elemento positivo, en este caso probablemente parte de una colada de lava proveniente del estrato volcán El Peñón del Márquez. Alrededor de este elemento positivo se relleno y compacto con material diverso, lo cual genero una zona local de transición de materiales con propiedades mecánicas diferentes que están causando el hundimiento diferencial de las estructuras de las viviendas.



Figura. 5.30.- Imágenes de los daños causados a las estructuras de dos viviendas ocasionadas por el fracturamiento y hundimiento del suelo, en la colonia El Edén, de la Delegación Iztapalapa (Marzo 2009).

En la figura 5.30, la vivienda de las imágenes superiores presenta un desplome de la estructura y el fracturamiento horizontal en paredes; en la vivienda de las imágenes inferiores se aprecia el fracturamiento diagonal de la estructura lo cual manifiesta los esfuerzos compresivos que dislocaron totalmente la estructura.

Las características litológicas del subsuelo de varias zonas del D. F., no son favorables a la cimentación y edificación de infraestructura civil, ya que al centro de la cuenca de México, se encuentran potentes depósitos lacustres altamente compresibles (Marsal y Mazari, 1959). El comportamiento mecánico de estos materiales no consolidados, así como el hundimiento asociado de la superficie del terreno, ya han sido tratados en múltiples trabajos de mecánica de suelos (Marsal y Mazari, 1959; Peralta y Fabi, 1989; Díaz-Rodríguez, 1998 y 2006; Bautista-Suárez, 1995; Mooser, 1978; Jaime-Paredes *et al.*, 2002; y Marsal, 1992). Los trabajos de Carreón-Freyre D.C, 2002). Domínguez L.M. (2002), Paniagua Zavala, W. (1991), Lugo, J., Pérez V. A., Rojas S.M. (1991), también han contribuido con información más detallada del estudio del fracturamiento en suelos urbanos. De estos autores se realiza una revisión e integración de sus modelos y mecanismos que originan el fracturamiento.

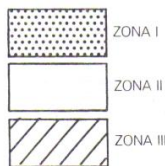
La cuenca de México está circundado por una variada cantidad de alineamientos de aparatos volcánicos (volcanes, estratovolcanes, calderas, etc.), que forman las sierras, los cuales son consideradas como los elementos positivos a partir de los cuales se ha desarrollado la paleo y actual topografía, estas características condicionaron los niveles del los lagos los que controlan el aporte de los clastos sedimentarios, donde los más finos se han depositado hacia el centro de las zonas bajas de las cuencas y en la periferia próximos a los elementos positivos los más gruesos, este tipo de depósitos generan contactos graduales, interdigitados o abruptos, y acuñamientos entre los sedimentos clásticos y lacustres (figura 5.31), con respecto al roca firme o elementos mecánicamente mas consistentes.



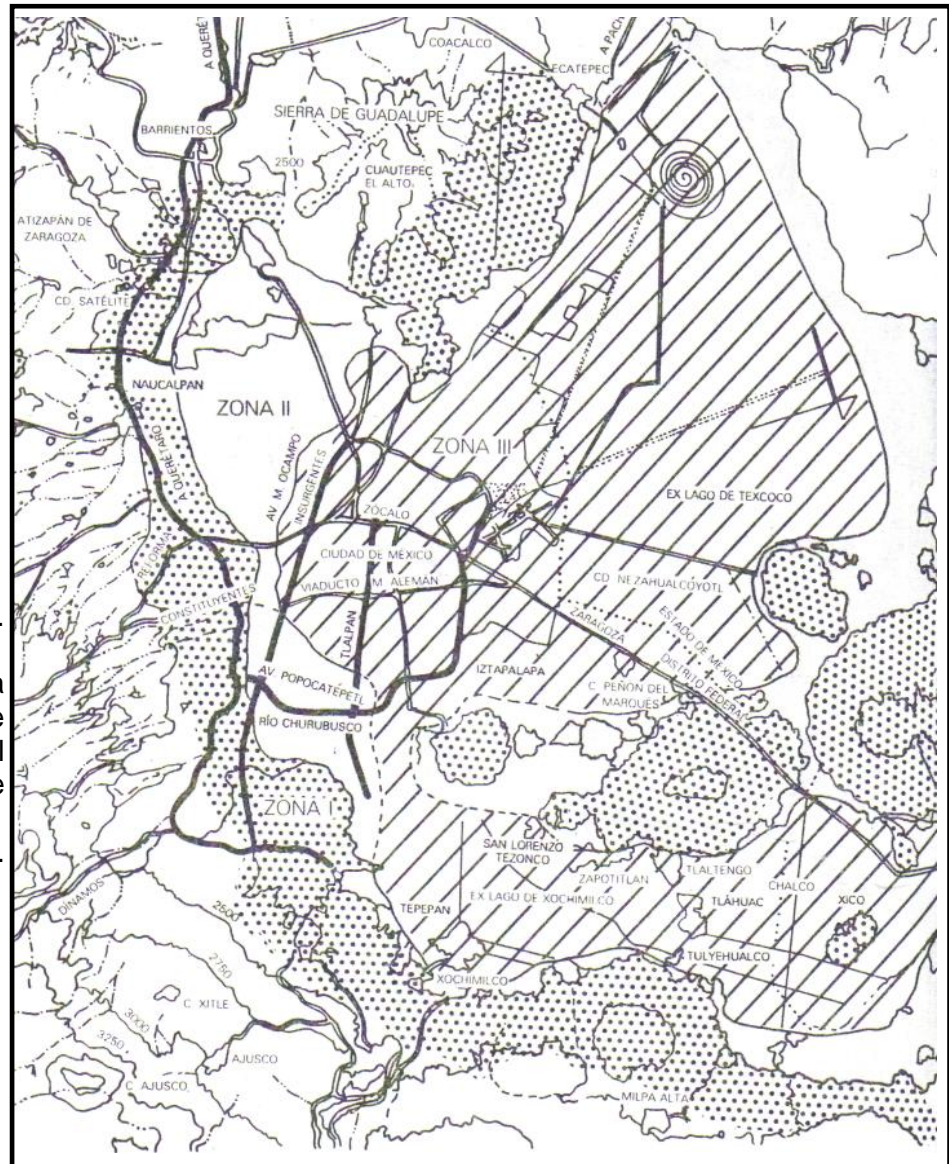
Figura. 5.31.- Fotografía que muestra la heterogeneidad en la secuencia estratigráfica, en un corte realizado dentro de la planta de bombeo "ex lienzo charro" en la Delegación Iztapalapa (Junio de 2009).

Las particulares características geológicas de la cuenca de México se reflejan en el errático comportamiento mecánico de suelo en la superficie de determinadas zonas, de la cuenca lo cual dentro del estudio de la geotecnia, condujo a delimitar zonas o áreas que responden mecánicamente diferente, con respecto a las cargas estáticas y dinámicas. Estas características permiten realizar una zonificación geotécnica de la cuenca de México (figura 5.32), la cual se divide en tres zonas, éstas de acuerdo a como lo define el artículo 170 del capítulo VIII del título sexto del reglamento de construcción en el Distrito Federal. Las zonas presentan las siguientes características generales:

Figura 5.32. Zonificación geotécnica de la ciudad de México del Reglamento de construcciones para el D. F. Leyenda:



(Arnal S, 2002).



a) Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivo relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la figura 5.33 se muestra otro criterio sobre las características de la zonificación de la ciudad de México, ambas presentan criterios particulares, en la delimitación de las zonas con contraste en relación al tipo de suelo.

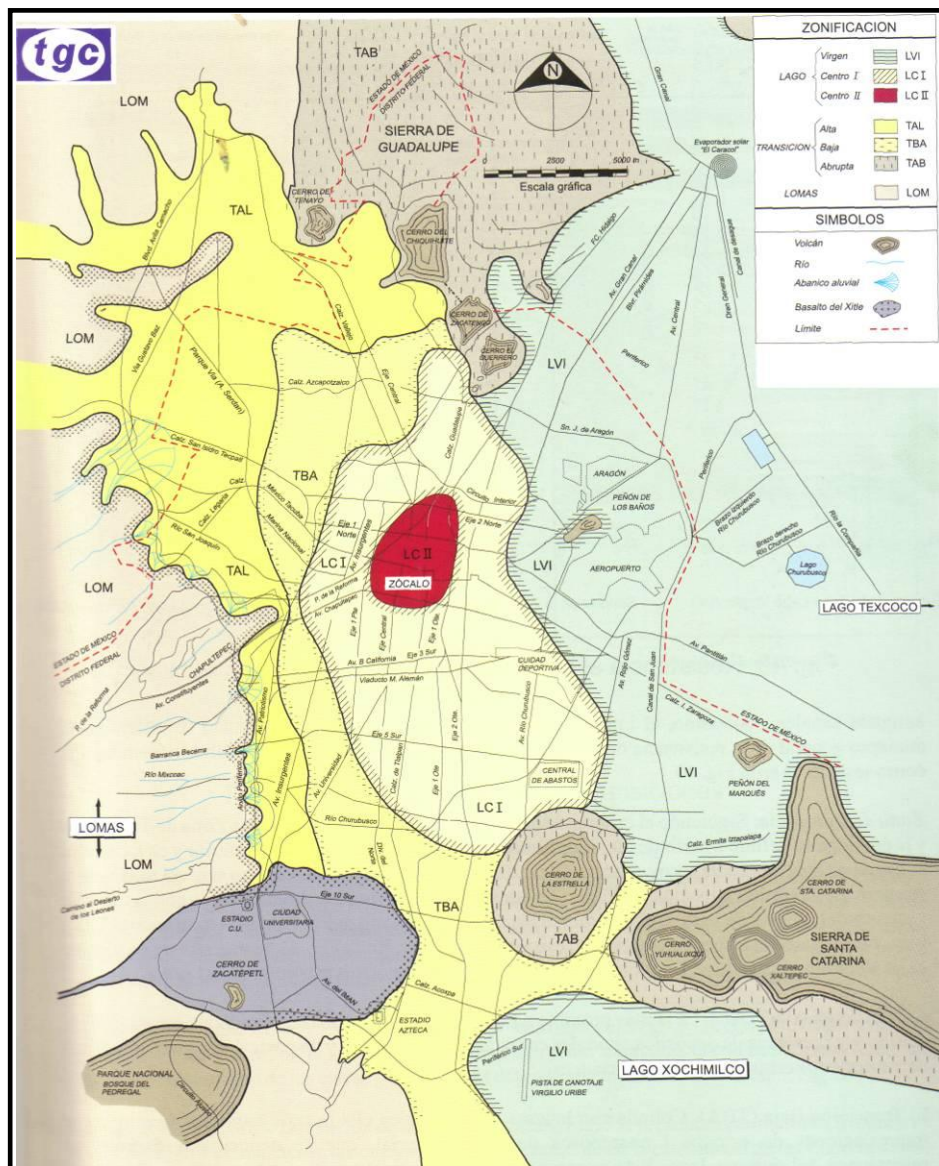


Figura. 5.33.- Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Tomado de: Santoyo V, E, 2005).

La zona oriente del D. F. presenta en la mayoría de sus colonias deficiencias en la dotación de servicios públicos, principalmente lo referente al agua potable, ya que existe un deterioro de las redes de distribución de agua potable y de aguas residuales; muchos de estos problemas son ocasionados a partir de las características propias del suelo. Estas características contribuyen a la inestabilidad del terreno, además de la problemática ocasionada por la carga cíclica o dinámica provocada el transporte pesado, y la carga estática de las edificaciones de gran tonelaje (Zepeda, 1992; y Marsal, 1992), la construcción del metro y el drenaje profundo, entre otros factores relevantes.

Una de las características de los depósitos lacustres con presencia de material volcánico, es que presentan propiedades índices y mecánicas variables e irregulares, que no se ajustan a los patrones de comportamiento de la mayoría de los suelos. Este comportamiento mecánico, tanto estático como dinámico, es complejo, presentando hasta la fecha problemas de interpretación. Al respecto, Díaz-Rodríguez (2006), señala que el subsuelo de la Ciudad de México tiene propiedades únicas, como lo que corresponde al contenido de agua ya que en algunos sitios con mayor contenido de arcillas es mayor a 400%, el índice de plasticidad excede 300% y el índice de compresión  $C_c$  puede llegar a un valor de 10; cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1.

Estos parámetros mecánicos ubican a los sedimentos lacustres de la Cuenca de México como altamente compresibles, generadores de graves problemas de cimentación en la construcción de inmuebles y de obras de infraestructura como drenes, puentes y caminos, entre otros. Zepeda-Garrido (1992), señala que en este tipo de suelos, los asentamientos de estructuras provocan incrementos de carga sobre el sustrato, ocasionando deformaciones importantes.

Otra componente que interviene en la deformación del subsuelo en la zona de interés, es la presencia de materia orgánica en el suelo, representada por una gran proporción y variedad de microfósiles de hábitat lacustre (diatomeas y ostrácodos), (figura 5.34).

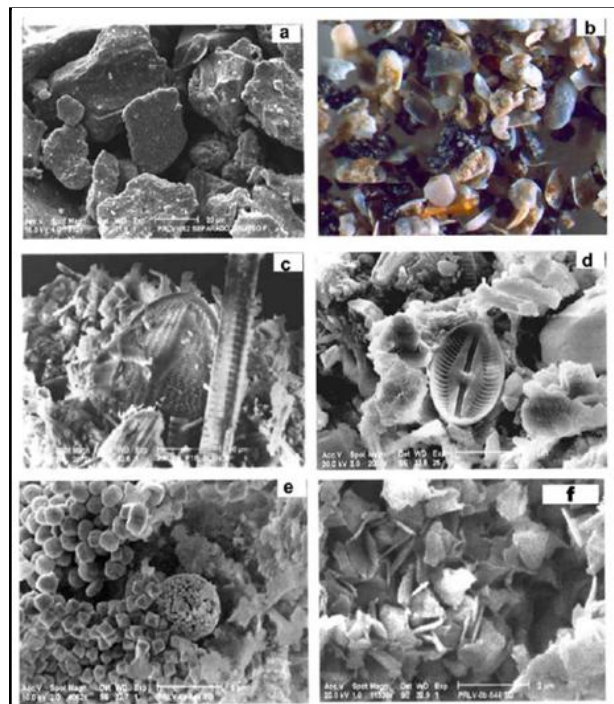


Figura. 5.34.- Microfotografía que ilustra la forma de las partículas del subsuelo de la ciudad de México a) Partículas de limo, b) Valvas de ostrácodos, c) y d) Frústulas de diatomeas, e) Framboides de pirita, f) Dominios de partículas con estructura floculada (Díaz Rodríguez, 2006).

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Estos microfósiles adicionan compuestos solubles generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la microestructura del suelo, particularidad que influye en el comportamiento mecánico de los suelos, de tal manera que no pueden considerarse dentro de una clasificación simple.

Según Peralta y Fabi (1989) y Díaz-Rodríguez (2006), la presencia de esta materia orgánica y de los fósiles son factores que influyen también en el fallamiento y fracturamiento de los materiales lacustres en la Cuenca de México, al tener una distribución irregular.

Por otro lado se ha constatado que la actividad biótica es otro factor que contribuye al hundimiento del terreno (Sámano 1994), ya que se ha documentado que determinados árboles (*Casuarina equisetifolia*, Eucaliptos glóbulos, y la *Acacia farneciana*, entre otros) (figura 5.35), de origen australiano e introducidos en la Cuenca de México, requieren grandes cantidades de agua para su ciclo de vida, absorbida por sus raíces lo que ocasiona un déficit de humedad en el suelo en época de estiaje. El autor menciona, que las características biológicas de estas especies, su alta tolerancia a los suelos salinos y el consumo de agua que realizan, fueron consideradas para la desecación de la zona lacustre. Esta actividad provoca deformaciones en el subsuelo localmente colindante, estimado hasta en 30 cm de deformación, afectando la infraestructura próxima como banquetas, redes de tuberías subterráneas, y obras civiles en general.

Tomando como antecedente lo anterior, se puede establecer que los hundimientos de inmuebles, en la zona de Oriente del D. F., tienen su origen en factores tales como la variación de la propia composición mineralógica, granulométrica, y orgánica; además de la paleo topografía y la irregular distribución de los depósitos dentro de la cuenca además de la reactivación de fallas y fracturas antiguas.

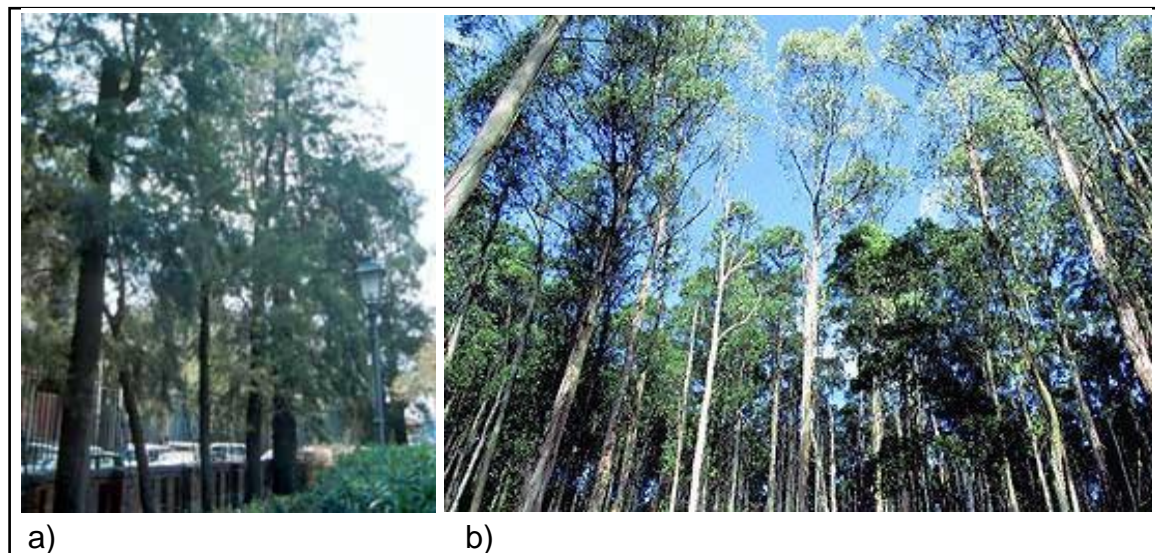


Figura 5.35.- a).- *Casuarina equisetifolia*. b).- *Eucaliptos glóbulos*. Estos tipos de árboles extraen una gran cantidad de agua por lo que cuando se localizan próximos varios de estos árboles existen deformaciones y fracturamientos del suelo circundante (Tomado de: <http://fichas.infojardin.com/arboles>, 2005).

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Estos factores, aunados a la actividad biótica y antropogénica que se desarrolla en la superficie de la cuenca de México, en general, en particular, han ocasionado la deformación de los materiales lacustres expresado en hundimiento del terreno, y por lo tanto, de estructuras que soportan gran peso dispuestas en la superficie, así como de la infraestructura en el entorno de ellas.

### **5.3.2.- Marco geológico de la cuenca de México.**

**5.3.3.- Principales Eventos Geológicos en la Cuenca de México.** Se han realizado muchos trabajos que tratan de la geología de la cuenca de México, sin embargo el trabajo que realizó importantes aportaciones a la Geología de la zona fue el que elaboraron Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989). Estos autores mencionan que en el Aptiano ocurrió una sedimentación calcárea en cuencas marinas profundas, un periodo de levantamiento y erosión precedió al intervalo de tiempo Albiano Medio-Cenomaniano Temprano, el cual se inicio con la acumulación marina anhidrítica, seguida por sedimentación calcárea con dolomitización diagenética en ambiente de plataforma marina en el sector meridional, y únicamente calcárea en condiciones marinas profundas en la región septentrional. Una etapa de regresión marina y erosión antecedió la depositación calcárea en facies de banco, durante el Cenomaniano Tardío- Turoniano Tardío.

La sedimentación calcárea cambió a terrígenos (areniscas y lutitas) durante el Coniaciano-Campaniano Temprano, como posible consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático Cretácico del poniente.

Durante el período Maestrichtiano-Eoceno Temprano, las secuencias sedimentarias del Cretácico, fueron plegadas por efecto de la Orogenia Laramide.

El fallamiento normal, con desplazamiento lateral derecho, de direcciones conjugadas N35°E y S40°W, probablemente fueron producidas durante el Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano, por esfuerzos compresivos orientados S85°W, que a su vez generaron tensión en dirección N 5° W.

En el transcurso del Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano, y posterior a la Orogenia Laramide, la sedimentación clástica continental, fue acompañada por efusiones fisurales basálticas alcalinas.

Los periodos volcánicos separados por hiatos magmáticos y que se relacionan genéticamente a la actividad del arco de la Faja Volcanica Transmexicana, están representados por:

a) Secuencias calci-alcalinas, constituidas por depósitos piroclásticos de caída-tipo “surges” así como de flujo, por derrames lávicos y domos, de composición variable de andesítica basáltica a dacítica, de edad del Mioceno Medio-Tardío, Plioceno Temprano, Plioceno Tardío y Cuaternario.

b) Flujos lávicos fisurales alcalinos y calci-alcalinos, de composición basáltica y del Plio-Cuaternario.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

c) Derrames lávicos y tefra de caída calci-alcalinos, de composición basáltica, andesítica basáltica y andesítica, de edad Cuaternaria.

La deformación del Cenozoico Medio, se manifiesta por la presencia de fallamiento normal con rumbo N45°W, y por la ligera inclinación de las capas del grupo Balsas. Las fallas normales, forman bloques cuyas fallas normales presentan una dirección preferencial E-W con presencia de un sistema conjugado de dirección promedio N55°E, se deben posiblemente, desde el Plioceno hasta el Cuaternario, a esfuerzos compresivos y tensionales con orientación de S75°W y N15°W, respectivamente.

La gran sedimentación clástica aluvial del Plio-Cuaternario, en la Cuenca de México, estuvo supeditada al bloqueo parcial del desagüe, por el fallamiento normal Plio-Cuaternario y por el emplazamiento de derrames lávicos de la misma edad. El régimen endorreico total de la cuenca, y consecuente sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno, fue originado por la intensa actividad volcánica que formó a la Sierra Chichinautzin y la posterior erosión de estas secuencias cuyo producto contribuyo con terrígenos que rellenaron la cuenca.

La figura 5.36, muestra de manera gráfica tridimensional la estructura del Valle de México desde la sierra Chichinautzin hasta Pachuca y desde la Sierra de las Cruces hasta la Sierra Nevada, aparecen en ella los arcos Tarasco y Chichinautzin, muestra la estratigrafía condensada de la cuenca en el corte frontal donde se aprecia la Fosa Roma.

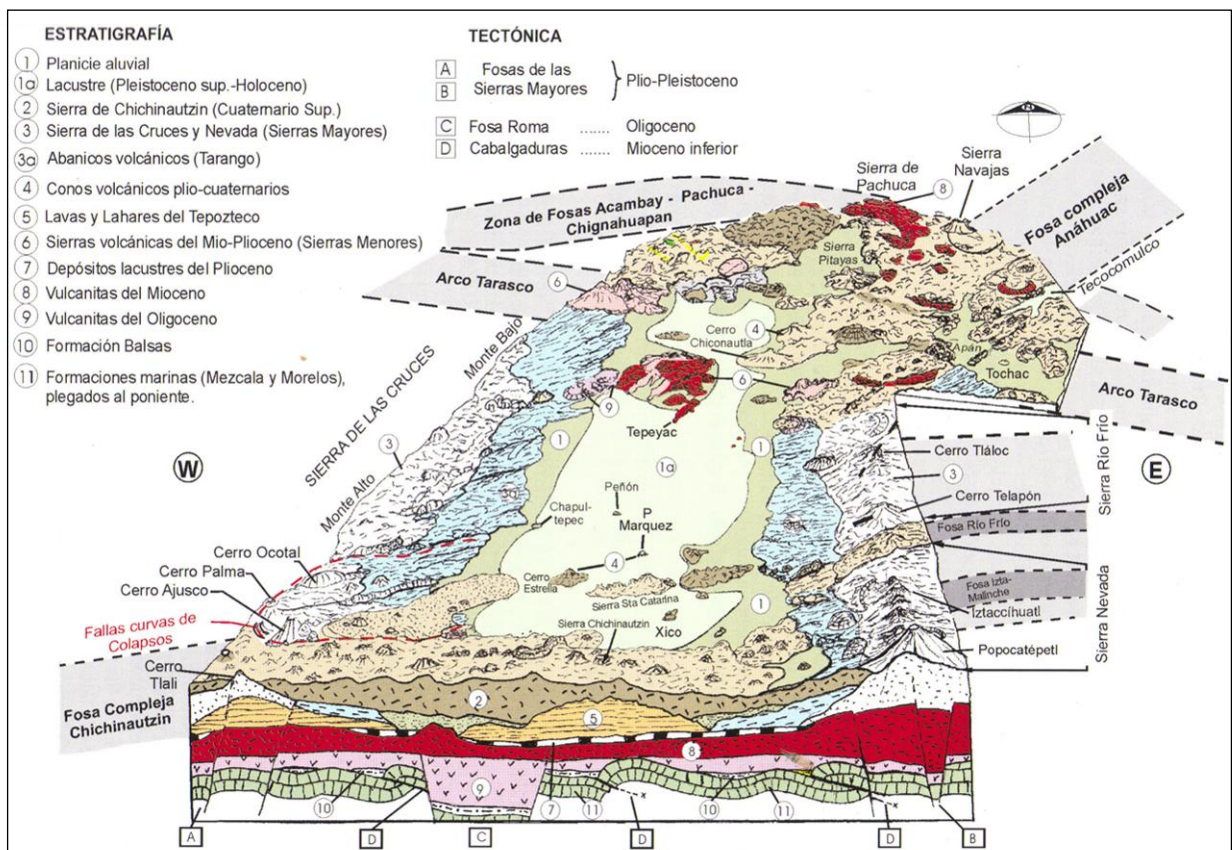


Figura 5.36.- Bloque esquemático de la estructura geológica de la cuenca del valle de México (Tomado de Santoyo 2005).

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

El vulcanismo en la Cuenca de México se inicio a fines del Eoceno, paralelamente se generó el relleno de sinclinales y fosas tectónicas, con productos de la fragmentación de la superficie predominantemente constituida de caliza, intercalada con depósitos de yeso y tobas volcánicas. Esta fase se considera del Paleógeno Inferior, y se constato en los materiales perforados en el pozo Texcoco 1 a 2265 m de profundidad (Cabral – Lugo, 2008).

Las rocas volcánicas más antiguas, afloran al noreste de la cuenca de México de 32 Ma (millones de años), consisten en lavas intermedias y acidas con abundantes ignimbritas y tobas, las cuales constituyen complejos intensamente fracturados, distribuidos en fosas y pilares, con dirección noreste y afloran al norte de Tepoztlán hasta Huehuetoca en el Estado de México.

Del Oligoceno Superior al Mioceno, se formaron las rocas volcánicas que afloran en la parte meridional de la cuenca, por lo general son dacitas y se localizan en las bases de las sierras mayores al este y oeste de Xochitepec. A esta etapa pertenecen el Peñón de los Baños, Cerro el Tigre, Cerro de Sante Isabel con 16 ma. Los Cerros de Tlapacoya, Zacatepec y Chapultepec, son los elementos volcánicos más jóvenes, corresponden con lavas andesíticas oscuras de la Serie Humaredas 17 ma. y tobas lacustres Pliocénicas superpuestas.

La siguiente etapa corresponde con la formación del complejo de la Sierra de Guadalupe, la cual está constituida por lavas intermedias y acidas; También se tienen las Sierras de Tepoztlán, Las Pitallas, El Patlachique y el Tepozán, las cuales constituyen el grupo de sierras menores con antigüedad de 12 a 14 ma.

La formación de las Sierras Mayores se desarrollo durante los finales del Mioceno, con lo cual queda flanqueada (cerrada) la cuenca al Oriente y al Poniente, con las Sierras de Rio Frio, Nevada y de las Cruces.

Durante el Cuaternario se desarrollo el vulcanismo que formo los Cerros de Chimalhuacan, la Estrella, Los Pinos, y del Peñón del Márquez, al sur de la cuenca; al norte se desarrollan los Cerros de Chiconautla y Gordo. Finalmente se desarrollo la Sierra de Chichinautzin durante el cuaternario superior, la cual funciona como barrera que obstruyo el antiguo drenaje hacia el sur y creó una cuenca cerrada o endorreica, conocida como cuenca de México. Donde se depositaron productos volcánicos, aluviales y lacustres con espesores máximos de hasta 800 m al centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la planicie.

El sur de la cuenca tiene las unidades geológicas más jóvenes de, aproximadamente 100,000 años. Caracterizada por una barrera de conos, lavas y material piroclástico entre los volcanes Ajusco y Popocatepetl, los cuales cerraron y sepultaron los antiguos valles fluviales que pertenecían a la cuenca del Río Amacuzac. En la figura 5.37 se muestra la red de valles sepultados que se ha interpretado que existe debajo de la planicie lacustre, drenaban hacia el sur antes que surgiera la Sierra de Chichinautzin (Mooser., 1991). Esta se dedujo del análisis de las líneas sísmicas de reflexión aplicadas por PEMEX.

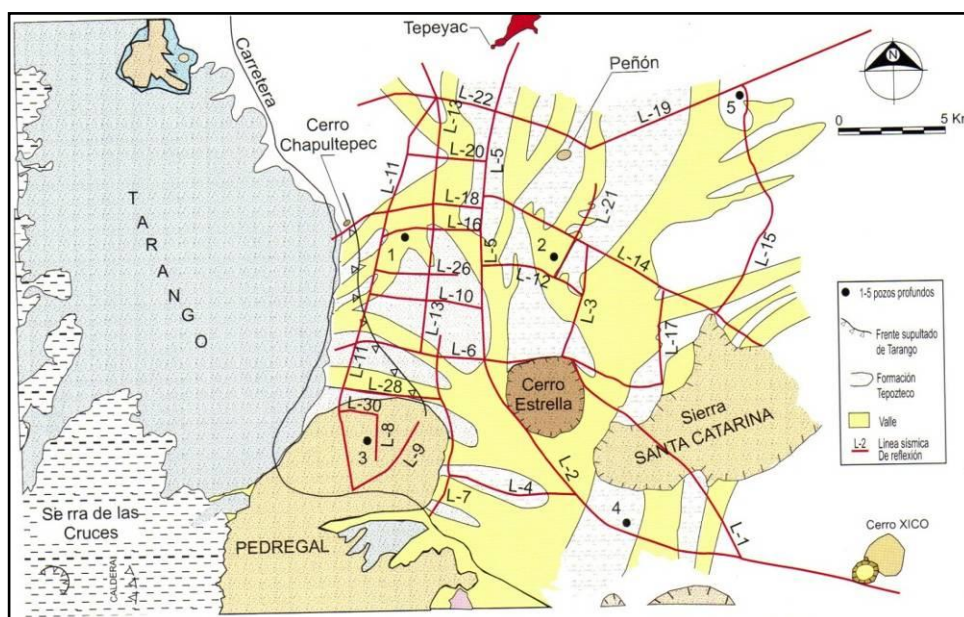


Figura 5.37.- Antiguo drenaje fluvial pre-Chichinautzin (Santoyo E, 2005).

**5.3.4.- Depósito de los Sedimentos Lacustres.** Mooser (1978) propone que el origen de los depósitos lacustres, está asociado con el emplazamiento de la Sierra Chichinautzin, la cual de acuerdo a este autor se produjo aproximadamente, hace 700,000 años, sustentado con mediciones paleomagnéticas; una vez cerrado el valle, éste se fue azolvando rápidamente. Los ríos que descendían de las sierras formaron en las partes bajas de la cuenca un abanico de deyección, con abundantes clásticos que formaron un delta fluvial lacustre.

La evolución sedimentaria hace suponer que en el subsuelo de la Ciudad de México se encuentren potentes secuencias de gravas y arenas, las cuales se formaron por aportes de los ríos Hondo, Mixcoac, Magdalena Contreras y el Río fósil del Ajusco (por estar sepultado por lavas).

Los aportes sedimentarios de los ríos procedentes del norte de la cuenca que corresponden con el Río de las Avenidas de Pachuca, el Río de Cuautitlán, y el Río de Teotihuacan; formaron importantes estructuras deltáicas. Las partes centrales de la cuenca, alejadas de los bordes, fueron llenándose con depósitos limo-arenosos, los cuales se interestratificaron con suelos y capas de cenizas, además de pómez, provenientes de las erupciones volcánicas originadas principalmente en el Sur A medida que se rellenaba la cuenca fueron apareciendo lagos, principalmente en las partes centrales bajas y en el Sur de la cuenca. Finalmente, en las épocas glaciales de los últimos 100,000 años, y debido a las lluvias abundantes pudieron formarse cuerpos de agua importantes, que a veces se unían en un solo gran lago. En este ambiente lacustre se acumularon los depósitos arcillosos, con la formación de seis grandes lagos: el de Ecatepec, Zumpango, Texcoco, México, Xochimilco y Chalco.

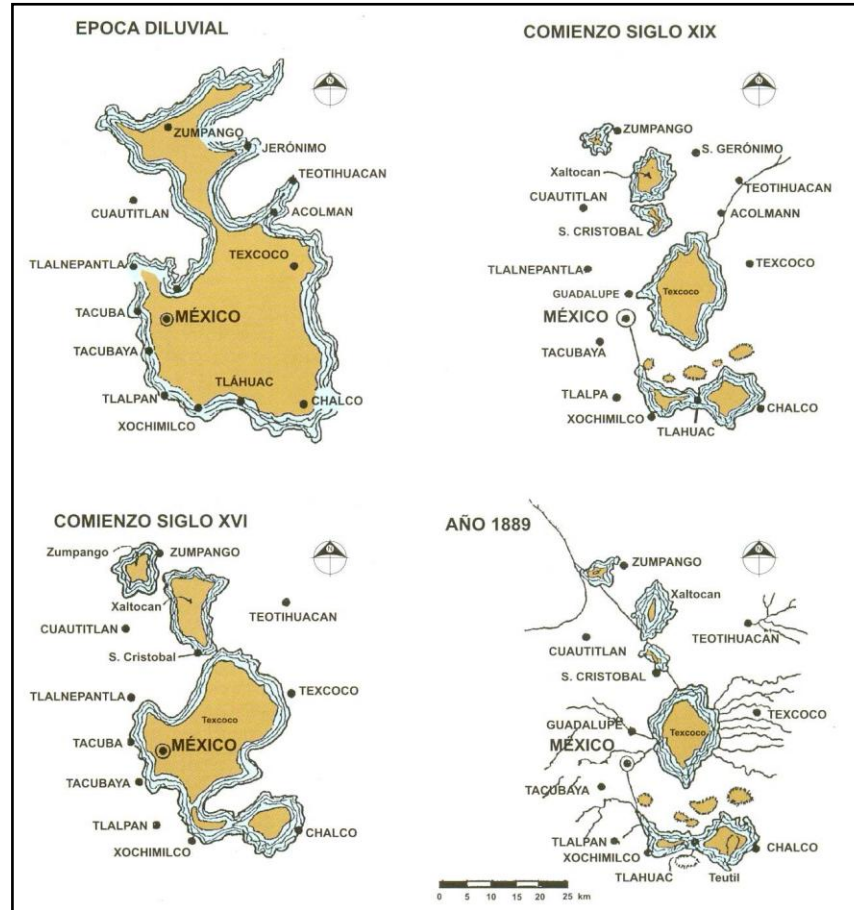
En relación a los lagos pleistocénicos y recientes, puede establecerse la siguiente división: a) Lagos formados en las partes bajas, que constituyeron vasos de evaporación y por ello fueron salobres; se trata de los lagos de Xaltocan y

Texcoco; b) Lagos que se formaron al pie de la Sierra del Chichinautzin, que fueron nutridos continuamente por manantiales prolíficos y que por ello fueron de agua dulce. El antiguo Lago de México-Tenochtitlán (así como también el de Zumpango) representa un caso intermedio, habiendo sido casi siempre dulce debido a los manantiales de Chapultepec y Tlalpan, además de las importantes aportaciones de arroyos de las Lomas. Sin embargo, el límite oriental del lago de Texcoco fue siempre dinámico, avanzando y retrocediendo las aguas salobres del último de acuerdo con el régimen de lluvias.

Mooser (1978) menciona que dependiendo de las condiciones climáticas (húmedas o secas, glaciales o interglaciales), los lagos iban creciendo o reduciéndose. Así, los depósitos lacustres en el centro de la Cuenca, por el área NW de Chimalhuacán, alcanzan un espesor de 70 a 80 m. Tal espesor va disminuyendo de Este a Oeste, presentando debajo del Zócalo de la ciudad de México unos 60 m de espesor y desapareciendo al pie de las Lomas de Chapultepec. Intercalados en la formación de arcillas lacustres aparece entre 30 y 40 m una capa dura debajo de gran parte de la Ciudad de México, la cual desaparece hacia el centro del vaso de Texcoco. Esta capa es testigo de una época seca en la que se redujeron considerablemente los lagos centrales.

Castillo-Muris (1998) argumenta que el origen de la división de los grandes lagos, se debe a que durante el proceso de relleno de los materiales lacustres de la Cuenca de México, se presentó una época de grandes lluvias torrenciales que causaron amplias inundaciones, después de la cual ocurrió un proceso de desecación, según se observa en la secuencia de la Figura 5.38.

Figura 5.38.-  
Secuencia de  
Desarrollo de los  
Lagos en la  
cuenca de México.  
(Tomado de:  
Mooser, 1978).





Durante el proceso descrito, épocas de lluvias y épocas de sequía, en el que se desarrolló un sistema hidrográfico que participa en mayor grado en la formación de suelos de la Zona de Transición. En estas regiones se tienen depósitos de tipo lacustre que recibieron posteriormente depósitos aluviales. Según se observa en la figura 5.31 en la época de mayor precipitación pluvial el lago cubría la mayor parte de la cuenca. A medida que disminuye el área lacustre se generaron depósitos aluviales al pié de las serranías, siendo mayor su espesor en las fronteras del lago donde se suaviza la pendiente o se amplían los causes.

Debajo de la capa llamada manto superficial, se encuentra la Formación Arcillosa Superior (FAS) descrita por primera vez por Marsal y Mazari (1959): quienes reportaron que el espesor varía de Norte a Sur de 17 m, aproximadamente, en el caracol, a más de 40 m en el bordo de Xochiaca, en el oriente. La unidad está formada por arcillas de origen volcánico-lacustre altamente compresibles, intercaladas con estratos de arenosos, limo-arenosos y vidrio volcánico.

**5.3.4.1.- Capa Dura (CD).** Es de menor a la encontrada en la FAS, su espesor es de 3.5 m en el Norte y al oriente, en la zona poniente es muy complicado identificarlo con precisión. Está formada, principalmente, por suelos limo-arenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por materiales arcillosos; su contenido de agua promedio es de 59% y su resistencia a la penetración da valores de 8 a más de 50 golpes.

**5.3.4.2.- Formación Arcillosa Inferior (FAI).** Ésta se diferencia de la superior por su menor contenido de agua, que es de aproximadamente 255%, y por tener menor compresibilidad y mayor resistencia al corte. Contiene también, lentes y estratos limo-arenosos, así como mayor abundancia de vidrio volcánico que en la FAS. Tiene un espesor variable de 20 m al centro del Lago y en la periferia es de 3 m. Díaz-Rodríguez et al. (1998), realizaron una descripción de la estratigrafía encontrada en un sondeo en el parque Ramón López Velarde de la Ciudad de México. Esta descripción se presenta en la Figura 5.40 en donde se identifican seis zonas, las cuales se describen en orden ascendente a partir de los 40 m de profundidad hasta la superficie del terreno con la siguiente descripción:

Zona 1: Arenas con grava (40-38 m). Debido a la abundancia de fragmentos de roca volcánica, en esta zona, los minerales predominantes son feldespato (50%) y hornblenda (24%). Esta zona está constituida por arena con grava con una matriz de limo, las partículas mayores alcanzan un tamaño de hasta 1.5 cm, (Figura 5.39), (horizonte S1).

Zona 2: Arenas con grava y arenas limosas (38-36 m). Granulométricamente la zona se caracteriza por una rápida transición de sedimentos gruesos a una textura de arenas limosas. El valor despreciable del porcentaje de materia orgánica (MO) y el bajo valor de la capacidad de intercambio catiónico total (CIC) reflejan la baja concentración de minerales de arcilla y material amorfo. En la parte superior de esta zona se encontró un material de color blanco de grano muy fino, que sugiere un evento piroclástico.

Zona 3: Limo arcillosos con arena (36 - 30 m). En la parte inferior de la zona, se infiere la existencia de dos paleosuelos, debido a la presencia de raíces, lo cual

se refleja en los valores de MO. Granulométricamente, esta zona se clasifica como limo arcilloso con poca arena (excepcionalmente el contenido de arena alcanza un 50%). Esta zona se interpreta como una transición entre condiciones de depósito subaéreas y condiciones incipientes de depósito lacustre.

Zona 4: Limo arcillosos o arcilla limosas (30-7 m). Esta es la zona más importante desde el punto de vista de la geotecnia, principalmente debido a su alta compresibilidad ( $m_v = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ ); granulométricamente esta zona se clasifica como limo arcilloso o arcilla limosa, con poca arena. Se tienen varias lentes de arena interestratificadas, los horizontes S2 y S3 son los más importantes. Esta zona representa un lapso en el cual las condiciones lacustres se establecieron claramente, esto es apoyado por la evidente proliferación de diatomeas y ostrácodos en los sedimentos.

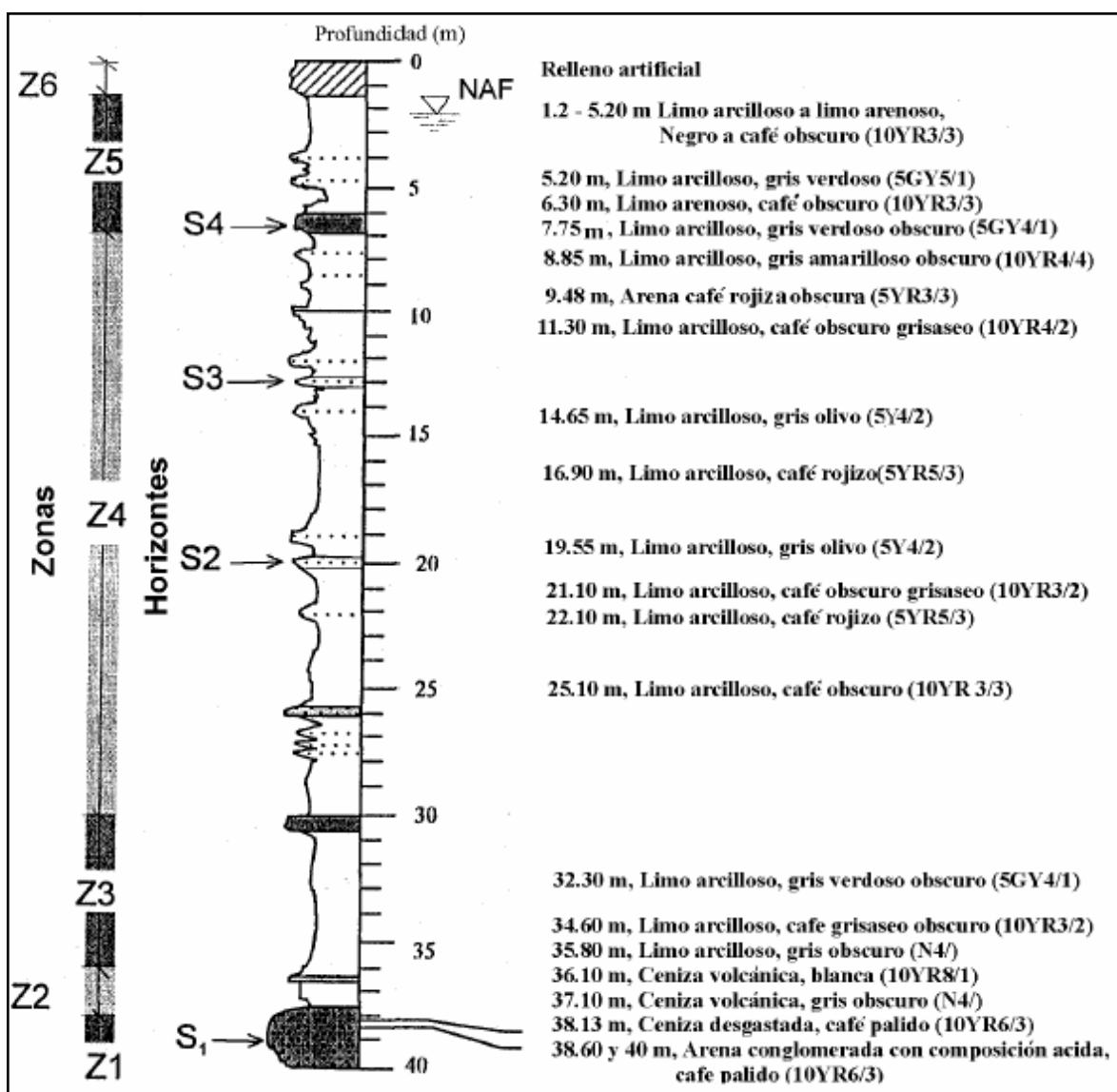


Figura 5.39.-Columna Estratigráfica del Parque Ramón López Velarde en la Ciudad de México (Díaz-Rodríguez et al., 1998).

Zona 5. Limo arcillosa con arena (7-3 m). En la base de esta zona se encuentra un Horizonte S4 de arena, el cual presenta el mayor contenido de arena (85%) de

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

todo el perfil. La granulometría de esta zona corresponde a una arena, con variaciones a limo arenoso y limo arcilloso.

Zona 6. Relleno artificial (3-0 m), esta zona 6 es un relleno artificial, producto de la actividad humana.

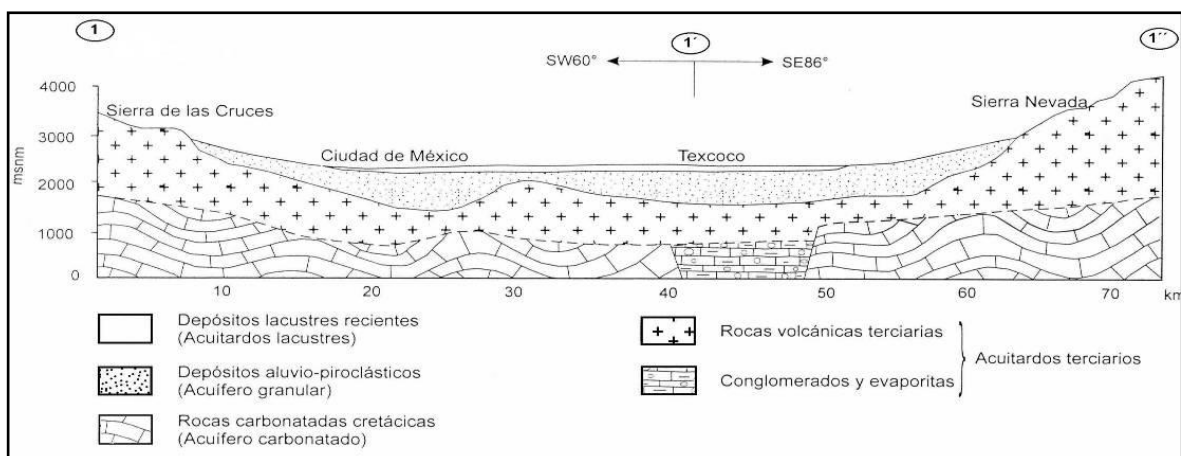
#### 5.4.- Condiciones Hidrogeológicas de la Cuenca de México

**5.4.1.- Extracción del agua subterránea y la subsidencia.** Hoy en día el proceso de extracción de agua potable en grandes volúmenes no es el más acertado, pues como parte de la industrialización nacional del siglo anterior, ocurrieron una serie de invasiones en zonas urbanas, lo que originó un crecimiento urbano acelerado en espacios muy pequeños, y la subsecuente generación de servicios en materia hidráulica, proyectos como el sistema Cutzamala, y el desarrollo de pozos de extracción en toda la cuenca de México.

La compactación de los suelos en algunos sistemas acuíferos puede asociarse al excesivo bombeo de agua de los pozos, siendo en algunos sitios de la ciudad de México, la principal causa del hundimiento. La sobreexplotación del acuífero ha dado lugar a hundimientos permanentes y fallas relacionadas con la compactación del suelo siendo este de varios metros.

En algunos sistemas, cuando grandes cantidades de agua se bombea, se compactan los materiales del subsuelo, lo que reduce en tamaño y número de los poros abiertos que el agua había sostenido anteriormente. Esto da como resultado una reducción permanente de la capacidad total de almacenamiento del sistema acuífero y por lo tanto de la cantidad de agua disponible.

**5.4.2.- Propiedades Hidráulicas de los Sedimentos Lacustres.** Se han identificado tres zonas hidrológicas principales para la cuenca de México: la zona lacustre, el piedemonte o zona de transición y la zona montañosa (Ortega y Farvolden, 1989). La distribución de estas tres zonas se muestra en la Figura 5.40. La zona lacustre se encuentra distribuida en la parte baja de la cuenca, en la planicie.



La región piedemonte se encuentra, por lo general, entre el lecho de los antiguos lagos y las montañas de mayor pendiente. Aquí, las capas de arcilla lacustre se intercalan con las de cenizas volcánicas y arena; en las áreas más cercanas a la base de las montañas, el piedemonte está compuesto en gran medida por basalto fracturado y por flujos volcánicos.

La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad de almacenamiento, y es considerada como el componente principal del acuífero en explotación; se encuentra expuesta cerca de la porción superior del piedemonte y se extiende por debajo de los depósitos aluviales de la cuenca. El piedemonte, conocido también como zona de transición, es importante para la recarga natural del acuífero.

Los depósitos de arcillas lacustres superficiales (por ejemplo, la capa de arcilla existente tanto en el fondo del lago antiguo como en el del actual) cubren el 23 por ciento de la superficie menos pronunciada del Valle de México. Los depósitos aparecen en formaciones divididas; un horizonte estratigráfico muy importante en el que se conoce como "capa dura"; la cual está compuesta principalmente de sedimentos y arena; la capa dura se localiza entre los 10 y los 40 metros de profundidad y sólo tiene unos cuantos metros de espesor. A las capas de arcillas lacustres superficiales que alcanzan una profundidad de 100 metros se les denomina acuitardo, y son considerablemente menos permeables que la capa dura o los sedimentos aluviales subyacentes.

El relleno aluvial se encuentra por debajo de las arcillas lacustres puede tener espesores entre 100 y 500 metros. Este material está inter-estratificado con depósitos de basalto, tanto del Pleistoceno como recientes, juntos, abarcan la porción superior del acuífero principal en explotación Otra unidad inferior del acuífero está compuesta por depósitos volcánicos estratificados que tienen de 100 a 600 metros de espesor, alcanza una profundidad que va de los 500 hasta los 1000 metros. Esta unidad más profunda está limitada por un depósito de arcillas lacustres del Plioceno.

**5.4.3.- Conductividad Hidráulica.** Ortega-Guerrero y Farvolden (1989) obtuvieron valores de conductividad hidráulica para las diferentes unidades hidrogeológicas de la Cuenca de México; estas unidades y sus valores de conductividad hidráulica se muestran en la tabla 5.2. Donde ( $K_h$ ,  $K_v$ ) son las conductividades hidráulicas horizontal y vertical, y describen el movimiento del agua con medios saturados, ( $E$ ) término empírico derivado basado en el tipo del suelo, y tamaño de grano del material.

La divisoria de agua subterránea no coincide con los parteaguas superficiales en las montañas. Las divisorias subterráneas están desplazadas hacia las subcuencas de mayor elevación que colindan con la cuenca de México; esto hace que el agua se distribuya de la siguiente manera: en la Sierra de Chichinautzin aproximadamente un 40% circula hacia la Cuenca de México y un 60% hacia el valle de Cuahutla-Cuernavaca; en la Sierra de las Cruces el 70% circula hacia la Cuenca de México y un 30% hacia el Valle de Toluca; para la Sierra Nevada el 50% se distribuye hacia la Cuenca de México y el otro 50% hacia el Valle de Puebla.

Acuitardo	Unidades	Kh(m/s)	Kv(m/s)
Acuitardo en los depósitos lacustres		5E-8	1E-8
Acuífero en rocas volcánicas cuaternarias		5E-6	1E-6
Acuífero en materiales piroclásticos y aluvión		5E-5	1E-5
Acuitardo en rocas volcánicas terciarias		1E-7	5E-7
Acuífero en rocas carbonatadas cretácicas		1E-5	1E-5

**Tabla 5.2.- Unidades hidrogeológicas para la Cuenca de México y sus valores de conductividad hidráulica (Ortega-Guerrero y Farvolden. 1989).**

A partir del análisis de los valores de la conductividad hidráulica por unidades hidro-estratigráficas se obtiene que en el acuitardo 1 los valores de la conductividad hidráulica varían de  $3 \times 10^{-11}$  a  $5 \times 10^{-8}$  m/s con una media geométrica de  $1.17 \times 10^{-9}$  m/s, mientras que en el acuitardo 2 la variación se reduce de  $4 \times 10^{-11}$  a  $5 \times 10^{-9}$  m/s e igualmente disminuye la media geométrica a  $1.5 \times 10^{-10}$  m/s; en el acuitardo 3 el único valor obtenido es de  $2.2 \times 10^{-11}$  m/s. Para los lentes de piroclastos la conductividad hidráulica varía de  $6 \times 10^{-8}$  a  $5 \times 10^{-6}$  m/s y tiene una media geométrica de  $2 \times 10^{-7}$  m/s; mientras que en los acuíferos salobres, varía de  $3.3 \times 10^{-8}$  a  $5 \times 10^{-8}$  m/s (Vargas-Cabrera y Ortega-Guerrero, 2002).

### **5.5.- Metodología aplicada en el estudio del fracturamiento con el objetivo de prevenir el riesgo hacia los inmuebles vulnerables a las afectaciones por hundimiento y fracturamiento del suelo en zonas urbanas.**

La aplicación de una metodología de trabajo para la identificación y monitoreo de las fracturas que se generan en suelos y rocas que afectan la infraestructura urbana (banquetas, guarniciones, pavimento) y principalmente en los inmuebles (casas, edificios etc.), ha demostrado la validez de su aplicación al aportarnos parámetros cinemáticos del comportamiento de las afectaciones por fracturamiento de estructuras, lo cuales son utilizados para definir la vulnerabilidad de los inmuebles y a la vez permite definir los criterios para prevenir y mitigar los riesgos.

La metodología aplicada comienza con la recolección de la información del fracturamiento en campo (figura 5.41), donde se obtiene la siguiente información: georeferenciación, medición de abertura, longitud, echado, cantidad por determinada área y morfología, posteriormente se procede a marcar la fractura con una nomenclatura y colocar testigos ya sea de yeso o con tres clavos o tornillos alineados. Posteriormente se toman fotografías. Si se tienen sedimentos rocas o suelos aflorando se hace una amplia descripción, textura, nivel de cohesión, etc. En la figura 5.41 se ejemplifica el procedimiento de la toma de datos del fracturamiento y colocación de testigos.

## Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología



Figura 5.41.- Proceso de obtención de la información del fracturamiento en campo (Mayo, 2010).

Con la información obtenida se comienza a realizar un expediente ya sea para cada grieta, en especial para las localizadas en la calle o para cada inmueble que este siendo afectado por el fenómeno de hundimiento y fracturamiento del suelo.

Las figuras 5.42, y 5.43, muestran los formatos para los cuales se registra la información de las afectaciones y del monitoreo del fracturamiento, con lo cual se elabora un expediente técnico, social y fotográfico en una tarjeta informativa con las direcciones e información social de los habitantes de los inmuebles.

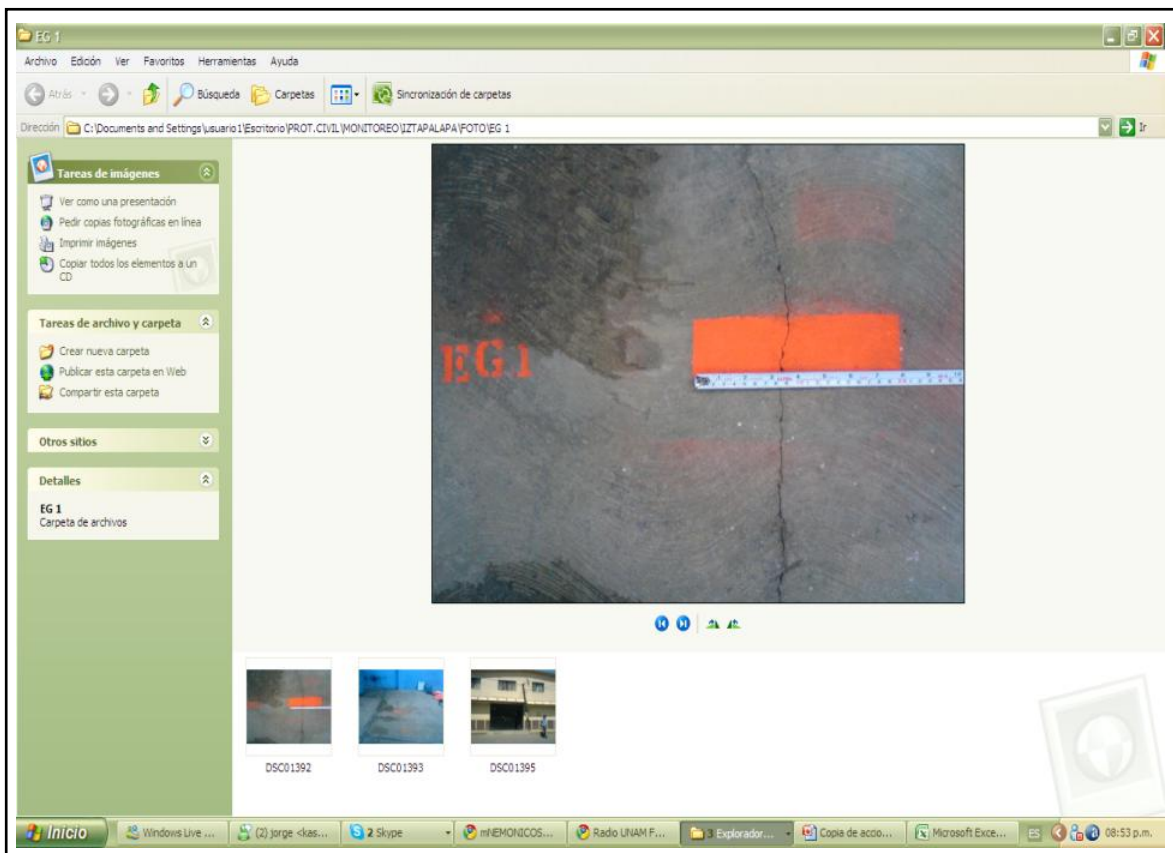


Figura 5.42.- Base de datos en el que se registra la información sobre el fracturamiento en la Ciudad de México. Hipervínculo con archivo fotográfico (Junio, 2010).



## Habitar Sin Riesgo





**NOTA INFORMATIVA**

**Monitoreo de grietas en la Delegación Iztapalapa**

**5 de Junio 2009**

Grieta Detectada	Ubicación	Observaciones	Reporte Fotográfico	Conclusiones
EG 1	Everardo Gamiz Mz 148 Lt. 29  Col. Lomas de San Lorenzo	<p>Predio de aproximadamente de 140 m<sup>2</sup> de terreno y 90m<sup>2</sup> de construcción, exclusivo donde presentan fuerte deterioro por la presencia de grietas en el inmueble que generalmente presenta una dirección de rumbo NE-SW.</p> <p>Esta grieta tiene una marca como testigo de 0.20 m y su apertura real es de 1 mm, la longitud aproximada es de 1.99 m.</p> <p>La ubicación de esta grieta se tomo en coordenadas geográficas N 19°19'9.4" W 99°4'6.4"</p>	  	<p>Las condiciones del inmueble nos indican que la presencia de las grietas seguirán incrementándose debido a las condiciones del subsuelo esto dará un cambio de <b>Riesgo Medio</b> a <b>Riesgo Alto</b>.</p> <p>La grieta EG 1 apareció 15 días antes de que fuera marcada por lo cual se le enseñó a los habitantes como monitorearla y así si ocurriera un cambio en esta grieta se ponga en contacto con personal de la SPC.</p> <p>El poste que se ve en la fotografía de la esquina superior derecha genera carga sobre la casa ya que es muy pesado ya que es de hierro macizo y sea causa probable de alteración de los pisos de la casa en su primer piso.</p>

Figura 5.43.- Formato para registrar la información del fracturamiento. Hipervínculo nota informativa (Junio, 2010).

La principal información obtenida en campo y ajuntada a la base de datos es la siguiente:

- Ubicación catastral, coordenadas geográficas.
- Longitud de abertura de la grieta y testigo.
- Longitud y dirección de la grieta.
- Cantidad de fracturas por unidad de área.
- Descripción de las principales características del tipo de fracturamiento.
- Principales afectaciones.
- Ubicación y tipo de riesgo del predio afectado.
- Fecha de la marcación y colocación del testigo y de los subsecuentes monitoreos; se registra si existe diferencia entre mediciones, con lo que podemos deducir si progresa o no el desplazamiento.
- Hipervínculo con archivo fotográfico y con nota informativa.

Con toda esta información se procede a capturar la información en una hoja de cálculo (figura 5.44), que sirve como base de datos a la cual se le anexan los hipervínculos con el expediente fotográfico y la tarjeta informativa. Tal es el caso de una vivienda localizada en Av. de las Torres Mz.38, Lt. 11, de la Colonia Lomas de San Lorenzo (figura 5.45); en la cual se detecta la progresión cinemática del fracturamiento en un muro exterior, lo cual nos indica la velocidad de la afectación a la estructura y con ello se puede definir si la vivienda es habitable o si procede la evacuación preventiva de los habitantes por su seguridad, hasta definir si esta es apuntalada, reestructura o demolida.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

NOMBRE	MEDIDAS DE APERTURA			DIRECCI	COORDENADAS	PREDIO AFECTADO		FECH	FOTO	NOTA INFORMATIVA
	REAL (mm)	TESTIGO (m)	LONGITUD (m)			UBICACION	TIPO DE RIES			
CM1	0.005	0.41	7.70	NE-SW	N 19°19'10.6" / W 99°3'59.6"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM1	NOTA INFORMATIVA/CM1.pdf
CM2	0.045	1.21	7.70	NE-SW	N 19°19'10.2" / W 99°4'0.1"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM2	NOTA INFORMATIVA/CM2.pdf
CM3	0.003	1.16	7.70	NE-SW	N 19°19'10.2" / W 99°4'0.1"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM3	NOTA INFORMATIVA/CM3.pdf
CM4	0.005	1.44	7.70	NE-SW	N 19°19'10.2" / W 99°4'0.1"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM4	NOTA INFORMATIVA/CM4.pdf
CM5	0.005	0.42	5.00	NV-SE	N 19°19'10.2" / W 99°3'59.4"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM5	NOTA INFORMATIVA/CM5.pdf
CM6	0.005	0.20	7.70	NE-SW	N 19°19'10.5" / W 99°3'59.8"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM6	NOTA INFORMATIVA/CM6.pdf
CM7	0.015	0.20	7.70	NE-SW	N 19°19'10.5" / W 99°3'59.8"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM7	NOTA INFORMATIVA/CM7.pdf
CM8	0.007	0.20	3.20	N-S	N 19°19'10.3" / W 99°3'59.9"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM8	NOTA INFORMATIVA/CM8.pdf
CM9	0.01	0.20	1.56	N-S	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM9	NOTA INFORMATIVA/CM9.pdf
CM10	0.005	0.20	5.30	NV-SE	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	01/06/2009	FOTO/CM10	NOTA INFORMATIVA/CM10.pdf
CM11	0.003	0.20	1.45	NV-SE	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM11	NOTA INFORMATIVA/CM11.pdf
CM12	0.002	0.20	1.90	N-S	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM12	NOTA INFORMATIVA/CM12.pdf
CM13	0.005	0.20	5.04	NE-SW	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM13	NOTA INFORMATIVA/CM13.pdf
CM14	0.005	0.20	4.85	NE-SW	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM14	NOTA INFORMATIVA/CM14.pdf
CM15	0.005	0.20	1.50	NE-SW	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM15	NOTA INFORMATIVA/CM15.pdf
CM16	0.010	0.20	1.50	NE-SW	N 19°19'10.4" / W 99°3'59.2"	VISTA HERMOSA # 15	RM	04/06/2009	FOTO/CM16	NOTA INFORMATIVA/CM16.pdf
PH1	0.015	0.20	3.95	NE-SW	N 19°19'9.6" / W 99°4'2.7"	PROL HORTENCIA LT10 MZ	RA	01/06/2009	FOTO/PH1	NOTA INFORMATIVA/PH1.pdf
PH2	0.015	0.20	3.95	NE-SW	N 19°19'9.2" / W 99°4'2.8"	PROL HORTENCIA LT10 MZ	RA	01/06/2009	FOTO/PH2	NOTA INFORMATIVA/PH2.pdf
FAZ1	0.005	0.20	1.27	NE-SW	N 19°19'9.2" / W 99°4'6.5"	FLOR DE AZHAR LT3F MZ50	RA	04/06/2009	FOTO/FAZ1	NOTA INFORMATIVA/FAZ1.pdf
FAZ2	0.20	0.20	3.99	NE-SW	N 19°19'9.6" / W 99°4'6.3"	FLOR DE AZHAR LT3F MZ50	RB	04/06/2009	FOTO/FAZ2	NOTA INFORMATIVA/FAZ2.pdf
FAZ3	0.003	0.20	3.50	MURO GV	N 19°19'9.6" / W 99°4'6.3"	FLOR DE AZHAR LT3F MZ50	RB	04/06/2009	FOTO/FAZ3	NOTA INFORMATIVA/FAZ3.pdf
FAZ4	0.01	0.20	3.50	MURO GV	N 19°19'9.4" / W 99°4'6.4"	FLOR DE AZHAR LT3F MZ50	RA	04/06/2009	FOTO/FAZ4	NOTA INFORMATIVA/FAZ4.pdf
EG1	0.001	0.20	1.99	NE-SW	N 19°19'9.4" / W 99°4'6.4"	EVERARDO GAMIZ	FM	05/06/2009	FOTO/EG1	NOTA INFORMATIVA/EG1.pdf
EG2	0.002	0.20	1.45	NE-SW	N 19°19'9.4" / W 99°4'6.4"	EVERARDO GAMIZ	FM	05/06/2009	FOTO/EG2	NOTA INFORMATIVA/EG2.pdf
EG3	0.004	0.20	1.80	NE-SW	N 19°19'9.4" / W 99°4'6.4"	EVERARDO GAMIZ	FM	05/06/2009	FOTO/EG3	NOTA INFORMATIVA/EG3.pdf

Figura 5.44.- Bitácora de datos sobre el monitoreo del fracturamiento de la ZEP (Zona Especial dePrevención) Lomas de San Lorenzo, Delegación Iztapalapa (Junio, 2010).

Grieta Detectada	Ubicación	Observaciones	Reporte Fotográfico	Conclusiones
AVT 4B	Avenida de las Torres. Mz 38 Lte 11 Col. Lomas de San Lorenzo	Presencia de agrietamiento en esta calle a lado de los ductos de PEMEX.  Esta grieta tiene una marca como testigo de 10 cm y su apertura real es de 2 mm, la longitud es de 2 m.		La grieta en este muro mas que por efecto geológico es mas probable que sea por problemas estructurales en la vivienda, incrementándose debido a las condiciones del subsuelo por lo que actualmente se considera de <b>Riesgo Bajo</b> .

Arriba nota informativa de Junio del 2009, de una vivienda que esta siendo afectada por hundimiento y fracturamiento de su estructura.

Abajo imágenes de Febrero del 2010, del proceso de monitoreo del fracturamiento.

Note la diferencia en la posición del testigo de pintura colocado en un lapso de ocho meses.

Figura 5.45.- Esta imagen representa el proceso de monitoreo de el fracturamiento en la estructura de un inmueble, la cual involucra la inspección periódica de los sitios en campo y la continua documentación de información obtenida, con lo cual se generan opiniones de riesgo y se decide la habitabilidad de las viviendas (Junio, 2010).



La aplicación de esta metodología de trabajo ha aportado resultados interesantes y útiles en la toma de decisiones en cuanto a la habitabilidad de los inmuebles y en la definición de los proyectos de mitigación del riesgo.

**5.5.1.- Descripción de las características del fracturamiento en las estructuras civiles.** El grado de esfuerzos al que están sometidos los inmuebles al desajustarse el estado de estabilidad natural del subsuelo bajo sus cimentaciones, ya sea por causas naturales o inducidas, conlleva al desajuste de los puntos de carga de las estructuras, provocando compresión y consecuentemente fracturamiento de los elementos estructurales, las manifestaciones más características, de estos efectos de fracturamiento se mencionan a continuación.

**5.5.1.1.- Fracturamiento en muros de Mampostería.** El movimiento en las estructuras de las viviendas y edificios, principalmente es reflejado en la aparición de fracturas y grietas en los muros, ya sean diagonales, horizontales o combinación (figura 5.46), las cuales indican el sentido del movimiento. En la figura 5.47, las fracturas diagonales en el muro izquierdo representan movimiento compresivo hacia la izquierda y análogamente en el muro derecho hay movimiento compresivo hacia la derecha.

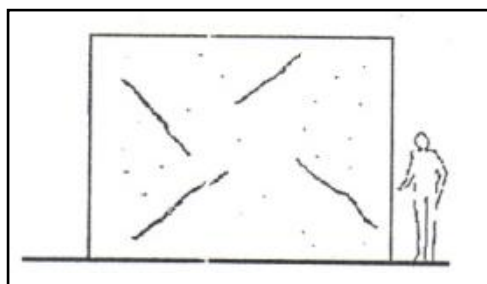


Figura 5.46.- Cuando el muro se mueve en ambos sentidos se observan estas grietas.

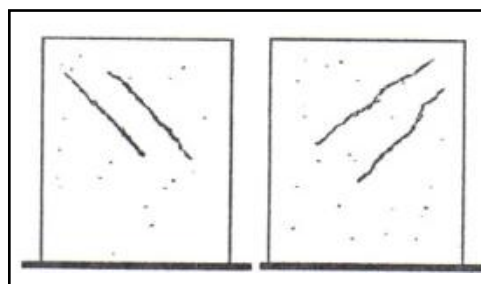


Figura 5.47.- Cuando el muro se mueve en un solo sentido se observan estas fisuras.

Las fracturamientos y grietas horizontales representan principalmente la compresión vertical, sobrecarga y debilitamiento de los muros (figura 5.48); el desplome de las estructuras puede ser causa del debilitamiento de la cimentación generado por algún hundimiento diferencial del suelo (figura 5.49).

Figura 5.48.- Fracturamiento horizontal.

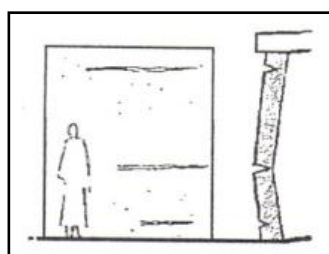
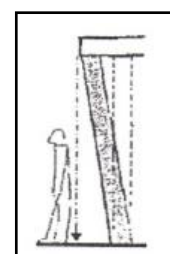


Figura 5.49.- Desplome: pérdida de verticalidad de muro.



En la tabla 5.3 Se resumen las características del fracturamiento en muros y el grado de afectación, del cual se puede deducir el grado riesgo que generan los inmuebles.

Tabla 5.3. Características del fracturamiento en muros y el grado de afectación.

GRADO	ESTADO DE DAÑO DE MUROS DE MAMOSTERÍA
I	Fracturas pequeñas, difícilmente visibles sobre la superficie del muro. Fracturas mínimas en castillos y dalas de confinamiento. (Grietas con anchos menores de 0.2 mm).
II	Fracturas claramente visibles sobre la superficie del muro. ( Fracturas con anchos entre 0.2 y 1.0 mm)
III	Inicio de la formación de fracturamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas. Fracturas grandes en la superficie del muro (ancho entre 1 y 3 mm).
IV	Fracturamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas o en muros de relleno ligados a marcos de concreto reforzado (ancho de grietas mayores de 3 mm). Inicio de la formación de fracturamiento diagonal en muros sin castillo y dalas.
V	Desprendimiento de partes de piezas. Aplastamiento local de la mampostería. Prolongación del fracturamiento diagonal en castillo en dalas (ancho de fracturas mayores de 1 cm). Fracturamiento diagonal en muros sin castillo y dalas. Deformación, inclinación horizontal o vertical apreciable del muro.

Los frecturamientos paralelos y coincidentes con las uniones de dos muros figura 5.50, se generan por fuerzas sísmicas que generan esfuerzos tensiónales sobre la estructura en varias direcciones, estas son de menor riesgo.

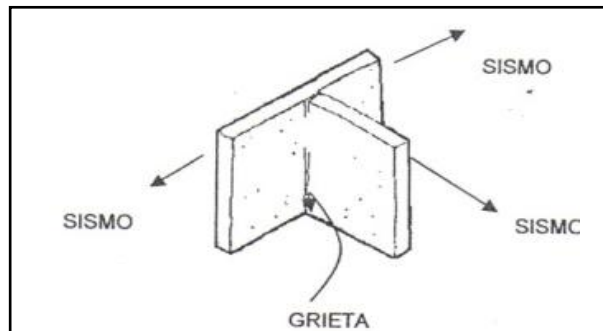


Figura 5.50.- Las fracturas en la unión de dos muros no es peligrosa los muros se movieron por el sismo.

**5.5.1.2.- Fracturamiento en miembros estructurales.** La presencia de fracturamiento en los elementos estructurales manifiesta un grado mayor de afectación en la estructura completa y manifiesta el avanzado grado de deformación. En la figura 5.51 se ilustra las afectaciones predominantes en columnas. Las fracturas horizontales se generan por flexión, las diagonales por esfuerzo cortante, existe combinación de ambas; en la columna central izquierda las fracturas tipo sigmoide vertical son generadas por deslizamiento del refuerzo, la pérdida del recubrimiento se debe principalmente a la compresión del elemento.

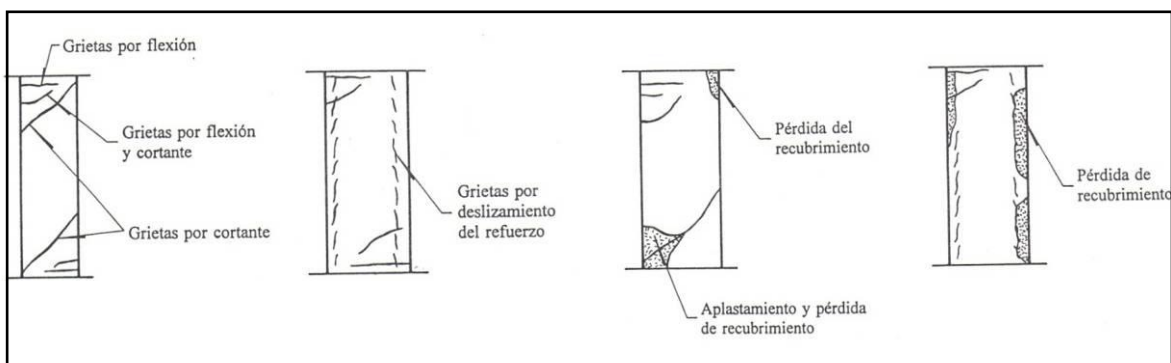


Figura 5.51.- Afectaciones predominantes en elementos de carga.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

La tabla 5.4, resume el tipo de características predominantes y grado de afectación que representa el fracturamiento en los elementos de carga.

Tabla 5.4.

<b>GRADO</b>	<b>ESTADO DE DAÑO DE MIEMBROS ESTRUCTURALES</b>
<b>I</b>	Fracturas pequeñas pero visibles sobre la superficie de concreto. (Fracturas con ancho menor de 0.2 mm).
<b>II</b>	Fracturas claramente visibles sobre la superficie de concreto. (Fracturas con ancho entre 0.2 y 1.0 mm).
<b>III</b>	Fracturamiento local del recubrimiento de concreto. Fracturas grandes (ancho entre 1 y 2 mm).
<b>IV</b>	Fracturamiento apreciable del concreto. Pérdida del recubrimiento y presencia de barras expuestas.
<b>V</b>	Barras de refuerzo pandeadas. Núcleo del concreto agrietado. Aplastamiento de la columna/muro. Asentamiento o inclinación en el sistema de piso.

### 5.6.- Ejemplos de zonas especiales de prevención (ZEP) con mayor vulnerabilidad asociada a la potencial afectación generada por el fracturamiento y hundimiento del suelo al Oriente de la cuenca de México.

En este subtema se describen y evalúan algunas zonas donde los fenómenos de hundimiento y fracturamiento del suelo han sido recurrentes y están generando daños considerables a las obras e infraestructura civiles, estos sitios se localizan en diferentes lugares dentro de la zona oriente de la cuenca de México.

Las casas comienzan a ser dañadas a partir de pequeñas fisuras, las cuales comienzan a crecer en longitud y anchura, y comienza a fracturarse y deformarse el piso, es común que los muebles se inclinen o desplomen comenzando a recargarse unos contra otros. En la figura 5.52, se representan con elipses rojas y número, algunos sitios donde se está manifestando la problemática del hundimiento y agrietamiento del suelo, con su consecuente afectación a inmuebles de varias colonias en diferentes Delegaciones de la zona oriente de la cuenca de México. La problemática de cada uno de estos sitios se menciona a continuación.

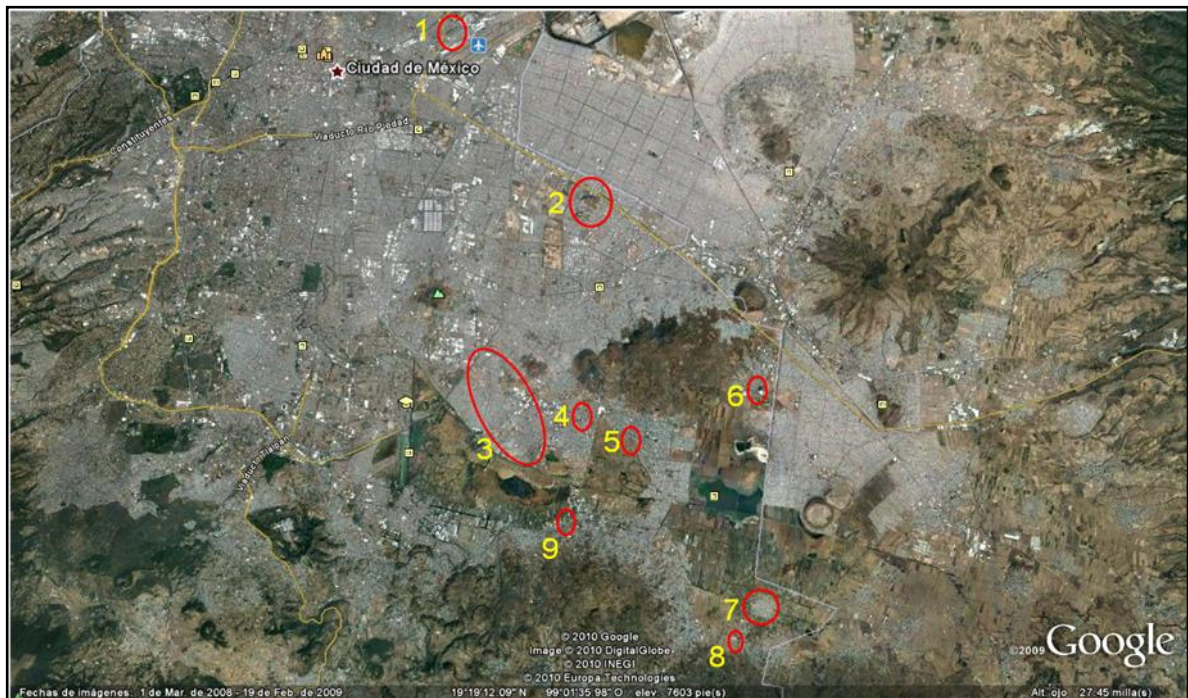


Figura 5.52.- Imagen de satélite de la cuenca de México, donde se muestran dentro de las elipses rojas algunas zonas especiales de prevención (ZEP) que son afectadas por el hundimiento y agrietamiento del suelo. Modificado de (Google Earth, 2010).

Las ZEPs marcadas en la imagen corresponden a los sitios con mayor número de inmuebles afectados por las manifestaciones de hundimiento y agrietamiento del suelo en la cuenca de México.

ZEP 1.- Peñón de los Baños, Delegación Venustiano Carranza.

ZEP 2.- Peñón del Márquez, Delegación Iztapalapa.

ZEP 3.- Periferia sur de la Sierra de Santa Catarina. Colonias Lomas de San Lorenzo, San Lorenzo Tezonco, el Molino, Cananea y la Planta, en la Delegación

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Iztapalapa y Colonias del Mar, Agrícola Metropolitana, Miguel Hidalgo, Pueblos de Zapotitlán y Santa Catarina; Col. Ojo de Agua, Delegación Tlahuac.

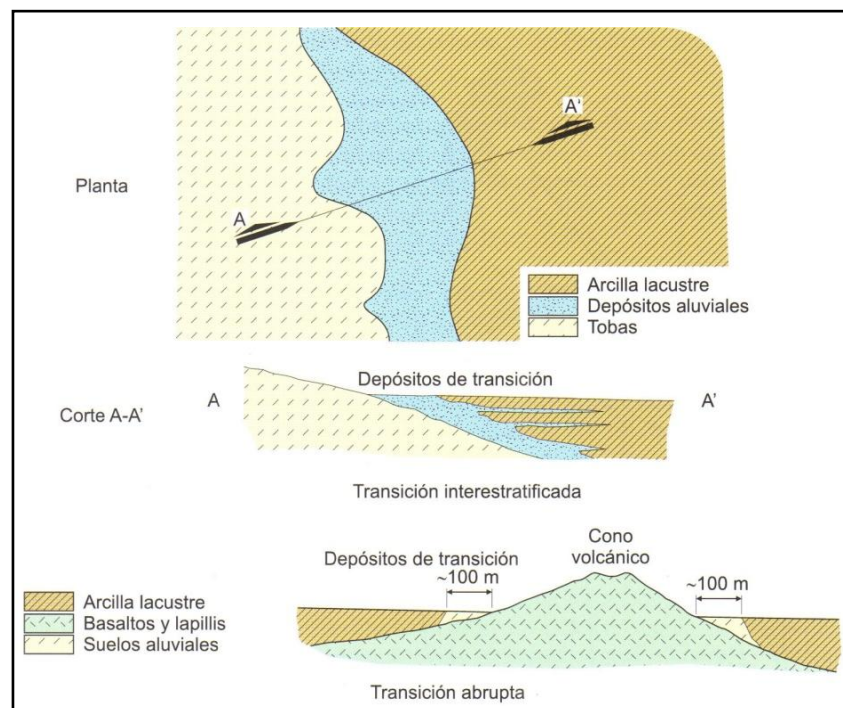
ZEP 4.- Pueblo de Mixquic, Delegación Tlahuac.

ZEP 5.- Pueblo de San Antonio Tecomitl, Delegación Milpa Alta.

ZEP 6.- Pueblo de San Luis Tlaxialtemelco, Delegación Xochimilco.

**5.6.1.- Zona especial de prevención (1), Colonia Peñón de los Baños en la Delegación Venustiano Carranza.** Geológicamente el cerro del Peñón de los Baños es una estructura volcánica, la cual está formada por una sucesión de flujos piroclásticos y derrames de lavas no diferenciadas de composición basalto-andesítica del Mioceno Tardío. Posteriormente a la formación del volcán este se convirtió en una isla dentro del lago de la cual su periferia fue sepultada progresivamente por depósitos clásticos, los cuales van disminuyendo el tamaño de su granulometría al alejarse de la estructura volcánica hacia las cuencas periféricas e irse convirtiendo desde depósitos de pie de monte hasta arcillosos de tipo lacustre que corresponden al cuaternario y se extienden hacia las zonas planas próximas, tal es el caso del aeropuerto internacional de la ciudad de México y las colonias circundantes.

En la figura 5.53, se muestra la forma predominante en que se depositan los sedimentos alrededor del aparato volcánico rodeado o limitado en alguna sección por zona lacustre, se distinguen los límites y las fluctuaciones de los depósitos sedimentarios, habría que imaginar la forma en que estarían dispuestas algunas capas de material piroclástico sobre estos depósitos.



De acuerdo a la zonificación geotécnica para la cuenca de México el área escarpada del Peñón corresponde a la zona I, el área periférica próxima con menor pendiente al Peñón, representada por los depósitos aluviales de granulometría decreciente al alejarse de la estructura volcánica, corresponde a la zona II y la zona periférica llana está representada por la zona III. Las cuales de acuerdo al reglamento de construcciones del DF en su artículo 170, corresponden a la zona I de lomeríos, zona II de transición y la zona III lacustre.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

En la proximidad del Peñón de los Baños se están generando agrietamientos y hundimientos de suelo en calles circundantes, lo cual está afectando la infraestructura urbana y varias viviendas (figura 5.54), en su flanco NW los agrietamientos de suelo siguen un patrón NE-SW con un arreglo principalmente paralelo y en el flanco SE hay tendencia E-W y N-S en el flanco oriente. Estos agrietamientos coinciden paralelamente con el trazo de las calles.



Figura 5.54.- Localización de crecimientos dimensionales de los asentamientos y de las trazas del fracturamientos en el subsuelo, en la Col. Peñón de los Baños en la Delegación Venustiano Carranza (Modificado de Google, 2010).

En el flanco SE dentro de la zona controlada donde se localiza el radar aéreo, en la margen izquierda de la vía de acceso hay varios cortes realizados en las laderas (figura 5.55) los cuales han dejado expuestas secciones de roca que muestran parte de la secuencia volcánica y se distinguen varios patrones de fracturamiento y fallamiento.



Figura 5.55.- Imágenes de las secuencias volcánicas del Peñón de los Baños (Junio, 2010).

En la figura 5.55, se muestran detalles de planos de falla que afectan la estructura del estratovolcán del peñón de los baños, se considera que el sistema de fallamiento es activo y tiene relación con las manifestaciones hidrotermales que

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

se presentan en su proximidad, las imágenes fueron tomadas dentro de las instalaciones del radar del aeropuerto y muestran parte de la secuencia volcánica a la izquierda hay tobas y cenizas, y en estas se aprecia un plano de falla; en la imagen derecha hay tobas, brechas y derrames de tipo andesítico.

En el flanco poniente del Peñón de los Baños, se localizan manifestaciones hidrotermales, las cuales acusan la existencia de una mínima actividad volcánica. Los patrones de fracturamiento en la periferia del peñón al parecer están controlados por la topografía y los cambios litológicos en el subsuelo y en la superficie, lo cual puede considerarse que corresponde a las paleo-periferias de las emisiones volcánicas y los contactos con los depósitos de tipo clásticos y lacustres.

En la figura 5.56 se muestra una vista panorámica de las calles Colones y Cuernavaca, y en la fig. 5.57 se muestran las afectaciones en la calle Sinaloa.



Figura 5.56.- Vista panorámica en la calle Colones y Cuernavaca donde la fractura tiene una dirección de N20°E donde también se observan puntos de control sobre todo en la vivienda No. 20, fotografía superior derecha (2010).

Estos fenómenos de fracturamiento y hundimiento del suelo, pueden ser atribuidos a la clara diferencia topográfica y por ende mecánica, entre los materiales que comprenden a las zonas de contacto entre roca volcánica, pie de monte y depósitos lacustres.

Las características naturales del sitio han sido modificadas antropogenicamente al desarrollarse el trazo de la calles en forma casi paralela a los flancos del Peñón y zonas de transición de suelos circundantes que presentan una pendiente suave decreciente, otro factor de gran importancia es el abatimiento de los niveles freáticos circundantes, que han provocado que se generen zonas o franjas periféricas afectadas por esfuerzos de tensión como resultado de los procesos de la compactación diferencial del subsuelo.



Figura 5.57.- Vista panorámica del fracturamiento con dirección NW5E en la calle Sinaloa afectando a los predios Morelos No. 76 y 58-b (2010).

**5.6.2.- Zona especial de prevención (2) Peñón del Márqués o Peñón Viejo, en la Delegación Iztapalapa.** El Peñón del Márquez situado al sur de la Calzada I. Zaragoza figura 5.58, es un cono compuesto o estratovolcán con un radio aproximado de 1 Km, el cual está constituido por coladas de lava de 2 a 5 m de espesor de tipo andesítica-basáltica y depósitos piroclásticos representados por la alternancia entre capas de ceniza de 1a 3 m y capas gruesas de escoria de hasta 15 m.

Según R. del Castillo Muris (1978), el Peñón consistió de dos estructuras sobrepuestas, la mayor y más joven se sitúa al norte y la más antigua y menor al sur. Ambas están separadas por una depresión o banco de materiales.

Este volcán estuvo algún tiempo circundado por el extinto lago de la cuenca de México, circunstancia que generó que en su periferia próxima se fuesen depositando sedimentos de tipo pie de monte en una planicie inclinada con un ángulo aproximado de  $6^\circ$  en su contacto con la ladera del Cerro de aproximadamente  $20^\circ$  lo que define el límite preciso entre ambos relieves, y en su periferia próxima y llana hay depósitos aluviales de granulometría mucho más fina correspondiente con las zonas lacustres profundas. Actualmente este volcán tiene una altura máxima sobre el nivel del mar (snm) de 2400 m y sobre la planicie lacustre se eleva 160 m, y su diámetro es de un kilómetro.

Este volcán es semejante a los que constituyen la sierra de Santa Catarina y al peñón de los Baños, este último se localiza más al norte y centro de la cuenca, y presenta un mayor grado de sepultamiento por depósitos lacustre, seguido del Peñón del Marqués y la Sierra de Santa Catarina;

El peñón de los Baños, presenta un grado de meteorización, fallamiento y fracturamiento mucho mayor en comparación a las otras estructuras volcánicas, y por tales características se deduce que es más antiguo que el Peñón del Marqués y la Sierra de Santa Catarina respectivamente.





Figura 5.58.- Localización de los crecimientos dimensionales de las trazas del fracturamientos en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas de las colonias circundantes al Peñón del Márquez en la delegación Iztapalapa (Modificado de Google, 2010).

En las zonas circundantes al Peñón del Márqués se distinguen tres formas de relieve, las laderas, una franja periférica de pie de monte y la planicie lacustre. Las cuales han sido urbanizadas irregularmente y generan daños diferentes a la infraestructura civil.

La zona de pie de monte es una franja de terreno circundante a las laderas del cono, con una inclinación aproximada de 5 a 7 grados extendiéndose y disminuyendo su pendiente hacia las planicies lacustres, con un radio de 0.5 a 1 Km; está constituida principalmente por material tipo volcánico areno-limoso y limo arcilloso. Según R. del Castillo Muris (1978), a estas secuencias piroclásticas le subyacen arcillas de alta compresibilidad alcanzando la profundidad de 77 m, y así mismo las capas de material volcánico penetran las capas de material compresible con una inclinación de 10 %.

Las arenas-limosas de la superficie periférica, son de compresibilidad media a alta y con un contenido de agua del 100%, a profundidad le siguen arcillas de alta compresibilidad con un contenido variable de agua del 100 al 400%, estratificadas con arenas limosas de baja compresibilidad y grosor variable. Finalmente se presentan capas de arena, grava con escoria, las cuales se consideran para un radio de 600 a 1000 m a partir de la periferia del cerro.

Existe el antecedente desde la década de los sesentas de fracturamiento anular en la periferia del cono atribuible al fenómeno de extracción de agua, lo cual genera una consolidación diferencial que da lugar a una expansión de la superficie del terreno lo cual crea áreas de tensión y agrietamiento. Y por tal circunstancia han sido afectadas y demolidas varias viviendas a la fecha.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Se han realizado varias mediciones sobre el hundimiento del terreno en la periferia del Peñón. R.F. Murillo (1990), señala que entre 1978 y 1979 el hundimiento alcanzó los 15.4 cm/año, (GAVM, 1991), menciona que entre 1977 y 1985 el hundimiento promedio fue de 10 y 25 cm/año, lo cual arroja hasta 2 m de desnivel.

El hundimiento de la planicie lacustre provoca un desequilibrio en la planicie de pie de monte, la que aparentemente se desliza a partir de su contacto con la ladera volcánica de mayor pendiente figura 5.59, Este proceso complejo de hundimiento y deslizamiento, produce en consecuencia grietas de tensión en la periferia del cerro, dispuestas en distinta altitud en escalonamientos de hasta cuatro niveles, en dirección a la inclinación del terreno.

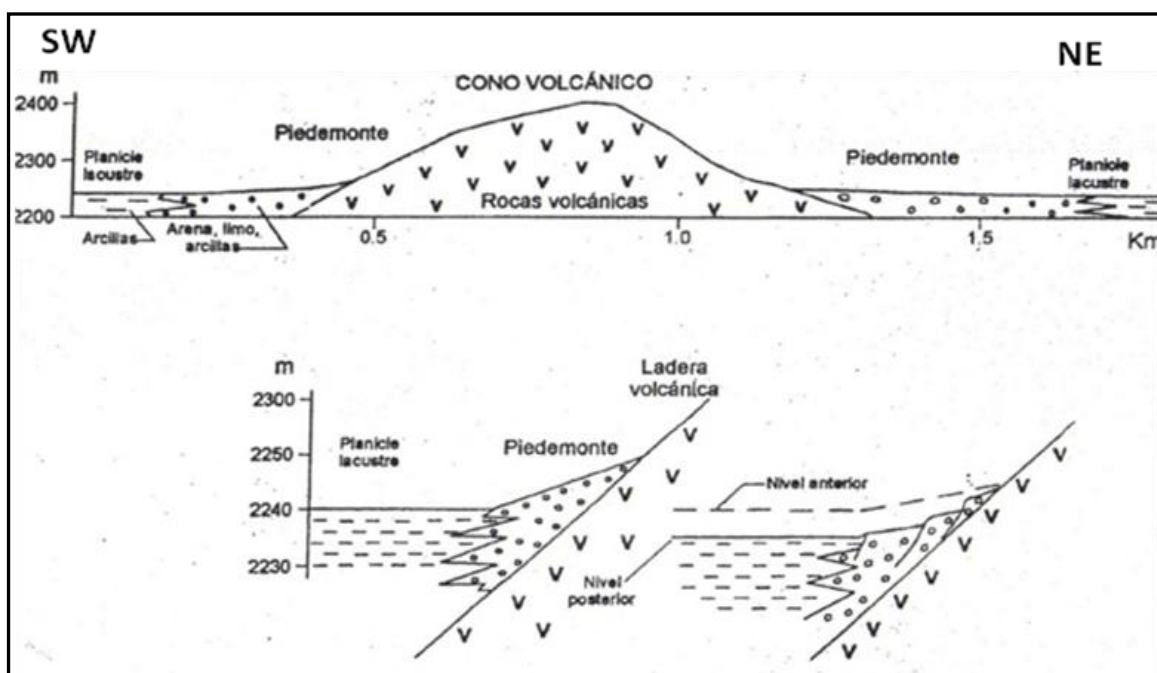


Figura 5.59.- Proceso de agrietamiento en la zona de pie de monte, de forma paralela a la estructura rígida del volcán y generadas por el hundimiento de la zona lacustre (Cabral C., Lugo H., 2008).

La planicie lacustre circundante es la superficie plana originalmente horizontal que resultó de la desecación paulatina del Lago de Texcoco,

En la zona circundante al Peñón del Marqués, se han perforado las baterías de pozos de extracción de agua más antiguas de la cuenca de México, los cuales a la fecha continúan extrayendo un menor caudal, circunstancia que vislumbra los profundos abatimientos del nivel freático de esta zona periférica.

La figura 5.60 muestra la ubicación de 7 pozos de bombeo del Departamento del Distrito Federal, los cuales justamente coinciden o están próximos a los sitios de mayor afectación por hundimiento y fracturamiento de suelo en la periferia del volcán.

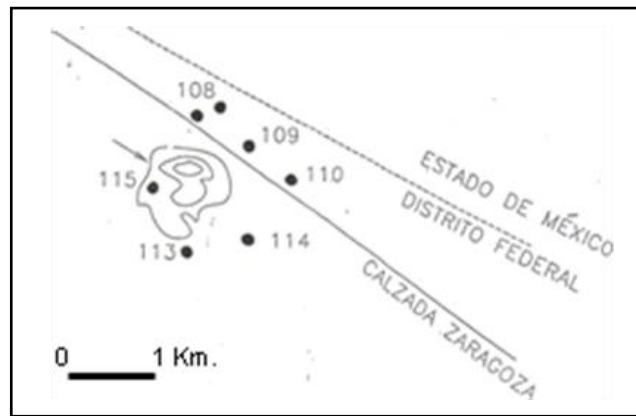


Figura 5.60.- Ubicación de 7 pozos de bombeo del Departamento del Distrito Federal (DDF, 1993).

La profundidad del nivel piezométrico en estos pozos en 1993 era de entre 30 y 50 metros, con un incremento desde la porción NE del Peñón hacia el SW, hacia el Cerro de la Estrella.

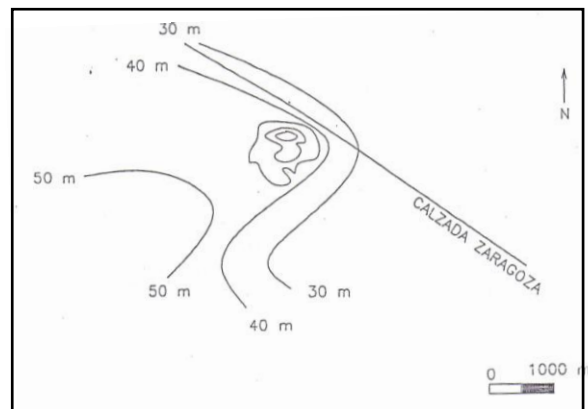


Figura 5.61.- Profundidad del nivel piezométrico en 1993 (DDF, 1993).

La carga hidráulica de los pozos en 1993 fue entre 2190 y 2210 m sobre el nivel del mar, los equipotenciales se presentan en la figura 5.62, donde el movimiento del agua subterránea es NE a SW, concentrándose en el Cerro de la Estrella.

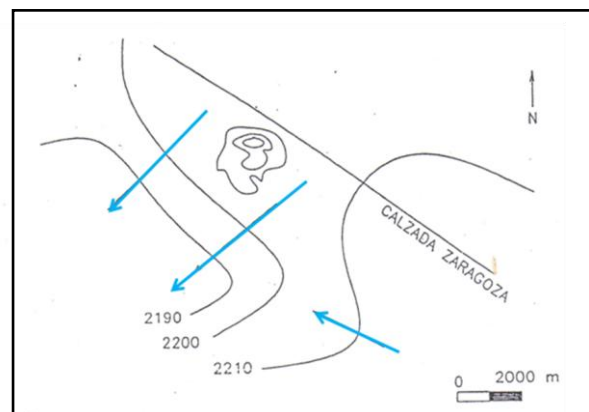


Figura 5.62.- Equipotenciales y líneas de flujo 1993 (DDF, 1993)

Se sabe que hasta las décadas de los cincuentas y sesentas del siglo pasado, las manifestaciones hidrotermales que emanaban del volcán eran abundantes, e incluso se construyeron balnearios termales próximos al volcán, podemos deducir

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

por lo mostrado en los diagramas anteriores que estas emanaciones han desaparecido por el descenso del nivel freático.

A partir de la década de los cuarenta se comenzó a extraer material destinado a la construcción, lo cual trajo como consecuencia la reducción de aproximadamente un 40% del volumen original de la estructura volcánica, generando un cambio en su morfología, circunstancia que facilitó el desplante de una gran cantidad de viviendas en las laderas de su periferia, e incluso en el área interna del cráter existen colonias y tres unidades habitacionales (véase figura 5.58).

La consolidación diferencial generada por los cambios litológicos y de la pendiente, produce el alargamiento de la superficie del terreno creando áreas de tensión y agrietamiento que se manifiestan en las zonas de mayor debilidad y donde el cambio de pendiente en el subsuelo de los materiales incompresibles es más brusco R. F. Murillo 1978.

Entre los trabajos que se han realizado está el de R. del Castillo, 1978, quien realizó un perfil perpendicular al trazo de grietas escalonadas localizadas dentro de las instalaciones de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Unidad Zaragoza, perteneciente a la UNAM. Figura 5.63, muestra los puntos en color rojo, donde se realizaron los sondeos, estos coinciden con el trazo de tres grietas paralelas, a la derecha se muestra un perfil del subsuelo que ejemplifica la alternancia de sedimentos lacustres, arcillas con limos, arenas con gravas y presencia de materia orgánica.

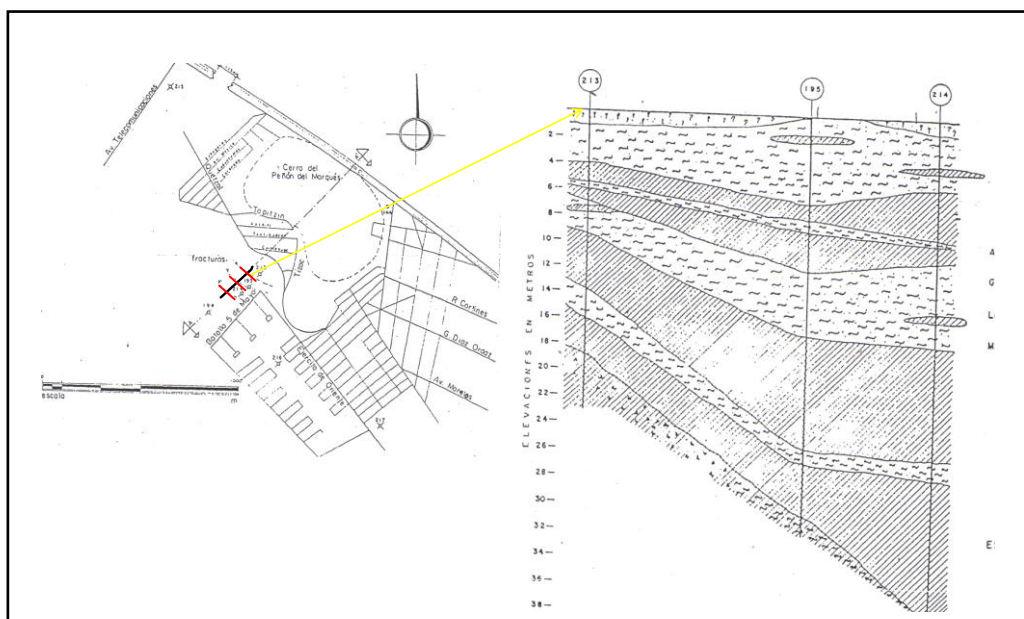


Figura 5.63.- La imagen izquierda corresponde con la localización del cerro del Peñón del Marqués, a la derecha perfil del subsuelo; Modificado de (R. del Castillo, 1978).

En la figura 5.64, se trata de ejemplificar las principales características del hundimiento y fracturamiento del suelo en diferentes calles de la periferia del peñón, donde se pueden apreciar las trazas de fracturamiento en el pavimento y banquetas, los hundimientos y escalonamientos del suelo, en la imagen superior izquierda se muestra el desplome de varios edificios de departamentos.



Figura 5.64.- Localización de los crecimientos dimensionales de las trazas del fracturamientos en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas de las colonias circundantes al Peñón del Marqués en la Delegación Iztapalapa (2010).

Considerando las características geológicas, la disposición de los trazos del fracturamiento, podemos concluir que el subsuelo de la zona circundante al Peñón del Marqués ha sufrido una descompensación por la pérdida de volumen de los acuíferos cercanos y se está experimentando una compactación del subsuelo debido a un reajuste de volumen que se marca hacia el centro de las cuencas lacustres, lo cual está generando fuerzas de tensión que se incrementan y detonan en las zonas de debilidad periféricas situadas en las franjas de cambio de pendiente próximas a los aparatos volcánicos y se detonan en las zonas de discontinuidad litológica.

**5.6.3.- Zona especial de prevención (3), Periferia sur de la Sierra de Santa Catarina. Colonias Lomas de San Lorenzo, San Lorenzo Tezonco, el Molino, Cananea y la Planta, en la Delegación Iztapalapa y Colonias del Mar, Agrícola Metropolitana, Miguel Hidalgo, Barrios de Zapotitlan y Santa Catarina en la Delegación Tlhuac.** Esta zona pertenece a las más jóvenes de la cuenca de México, los volcanes de la Sierra de Santa Catarina se considera que surgieron en el Pleistoceno Tardío, hace menos de 30,000 años y representado por el volcán Yahulixqui en el extremo occidental y al oriente el Santa Catarina o Guadalupe y La Caldera con aproximadamente 20,000 años.

Esta Sierra durante un tiempo constituyo una isla dentro del antiguo lago. Estos conos volcánicos predominantemente están constituidos por escoria o tezontle,

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

martiriales piroclásticos como arenas, lapilli, cenizas y lavas. Las cuales son materiales de alta permeabilidad por lo cual tienen gran capacidad para absorber y conducir el agua a profundidad bajo la planicie lacustre.

Los polígonos de afectación en esta zona, de acuerdo a la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, establecida en el artículo 170 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, se localizan entre las Zonas III y II, correspondientes a zonas lacustre y de transición.

La zona lacustre se localiza al sur, y está integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros.

Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

De acuerdo a la zonificación del manual de diseño geotécnico del metro, COVITUR (Tamez et al 1987), se considera zona de lago virgen perteneciente al lago de Xochimilco de la cuenca de México. En la figura 5.65, se muestra la ubicación de los polígonos de afectación localizados en la periferia de la Sierra de Santa Catarina.



Figura 5.65.- Localización de las trazas principales de fracturamiento en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas en la periferia de la Sierra de Santa Catarina (Modificado de Google, 2010).

La zona de transición está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, está limitada al norte por

un cambio de pendiente topográfica correspondiente con la periferia de los depósitos volcánicos de la sierra de Santa Catarina, en especial con el volcán Xaltepec, el cual está compuesto por un cono volcánico del Cuaternario así como en sus flancos por vulcanitas básicas e intermedias del Cuaternario y por depósitos aluviales como grava, arena y limo del Cuaternario y por el Yahualixqui compuesto de escoria volcánica (E. Burns, 2009), con los cuales se encuentran en contacto abrupto o gradual. Al sur está limitada gradualmente o de forma interdigitada con los depósitos lacustres y el remanente del Lago de Xochimilco.

**5.6.4.- ZEP (3-A).- Colonia Lomas de San Lorenzo Tezonco, Delegación Iztapalapa.** Esta zona se localiza en la proximidad de la ladera poniente del volcán Yahualixqui, y de acuerdo con la zonificación geotécnica corresponde a la zona II de transición, la cual es de tipo abrupta hacia la ladera y gradual hacia la parte llana.

El volcán Yahualixqui, está constituido predominantemente por escoria volcánica, la pendiente de sus laderas periféricas cambia, en su proximidad al cono, las laderas próximas son mayores a los 40° y en la base de estas cambia de 15° descendiendo hasta integrarse a la zona llana o lacustre. A partir de este último cambio de pendiente topográfica comienza la zona urbana.

Este sitio es uno de los más representativos y problemáticos en cuanto al fenómeno del hundimiento y fracturamiento del suelo, cuenta con el antecedente de dos hundimientos de suelo de gran dimensión **sobre** la Calle Vista Hermosa los días 7 de junio del 2007 y el día 20 de junio del 2009, de los cuales en el primero se presentó un hundimiento de aproximadamente 300 m<sup>3</sup>, en el cual fueron alcanzados una persona y un automóvil; en el más reciente ocurrido en los predios con dirección Mz.62 lotes 4 y 5, sufrieron otro hundimiento de aproximadamente 100 m<sup>3</sup>, que afectó totalmente un taller industrial y una vivienda.

A raíz de estos eventos se ha desarrollado sobre la calle Vista Hermosa socavaciones y asentamientos progresivos por debajo de las guarniciones, banquetas y grietas marcadas en la carpeta asfáltica.

Estos eventos han incrementado e impactado de las afectaciones de manera gradual a varias viviendas, lo cual se ha constatado en los monitoreos y mediciones del fracturamiento y movimientos en el sitio.

Este fenómeno se le atribuye a la generación de la grieta IZT-47, (TGC, 2009), en la figura 5.66, se muestra la traza de la grieta IZT- 47 en la calle Vista Hermosa y el sitio donde persisten los hundimientos de suelo. En la secuencia de imágenes se capta la traza, el hundimiento y el fracturamiento de pavimento; el cual posteriormente se retiró y fue descubierta la socavación del suelo de aproximadamente 4 m<sup>3</sup> y la continuación del agrietamiento.

Esta Grieta IZT- 47 a lo largo de su trazo, el cual varía de acuerdo a la imagen superior derecha, está afectando a varias viviendas, unidades habitacionales, escuelas y equipamiento urbano. Por lo cual se considera la que actualmente ha generado la mayor afectación en el DF.



Figura 5.66.- Traza de la grieta IZT- 47 en la calle de Vista Hermosa (Marzo, 2009).

De la figura 5.66 mencionaremos que la Calle Vista Hermosa está trazada en forma paralela a la pendiente y en su trazo conecta varias calles que al igual tienen pendientes descendientes, y sobre las cuales se capta y fluye el agua pluvial que se canaliza hacia la Calle Vista Hermosa hasta Av. las Torres.

La figura 5.67, muestra un plano catastral de la ZEP (Zona Especial de Prevención) de Lomas de San Lorenzo en la Delegación Iztapalapa, en el cual se muestra el trazo de la grieta IZT-47 representado por las líneas discontinuas café y azul, la zona de hundimientos frecuentes esta asurada con amarillo tenue y se puede considerar la cantidad de predios que son afectados en su trayectoria, los predios asurados en color rojo fue donde se presentó el hundimiento de suelo que provoco colapso del taller, y los predios en amarillo son en los que hay viviendas afectadas.



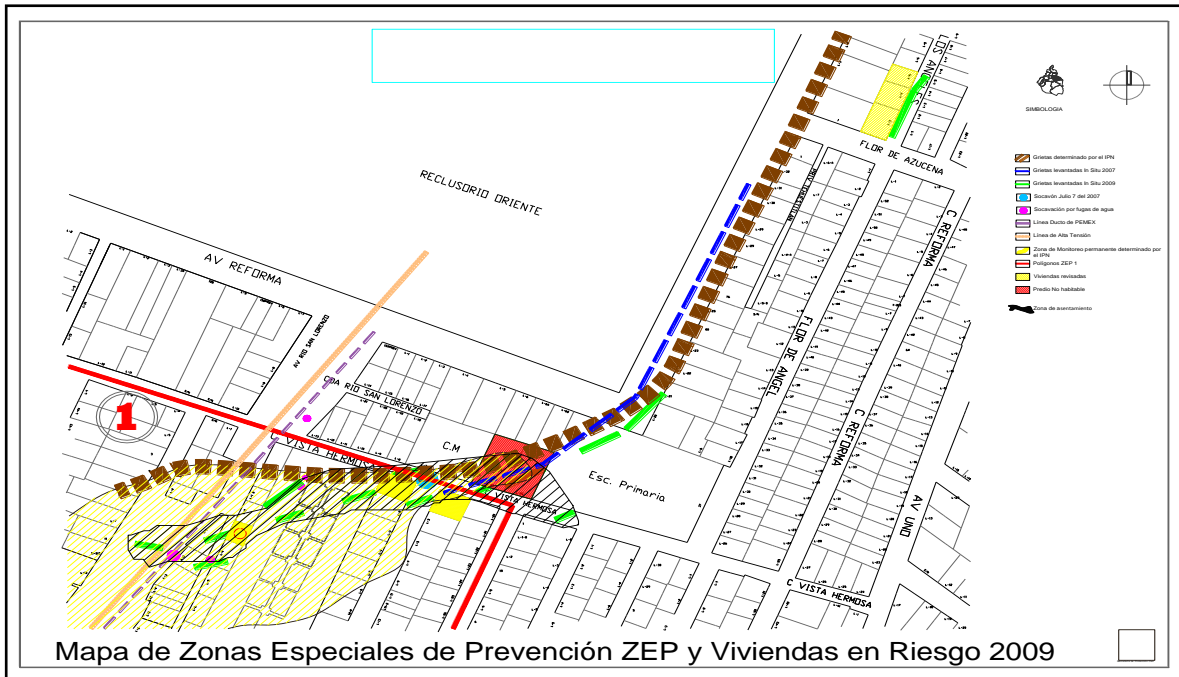


Figura 5.67.- Plano de la ZEP de Lomas de San Lorenzo en la Delegación Iztapalapa (Julio, 2009).

El trazo de la grieta IZT-47, por lo observado en campo coincide casi paralelamente con un cambio de pendiente marcado tenuemente a partir de la Av. Reforma en la colindancia con el predio del reclusorio oriente al poniente y las colonias INFONAVIT El Tesoro y Lomas de San Lorenzo al oriente figura 5.68, algunas de las afectaciones mayores que ha generado se pueden observar en la figura 5.69, donde se muestra la dimensión del segundo hundimiento de suelo de mayor dimensión, en la figura 5.70, se ilustran las afectaciones en la parte posterior del predio de la unidad habitacional Benito Juárez, en la cual se han desplomado varios edificios y en su trayectoria la grieta ha socavado las cimentaciones de varias viviendas colindantes a la unidad habitacional figura 5.71.



Figura 5.68.- Trazo de grieta en Av. Reforma (Enero 2010).



Figura 5.69.- Afectaciones en taller industrial, calle Vista Hermosa (Julio 2009).



Figura 5.70.- Afectaciones unidad habitacional Benito Juárez (Julio 2009).



Figura 5.71.- Socavación bajo cimentación de vivienda (Julio 2009).

Si consideramos el descenso del nivel freático en los acuíferos circundantes de este sitio en particular podemos concluir que el trazo de la grieta coincide con un cambio de pendiente, diferencias litológicas y por ende mecánicas e hidráulicas de los materiales del subsuelo; Coincidentemente los hundimientos mayores se han detonado con las primeras lluvias intensas de la temporada y muy probablemente por el caudaloso escurrimiento de agua pluvial que fluye sobre la calle Vista Hermosa y se filtra al subsuelo justamente en la zona llana en el cruce con la Av. de las Torres, lo cual genera descompensación, arrastre y socavación del subsuelo justo en la franja de debilidad.

**5.6.5.- ZEP (3-B1).- Colonia Jardines de San Lorenzo, El Molino, La Planta y Cananea. Delegación Iztapalapa.** Esta área de estudio geotécnicamente le corresponde la zonificación III (zona de lago virgen) compuesta generalmente por arcillas, y se encuentra próxima a la zona II de transición baja al norte.

Se considera (Cabral C. Lugo H. 2008) que la Av. Tlahuac debe seguir la traza de la antigua ribera lacustre, lo que se reconoce por la curva de nivel 2240m en el mapa topográfico escala 1:500,000 (INEGI).

Hidrologicamente se encuentra en el área de los paleólago de Xochimilco – Chalco, presentando una batimetría promedio de 10 a 40 m, debido a los diferentes tipos de litología de la Sierra de Santa Catarina, existe un potencial de recarga de 35% y por la cantidad de pozos existe una tasa de extracción de 50-140 lps (litros por segundo) por estar situada en el acuífero superior de la cuenca de México (E. Burns, 2009). Considerando la topografía ilustrada en la imagen de satélite de la figura 5.50, podemos notar que la zona se localiza flanqueada al norte por la sierra de Santa Catarina, y al sur y al oriente por antiguos lagos.

A lo largo de estas colonias se está generando la manifestación de un sistema de fracturamiento cuya traza es preferencialmente hacia el NW-SE pero se encuentran algunas E-W en forma paralela al trazo de algunas calles, sobre la trayectoria de estos sistemas de fracturamiento, están siendo afectadas las obras urbanas como carpeta asfáltica, guarniciones y banquetas, tuberías de agua

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

potable y de drenaje, pero principalmente varias viviendas, de las cuales ya se han demolido varias por el gado de afectación estructural que sufrieron, consecuencia de los hundimientos diferenciales del suelo (figura 5.72).

Las colonias relativamente son recientes, con alrededor de 30 años y las afectaciones se han incrementado en un periodo de 8 años, en el sitio existe el antecedente previo al asentamiento de las viviendas, de la existencia del fracturamiento del suelo en el sitio, antiguamente el lugar fue ciénaga con canales fluviales, circunstancia por la cual se deduce la naturaleza de la compresibilidad errática del suelo y la variabilidad en la progresión de las afectaciones. Por tal circunstancia si se incrementa la carga estática y dinámica al suelo, si se continúan las extracciones de agua y disminuye la recarga. El fenómeno proseguirá incrementándose.

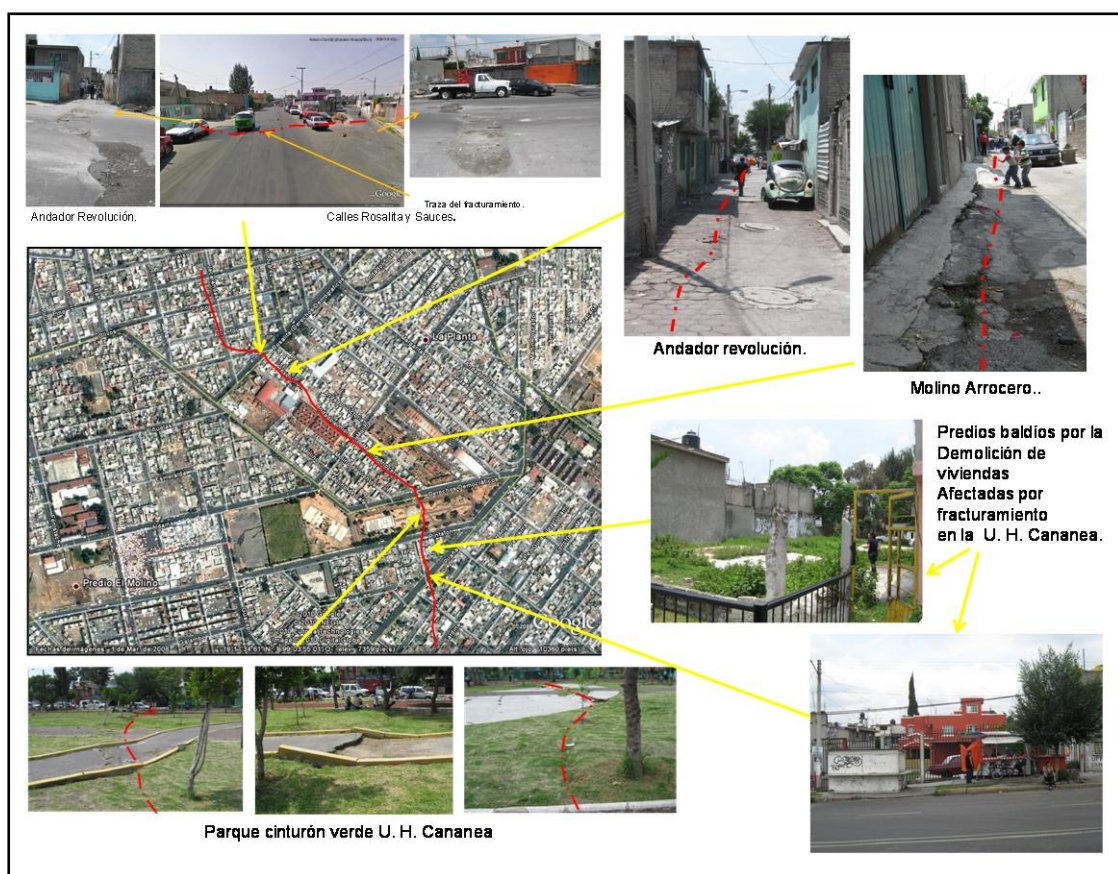


Figura 5.72.- Localización de los crecimientos dimensionales de las trazas del fracturamientos en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas de las colonias Cananea, El Molino, La Planta en la Delegación Iztapalapa (2010).

**5.6.6.- ZEP (3-B2).- Colonia del Mar. Delegación Tláhuac.** Geotécnicamente de acuerdo con (Santoyo V. E. 2005) al área afectada le corresponde la zonificación LVI (Zona de Lago Virgen) compuesta generalmente por arcillas. La Delegación Tláhuac se caracteriza por presentar una gran variedad de depósitos superficiales; particularmente intercalados en algunas zonas con antiguos derrames lávicos y piroclásticos hacia las zonas altas, hasta regiones sensiblemente planas, de origen lacustre, conformadas por depósitos arcillosos de alta compresibilidad.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Cerca de la Colonia del Mar prosigue el Río Amecameca-Canal Nacional que nace en las partes altas de la Sierra Nevada (figura 5.73), continúa luego hacia San Juan Ixtayopan; Tulyehualco y al lado del pueblo San Luis Tlaxialtemalco (Centro de Educación Ambiental Acuexcómatl); a partir de aquí el cauce es conocido como Canal de Chalco, pues recibe un afluente con ese nombre proveniente del lago de los Reyes, ubicado en el centro de Tláhuac; el cauce pasa aledaño al Parque ecológico de Xochimilco y atraviesa el Periférico para continuar al lado de la laguna de regulación denominada Ciénaga Grande; al finalizar ésta, al lado de la Colonia Lomas de la Estrella.



Figura 5.73.- Extensión del Río Amecameca que nace en la Sierra Nevada (modificado de Google, 2010).

Las principales elevaciones cercanas al norte son: Volcán de Xaltepec y Cerro Tecón, en la Sierra de Santa Catarina;

El crecimiento urbano en los últimos 20 años, se ha incrementado en las zonas sensiblemente planas desarrolladas sobre los antiguos sedimentos arenosos y arcillosos que constituyeron la periferia y el fondo de los lagos, con espesores de hasta 300 m, que sobreyacen a un sistema de acuíferos regionales ubicados a mayor profundidad, cuyos niveles se encuentran considerablemente abatidos actualmente por sobreexplotación, esta circunstancia propicia la afectación por distensión en superficie, ocasionada por reajustes del subsuelo, lo cual se refleja en la aparición de agrietamiento y hundimiento del suelo superficial en forma regional activa en la periferia de los antiguos lagos y próximos a los aparatos volcánicos y sus productos.

En esta zona es importante considerar la cantidad de sistemas fluviales, ciénagas, barreras naturales y antropogénicas, que han sido rellenas y constituyen un paleo relieve.

Las calles más afectadas son Camarón, Aleta y Gitana. Entre Av. Canal de Chalco y Av. La Turba, (figura 5.74).

Al suroriente de la Colonia del Mar se presenta otro sistema de fracturamiento marcado en la figura 5.75. La elipse A, en la cual también se muestran otro sistema de fracturamiento que se está desarrollando en forma casi paralela y hacia el norte a una distancia aproximada de 1 km, en las colonias Agrícola Metropolitana y Miguel Hidalgo en la misma Delegación elipse B.

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología



Figura 5.74.- Localización del crecimiento de las trazas del fracturamientos en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas de la colonia del Mar, Delegación Tlhuac (2010).



Figura 5.75.- Localización de las trazas principales del agrietamientos en el suelo, que afectan progresivamente a viviendas de las colonias Del Mar, Agrícola Metropolitana y Miguel Hidalgo en la Delegación Tlhuac (Modificado de Google, 2010).

**5.6.7.- ZEPS 3 (C, D, E). Barrio de Zapotitlan, Colonia Ojo de Agua, Barrio Santa Catarina, en la periferia sur, central y este, de la Sierra de Santa Catarina, Delegación Tlahuac.** Estos sitios se caracterizan por su proximidad a las estructuras volcánicas de la Sierra de Santa Catarina, principalmente al Volcán Xaltepec y Guadalupe. La antigüedad de los volcanes que pertenecen a la Sierra de Santa Catarina es decreciente de poniente a oriente como lo muestra la figura 5.76, donde el volcán más antiguo es el Yahualixqui y el más joven el de la Caldera. En esta Sierra el volcán Santa Catarina el más joven de la misma, sus lavas están bien expuestas en la superficie, al norte, oriente y sur del mismo. En el resto de los volcanes las lavas son de menor exposición, ya que sus lavas gradualmente van siendo sepultadas por los depósitos de los volcanes vecinos más jóvenes y por los sedimentos del lago. El volcán Yahualixqui por ser el más antiguo de la Sierra de Santa Catarina, sus lavas no afloran, siendo muy probable que se encuentran cubiertas por materiales volcánicos y sedimentos lacustres posteriores.

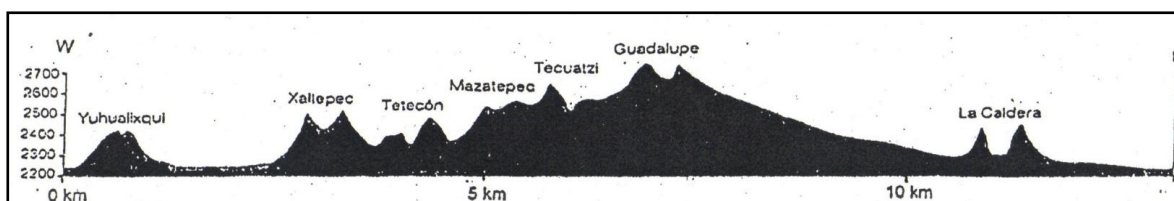


Figura 5.76.- Perfil Topográfico de la sierra de Santa Catarina (Cabral C., Lugo H., 2008).

En algunos sitios se identifican secciones en contacto transicional, el cual generalmente es abrupto, con basaltos fracturados, intercalados con arcillas blandas de alta plasticidad, alternados con sedimentos limo arenosos y pie de monte, que se forman en el contacto entre la planicie y la periferia de los depósitos volcánicos circundantes, cuyas características de espesor, favorecen fenómenos de comportamiento irregular por diferencias mecánicas e hidráulicas de los materiales, lo cual produce efectos de subsidencia diferencial del suelo, presentándose áreas o franjas en el terreno con la generación de agrietamiento regional activo, lo que está provocando un impacto directo hacia las construcciones y servicios ubicados dentro de la zona de afectaciones.

**5.6.8.- ZEP (3-C) Barrio de Zapotitlán, en la Delegación Tláhuac.** La zona se localiza al noreste de la Delegación Tlahuac, limitada al norte por la sierra de Santa Catarina cerca del Cerro Xaltepetl y al sur por la laguna de Xochimilco y al poniente el lago de Chalco.

De acuerdo a la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, establecida en el artículo 170 del reglamento de construcciones para el Distrito Federal, el polígono de análisis se localiza en la zona II correspondiente a una zona de transición abrupta por su cercanía a la Sierra de Santa Catarina (Santoyo E, 2005).

En la colonia Santiago Zapotitlán, se puede apreciar e inferir en superficie un tren de grietas de longitud de 120 a 150 m en dirección E-W, las cuales atraviesan la Av. Tláhuac así como las calles Francisco Villa, Narciso Mendoza y Hernán Cortés.

## Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

El marco geológico de esta zona se define como una zona de transición abrupta en contacto con la zona lacustre (Santoyo, 2005), colindando orogénicamente al norte con la sierra de Santa Catarina en especial con el volcán Xaltepec el cual está compuesto por un cono volcánico del cuaternario así como en sus flancos por vulcanitas básicas e intermedias y por depósitos aluviales como grava, arena y limo del cuaternario (E. Burns, 2009).

Por todo lo anteriormente mencionado la zona tiende a tener vulnerabilidad geológica en el subsuelo por estar en zona de transición y presentar alta recarga la cual es captada por la Sierra de Santa Catarina en especial el volcán Xaltepec; siendo así la principal fuente de agua subterránea lo cual origina tarde o temprano inestabilidad mecánica en el subsuelo y por ende fracturamiento. En las siguientes imágenes (figura 5.77) arriba se muestra el croquis con la traza principal de agrietamiento, abajo Calle Narciso Mendoza con fracturamiento en dirección E-W con varios predios afectados gravemente, en esta misma imagen se marca el desnivel y se aprecia al fondo de la calle la proximidad al cambio topográfico y en consecuencia litológico.



Figura 5.77.- En la imagen de satélite superior traza de grieta. Imagen inferior, Calle Narciso Mendoza con fracturamiento en dirección E-W con predios afectados (Modificado de Google, 2010).

### 5.6.9.- ZEP (3-D) Colonia Ojo de Agua, en la Delegación Tlahuac.

Geológicamente esta área se define como zona de transición abrupta en contacto con la zona lacustre cuya planicie aluvial es proveniente de la sierra de Santa Catarina. Geotécnicamente al área afectada le corresponde la zona II (Transición Abrupta) en contacto con la zona III (Lago Virgen), mientras que hidrológicamente se encuentra en los límites del paleólago de Chalco, por tales circunstancias se genera la inestabilidad en el subsuelo, debido al contraste en el tipo de composición y estructura entre estas dos zonas.

En este sitio se constato un hundimiento considerable, de aproximadamente 60 m<sup>3</sup> del suelo y el incremento del agrietamiento que fue detonado por una fuga de agua, este agrietamiento afecto una vivienda con ubicación en Calle Montes de las Cordilleras (Lote 9, Manzana 7) donde coinciden tres grietas cuya dirección de rumbo tiende al NW, estas también se manifiestan hacia la calle y camellón (figura 5.78).

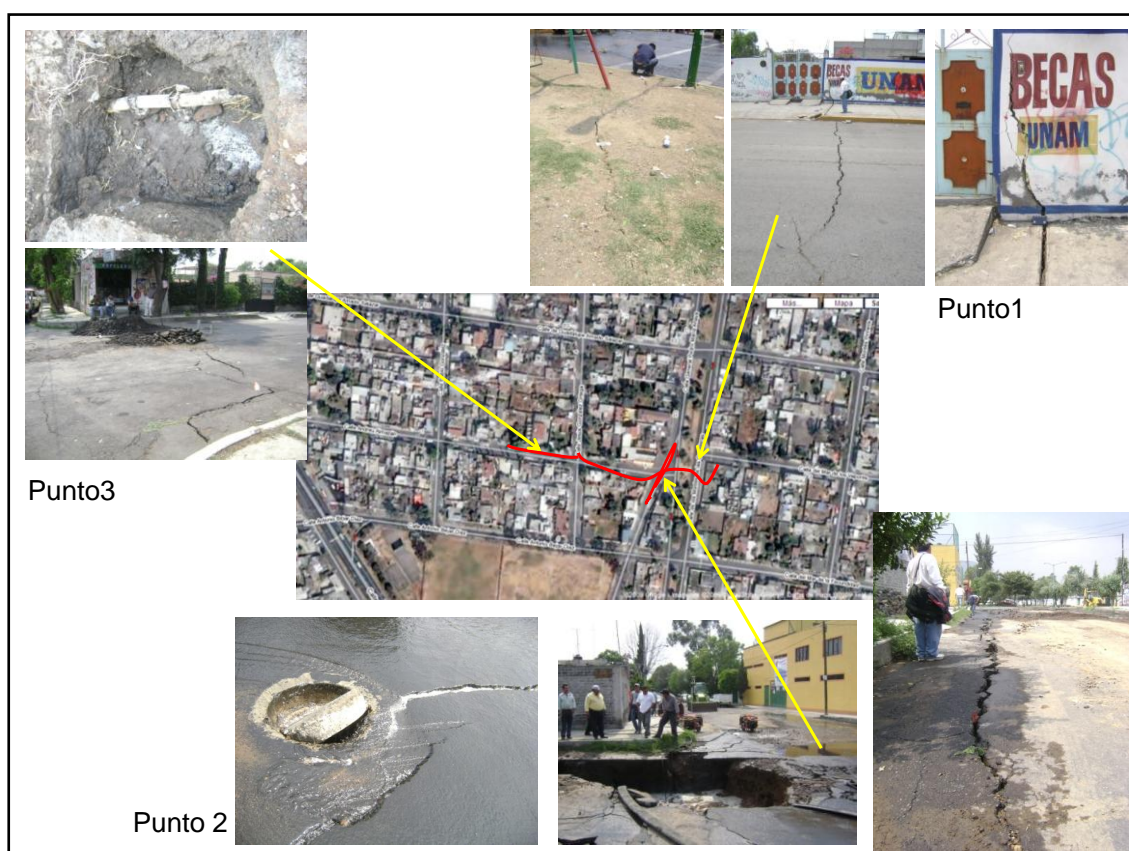


Figura 5.78.- En esta secuencia de imágenes se observa la ubicación del sitio y la traza del frecuramiento y hundimiento y se exponen tres puntos o sitios con afectaciones (2009).

En la imagen anterior se describen las afectaciones en varios puntos sobre el trazo del agrietamiento y los cuales son: Punto 1. Calle Montes de las Cordilleras y Calle del Mar de los Vapores, grieta que atraviesa el camellón, (13 m, NE y tiene de 2 a 4 cm de apertura. Punto 2. Calle Andreu Almazán y Calle J. Vicente Castañeda; en este sitio la tubería se disloco causando fuga, socavación y hundimiento por ir en una dirección N-S y coincidir casi perpendicularmente con la trayectoria de agrietamiento que se manifiesta en dirección E-W. Nótese en la imagen izquierda superior la dislocación de la tubería. Punto 3. Calle Andreu



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Almazán y Calle Jesús González Ortega, en este sitio se manifestó el mismo problema debido al comportamiento del subsuelo y su afectación a las redes de conducción hidráulica, similar al punto 2.

**5.6.10.- ZEP (3-E) Colonia Guadalupe Santa Catarina Yecahuizotl, en la Delegación Tláhuac.** En la colonia Guadalupe Santa Catarina Yecahuizotl, se manifestó la trayectoria de una grieta, que provoca la afectación a viviendas, la Escuela Primaria Rafael Ramírez Castañeda, redes de drenaje y agua potable secundarias, al provocar asentamientos diferenciales en el suelo que generan grietas en muros y desplomos de estructuras con diferentes magnitudes.

El marco geológico de esta zona se define como una zona de transición abrupta (Santoyo, 2005), cuya planicie aluvial es proveniente de la sierra de Santa Catarina Geotécnicamente al área afectada le corresponde la zona II (Transición Abrupta),

La Figura 5.79, muestra el trazo aproximado de la grieta de mayores dimensiones que está afectando a la infraestructura urbana, entre ellas un ejemplo característico de dislocación y ruptura de tubería de agua potable de 72" de diámetro que se localiza en el carril de dirección poniente del Eje 10 Sur esquina calle Santa Catarina, en el Barrio Guadalupe Santa Catarina Yecahuizotl, Figura 5.80.

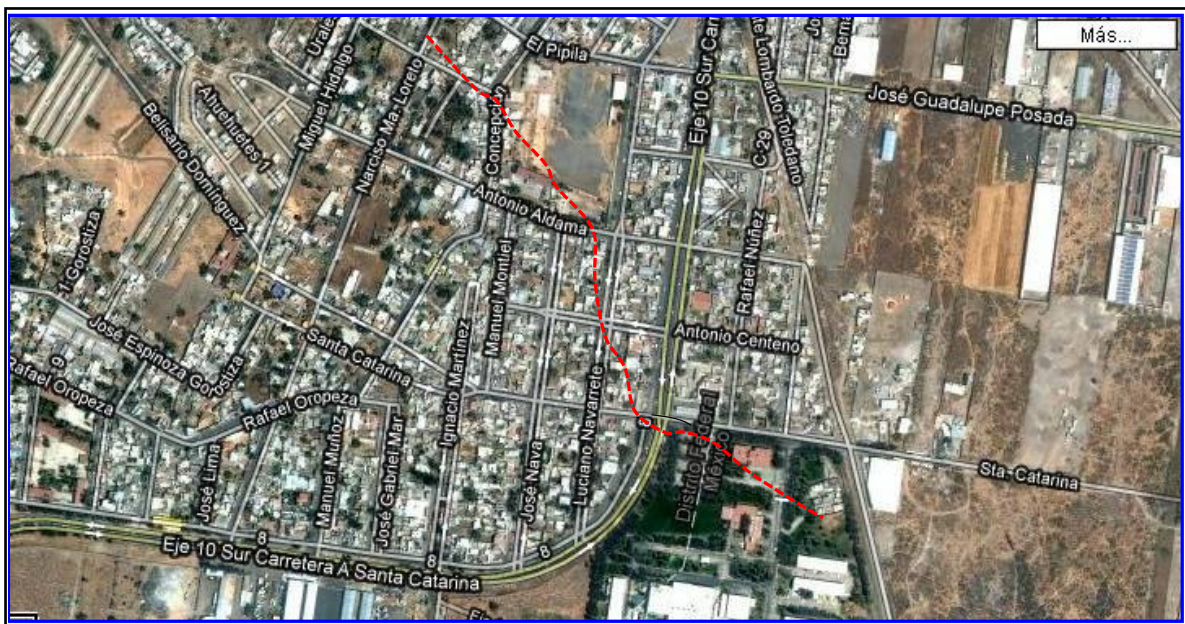


Figura 5.79.- Trazo aproximado de la grieta que afecto a la tubería de agua potable de 72" de diámetro, en el Eje 10 Sur esquina calle Santa Catarina, en el Barrio Guadalupe Santa Catarina Yecahuizotl, Delegación Tláhuac (Modificado de Google, 2009).

Figura 5.80.- imágenes del hundimiento provocado por la ruptura de la tubería colocada en carril dirección poniente del Eje 10 Sur, esquina calle Santa Catarina, en las elipses de las fotos se observa el trazo la grieta de tensión formada en la carpeta asfáltica (2009).



En la figura 5.81 se muestra dentro de las elipses azules el trazo de la grieta de mayores dimensiones trazada en la figura 5.80, la dirección de este agrietamiento de suelo cruza al Eje 10 Sur diagonalmente.



Figura 5.81.- Imágenes de la traza del agrietamiento de suelo asociado al hundimiento que afectó la tubería de 72" de diámetro que está colocada en carril norte del Eje 10 Sur, en las elipses de las fotos se observa la grieta de tensión formada en la carpeta asfáltica (2009).

La figura 5.82 muestra la continuación de la grieta de mayores dimensiones, y la cual daña progresivamente la infraestructura urbana.



Figura 5.82.- Imágenes de la traza del agrietamiento de suelo, en la calle Luciano Navarrete esquina Antonio Centeno (2009).

**5.6.11.-ZEP (4). Pueblo de San Andrés Mixquic, en la Delegación Tlahuac.** En este sitio se están desarrollando afectaciones por hundimiento y fracturamiento del suelo, en la zona norte de la zona centro, principalmente en los barrios de San Agustín y San Bartolo. Lo cual está afectando varias viviendas, iglesias y panteón localizadas a lo largo de las calles Medellín, Hidalgo y Plutarco Elías Calles.

En este sitio la fenomenología de hundimiento y fracturamiento es particular y ejemplificativa de un proceso de agrietamiento característico, condicionado por la ubicación del antiguo basamento del islote prehispánico del pueblo de Mixquic el cual por el proceso de desecación del lago y la expansión urbana ha sido cubierto en la periferia por materiales heterogéneos, condiciones que han generado una zona de transición local entre el basamento y los sedimentos lacustres.

La franja de agrietamientos se localiza al norte del centro del antiguo islote limitado por el Lago de Chalco, y justamente por las circunstancias de descenso de los niveles freáticos y consecuente hundimiento regional del suelo lacustre se está generando el asentamiento diferencial causante de las fuerzas de tensión en el suelo de la zona de transición y consecuente agrietamiento detonado en los cambios litológicos y de pendiente topográfica. En la figura 5.83, se muestra el trazo de las grietas de mayor dimensión que están manifestando una apertura progresiva, lo cual está afectando varias viviendas.



Figura 5.83.- Trazo de la fractura principal en la Calle Plutarco Elías Calles la cual afecta varias casas, dos iglesias y al panteón. Pueblo de San Andrés Mixquic (Modificado de Google, 2010).

La figura 5.84 muestra imágenes de la calle Medellín la central fue obtenida de Google 2009, y se nota la traza del hundimiento en la calle y el fracturamiento del asfalto que se colocó un año anterior en 2008. En los extremos izquierdo y derecho, las imágenes son recientes (Junio 2010), al compararlas con la imagen central se distingue el incremento del hundimiento y fracturamiento.



Figura 5.84.- Imágenes de la calle Medellín, la central es del 2009, comparada con imágenes de los extremos que son recientes (Junio 2010), se distingue el incremento del hundimiento y fracturamiento (Junio, 2010).

La figura 5.85, muestra la traza de la grieta de mayor dimensión que se está generando progresivamente y está afectando varias viviendas e infraestructura urbana.



Figura 5.85.- Imágenes de la traza de agrietamiento y hundimiento sobre la calle Plutarco Elías Calles y cercana a la barda perimetral del iglesia y el panteón del Pueblo de San Andrés Mixquic (Marzo, 2010).

La figura 5.86, muestra comparaciones entre las perspectivas del trazo de una fractura que cruza la calle E. Zapata. La imagen de arriba del 2009 fue obtenida de Google, se nota la traza del hundimiento en la calle y del asfalto que se colocó un año anterior en 2008. Abajo imagen del 6 de Junio del 2010, entre ambas se puede distinguir el movimiento relativo del suelo.

En esta ZEP, podemos concluir que el agrietamiento de suelos se está desarrollando en una zona de transición local, en la periferia norte del antiguo basamento que constituía el islote del pueblo de Mixquic y se están detonando por la subsidencia regional en la subcuenca del Lago de Chalco.

Figura 5.86.- Comparación del trazo de una fractura que cruza la calle E. Zapata. Arriba imagen del 2009 obtenida de Google, Abajo imagen del 6 de Junio del 2010, entre ambas se puede distinguir el movimiento relativo del suelo (Junio 2010).



**5.6.12.- ZEP (5) Pueblo de San Antonio Tecomitl, Delegación Tlahuac; y ZEP (6) San Luis Tlaxialtemalco, Delegación Xochimilco.** Estas zonas están limitadas al norte por la zona lacustre y al sur por varios conos volcánicos, predominantemente de composición basáltica, los cuales generaron coladas de lava, emanaciones de escoria, lapilli y ceniza; estos volcanes pertenecen a la Sierra de Chichinautzin. Ambas zonas están dentro de la franja de transición gradual.

En la figura 5.87 se muestra la distribución de las manifestaciones de agrietamiento de suelos representados con líneas rojas en la porción sur de la zona sur del lago de Xochimilco y Chalco.

La franja que limitan las líneas amarillas punteadas representa la zona de transición gradual entre la sierra de chichinautzin al sur y la zona lacustre al norte.

Los sistemas de agrietamiento que se están desarrollando en este sitio siguen una tendencia paralela a la franja definida como zona de transición, la cual coincide con los límites de las antiguas márgenes de los lagos. En estos sitios de acuerdo a las condiciones de agrietamiento de suelos en zonas de transición que se han comentado, es posible que también se estén generando fuerzas de tensión en el subsuelo generadas por la disminución de los niveles freáticos y consecuente hundimiento del terreno, provocando que las grietas se detonen en los cambios litológicos, de la pendiente paleotopografica, y por la infraestructura urbana.

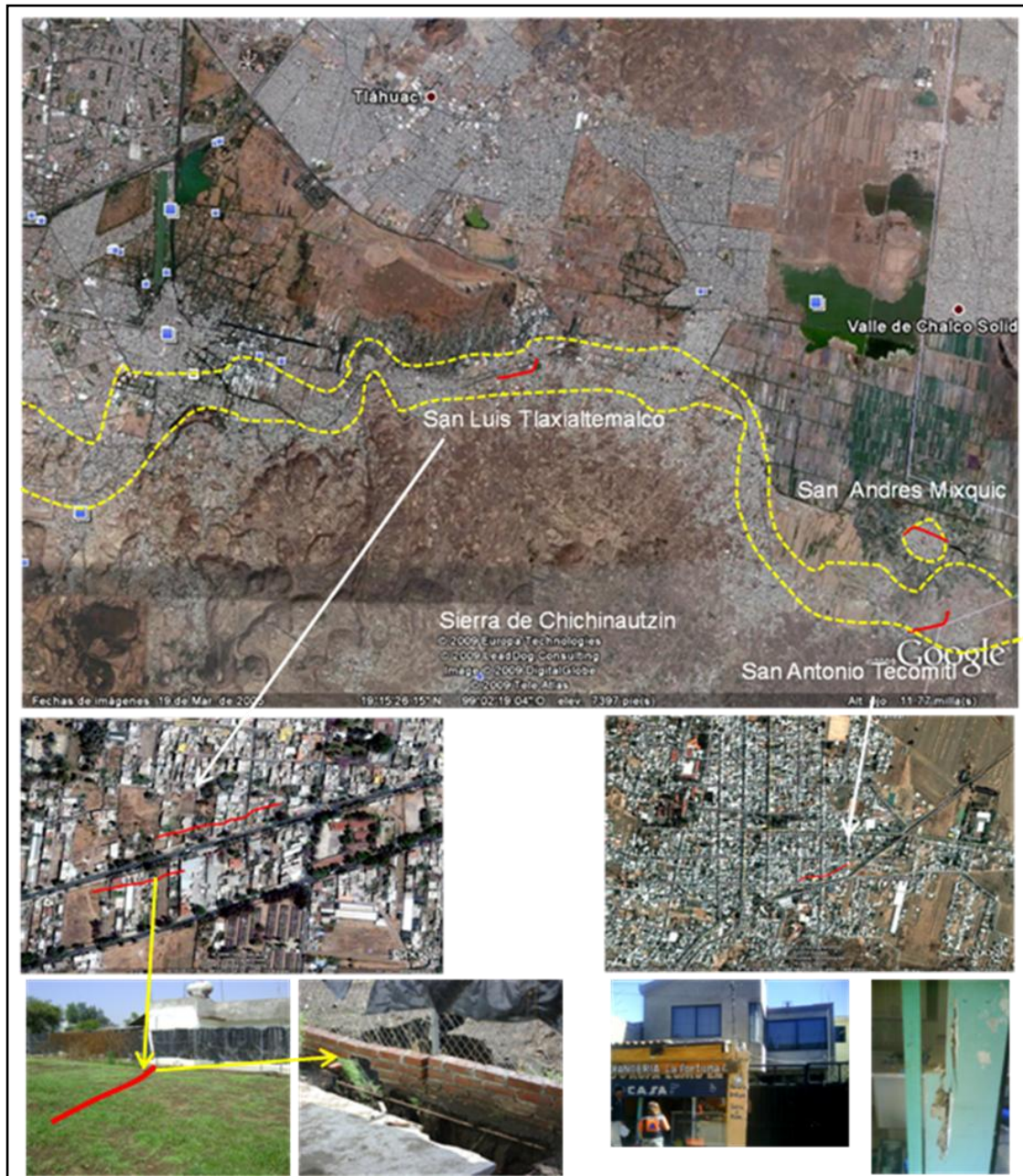


Figura 5.87.- En la imagen superior se muestra la localización de las zonas de agrietamiento de suelo, al sur de las Delegaciones Tláhuac y Xochimilco, y al norte de la Milpa Alta (Modificado de Google, 2010).

### 5.7.- Resultados.

La distribución errática del fracturamiento representado por las líneas de color rojo en las zonas comentadas anteriormente, apreciándola en imagen de satélite (figura. 5.88) podemos deducir que su distribución denota una coincidencia evidente con el contorno existente entre los lagos del sur de la cuenca y los aparatos volcánicos pertenecientes a las sierras que circundan.

Considerando la existencia del lago y en la periferia las sierras y volcanes, la deposición continua de sedimentos lacustres alternada con materiales piroclásticos y el consecuente depósito de sedimentos aluviales en la periferia, se

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

puede considerar la existencia de franjas circundantes quizá erráticas o poco definidas, con respecto al contorno de estos depósitos lacustres y transicionales.

Esta disposición de los materiales forma una franja perimetral que corresponde con una zona de comportamiento mecánico irregular del subsuelo por estar en zonas de contacto abrupto o gradual entre materiales de diferente naturaleza y en consecuencia con diferentes comportamientos mecánico e hidráulico.

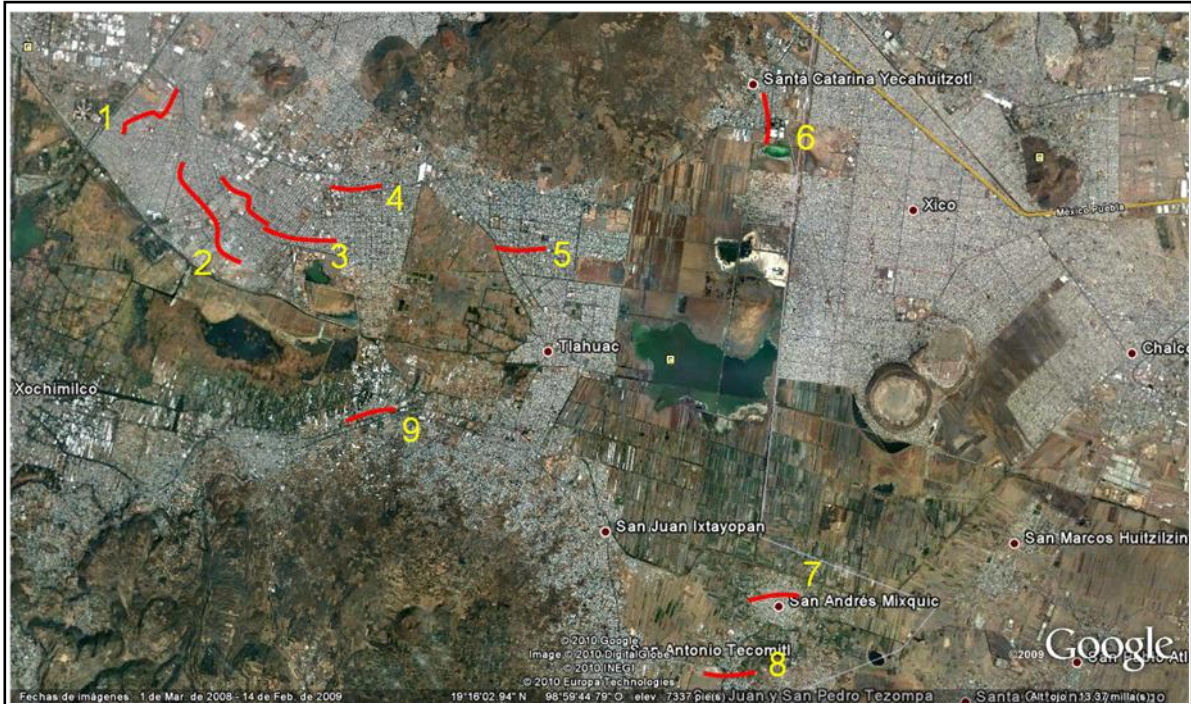


Figura 5.88.-Trazas generales del agrietamiento de suelos en la periferia de la Sierra de Santa Catarina (Modificado de Google, 2010).

De la figura 5.88 deducimos que los hundimientos se han incrementado al centro del área de los lagos de Chalco y Xochimilco, lo cual ha detonado los esfuerzos de tensión superficial del suelo en la periferia, principalmente en las zonas con incremento de desarrollo urbano, próximas a las franjas o zonas de cambio litológico y topográfico.

Los sistemas de grietas mencionados, se han integrado en este trabajo por haber afectado al menos dos inmuebles al grado de ser demolidos.

### 5.8.- Probables causas de los procesos de hundimiento y fracturamiento de suelo en la zona oriente de la cuenca de México.

Se pueden considerar generado por diferentes causas entre los cuales podemos nombrar:

1. Paleotopografía como control del drenaje subterráneo y de las diferentes respuestas a la compresibilidad del suelo, debido a la distribución heterogénea de los materiales aluviales componentes del subsuelo, cambios topográficos de mml pendiente entre suelos de transición y roca consolidada.

2. La alta evaporación con consecuente desecación e inicio del agrietamiento del suelo por contracción del volumen, consecuencia de la temporada de estiaje inmediata anterior, combinada con subsecuente acción de la infiltración excesiva de escurrimientos pluviales periódicos en puntos localizados en topografías bajas, durante las primeras lluvias torrenciales de cada temporada, que generan socavación y huecos a lo largo de las grietas iniciadas, y por otra parte rehidrata el suelo aumentando su peso volumétrico lo cual acelerara el proceso de agrietamiento, desprendimiento y hundimiento.

3. Factores antropogénicos tales como la extracción excesiva de los mantos acuíferos, mala canalización y captación de los escurrimientos pluviales en calles y redes hidrosanitarias, exceso de carga estática como construcciones de más de dos niveles y carga dinámica como el tránsito vehicular pesado en la superficie, los rellenos irregulares de basura, problemas de diseño y autoconstrucción de las estructuras en la superficie del subsuelo.

4. El efecto que puede producir un sistema de conducción de aguas ya sean potables o residuales en mal estado, donde las tuberías presenten agrietamiento y filtración hacia dentro o fuera de la tubería, son de considerarse ya que alteran el estado del suelo encajonante produciendo socavación, tubificación, y hundimientos diferenciales del tipo local.

5. También se ha notado la aparición de grietas de tensión, a raíz de fenómenos aparentemente tan diversos como el encharcamiento de agua, la evaporación intensa en áreas aledañas a zonas cubiertas con un tirante de agua perenne o estructuras que inhiben bajo ellas la evaporación del agua intersticial del suelo (canales, carreteras, cimentaciones, etc.), así como, el incremento de las presiones de agua intersticial de estratos permeables cercanos a la superficie. En general, los casos antes mencionados presentan una característica común: la correspondiente red de flujo de agua es divergente por lo que las fuerzas de filtración consecuentes inducen esfuerzos efectivos de tensión en la masa de suelo.

6. La inestabilidad del subsuelo es debido a la cantidad de materia orgánica y fósil (diatomeas, ostrácodos); los cuales interrumpen la continuidad de las propiedades entre los minerales. Las diatomeas y los ostrácodos actúan como superficies de falla, microscópicamente hablando. Originan microgrietas que debilitan el material; se ha observado una correlación entre cantidad de fósiles y algunas propiedades físicas, como la fragilidad y el contenido de agua. Peralta y Fabi (1989) y Díaz-Rodríguez (2006).

7. Para la urbanización del área del lago de Texcoco se implemento la siembra de árboles de los géneros: acacia, casuarina y eucaliptos; ya que con ellos se acelero la desecación del terreno superficial a pesar del alto contenido de sales, lo que permitió el establecimiento de construcciones ligeras, las cuales han sido y siguen siendo afectadas por su vecindad con este tipo de árboles.

Se ha comprobado que un grupo denso de este tipo de árboles, pueden extraer una cantidad suficiente como para producir abatimientos locales de entre 20 a 50 cm, durante épocas de estiaje. Esto trae como consecuencia que se produzcan



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

hundimientos extraordinarios en el suelo cuando presentan una alta susceptibilidad a la deformación y bajo grado de preconsolidación. Además cuando se localizan cerca de una estructura ligera cimentada a poca profundidad son capaces de generarles hundimientos diferenciales de hasta 30 cm.

La proliferación de estos árboles a lo largo de los años, aunado a la falta de riego ha alterado el equilibrio en la relación consumo-recarga de agua del subsuelo, al extraer una cantidad mayor de la que puede ser repuesta por infiltración pluvial, dado que esta última también se ha visto reducida por la propia urbanización.

## 5.9.- Mecanismos de propagación de grietas.

**5.9.1.- Grietas hidrodinámicas.** Este tipo de grieta figura 5.99, se desarrolla por procesos de filtración y carga hidráulica, el agua llena las grietas preexistentes y al incrementarse la carga hidráulica en la fondo de la grieta se incrementa la presión hacia las paredes lo cual provoca el ensanchamiento de estas.

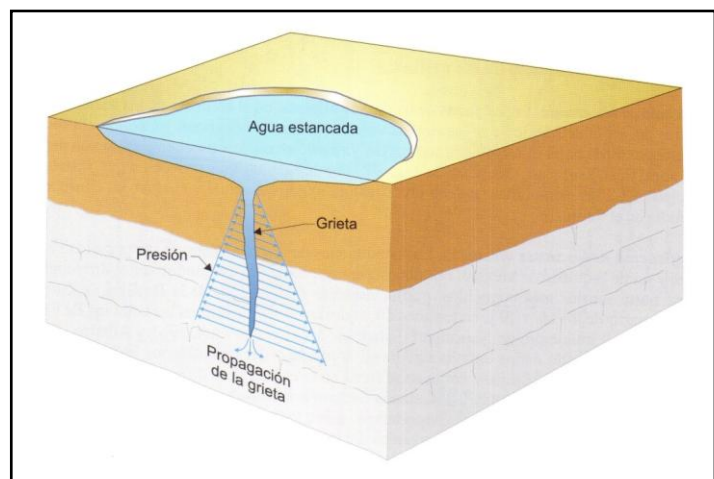


Figura 5.89.- Ejemplo de propagación de grieta de origen hidrodinámico (Santoyo, 2005).

En las siguientes figuras 5.90 y 5.91, se ilustra el comportamiento de los agrietamientos en la mayoría de los suelos blandos antes y después de las primeras lluvias torrenciales de la temporada o de alguna sacudida sísmica.

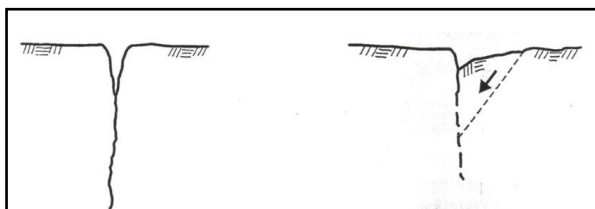


Figura 5.90.- Grieta aislada, antes (izq.) y después (der.) de lluvia o sismo (Santoyo, 2009).

Figura 5.91.- Par de grietas, antes (izq.) y después (der.) de lluvia o sismo (Santoyo, 2009).



Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

Estos agrietamientos se originan como eventos rápidos que ocurren cuando se acumula agua en la superficie y bruscamente se abre una fisura por la cual se filtra súbitamente.

**5.9.2.- Grietas regionales.** Este tipo de grietas se generan como respuesta a la descompensación en la capacidad de carga de los suelos blandos que se encuentran sobreyaciendo el perímetro de estructuras compuestas de materiales más rígidos, en las figuras 5.92 y 5.93, se ilustra algunos mecanismos que generan grietas de tensión en suelos blandos que descansan sobre estructuras de litología rígida.

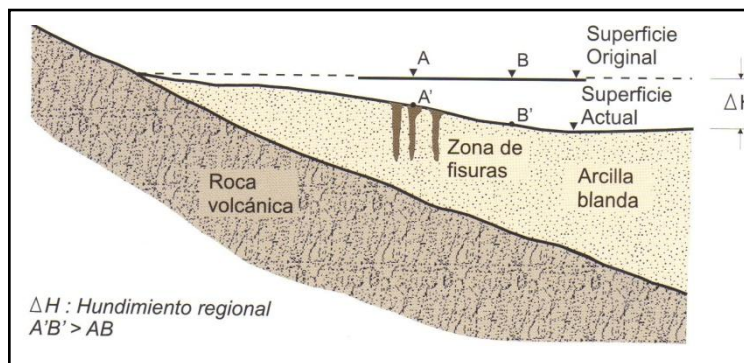


Figura 5.92.- Mecanismos de agrietamiento a la orilla del lago (Santoyo, 2005).

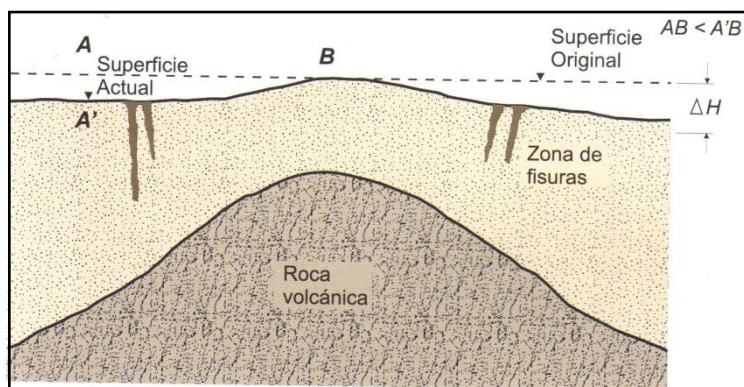


Figura 5.93.- Mecanismos de agrietamiento sobre un domo cubierto (Santoyo, 2005).

En la siguiente figura 5.94, se muestran los mecanismos más factibles que generan el agrietamiento en suelos transicionales en contacto con la zona de lomas, en lugares donde existe cambio de pendiente con respecto a los suelos o rocas que subyacen y en suelos lacustres que se encuentran dentro del área perimetral de los conos de abatimiento generados hacia la superficie.

**5.9.3.- Grietas tectónicas.** En la figura 5.95, se muestran secciones geológicas de la cuenca, en la parte superior de norte a sur y en la inferior de oeste a este, en ambas se distingue la complejidad estructural del basamento caracterizado por intensa deformación y presencia de fallas y estructuras de fosas y pilares, las cuales muy probablemente tienen proyección a superficie.

Debido a la complejidad del fenómeno y la necesidad de conocer más detalladamente las causas que lo originan es necesario implementar nuevas y más eficaces consideraciones, metodologías y tecnologías desarrolladas ex profeso tanto geológicas como geofísicas, para su estudio, las cuales nos

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

proporcionen información más confiable del subsuelo con el fin de detectar sitios potencialmente susceptibles de afectación y con ello tener mayor control en la toma de decisiones para la prevención de potenciales desastres.

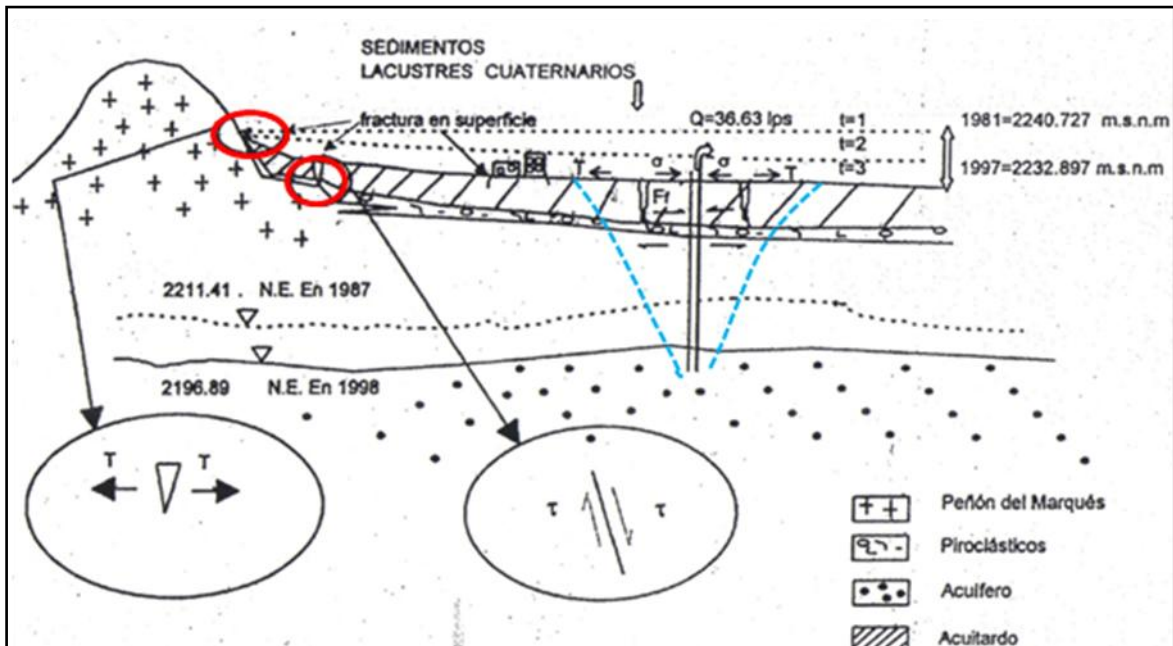


Figura 5.94.- Mecanismos de agrietamiento más factibles en la zona oriente de la cuenca de México (Cabral C., Lugo H., 2008).

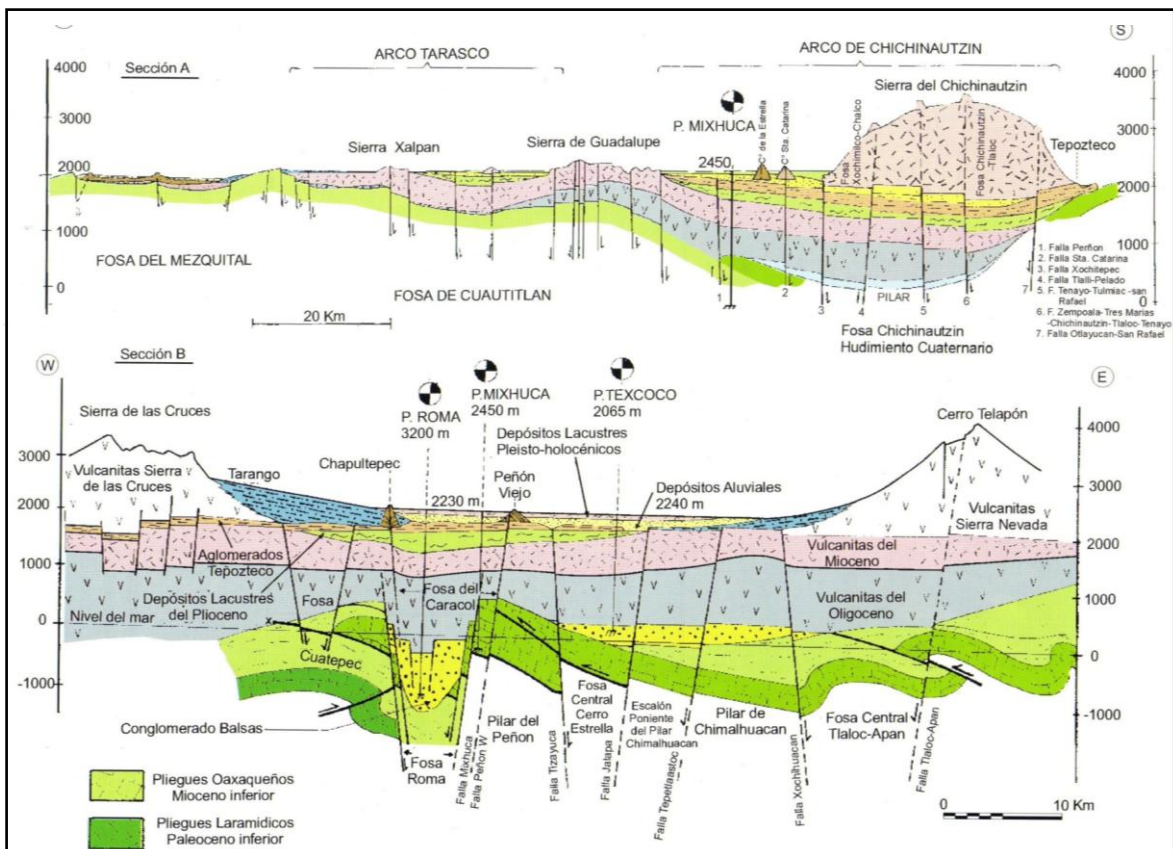


Figura 5.95.- secciones geológicas de la cuenca de México (Santoyo, 2008).

Aplicación del estudio detallado del fracturamiento en diferentes ramas de la geología

La industria a desarrollado sofisticadas tecnologías para la prospección petrolera las cuales se basan en la aplicación de métodos geofísicos para detectar en el campo las propiedades físicas de las rocas en el subsuelo y con los datos obtenidos se desarrolla el procesado y modelado de estos asistido por computadora, lo que permite obtener una representación digital en 3D muy confiable de la configuración y distribución de los materiales en el subsuelo lo cual permite tener una idea muy aproximada de las circunstancias previsible de riesgo por fracturamiento y hundimiento.

La figura 5.96, muestra un ejemplo de una representación 3D con datos reales de una grieta afectando una U. H. en el estado de México. En la figura (A) imagen de satélite, en (B) plano catastral, en (C) sobre posición coordinada de (A) y (b).Cubo 3D resultado de los trabajos geofísicos.

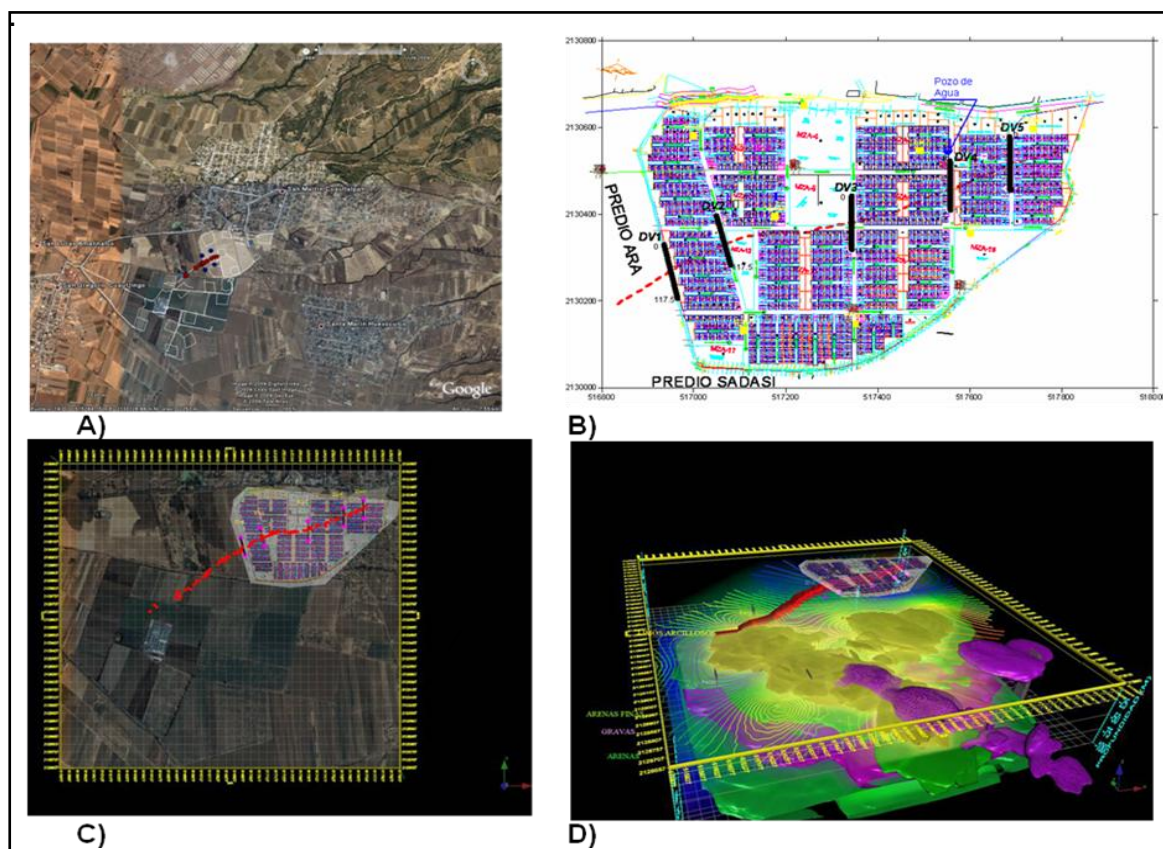


Figura 5.96.- Ejemplo de una representación 3D con datos reales de una grieta afectando una U. H. en el estado de México.

### **5.10.- Recomendaciones ante la problemática del fracturamiento y hundimiento.**

1. Delimitar con más detalle las franjas afectadas, resultando las zonas más vulnerables.
2. Proceder al relleno y sellado de las grietas con materiales adecuados (más ligeros que el suelo natural, preferentemente de bancos de materiales cercanos y económicos) para proporcionar sustentación de las paredes de la misma.
3. Extender el área de estudio a una escala regional con técnicas adecuadas para tratar de determinar sitios potenciales de afectación.
4. Monitoreo y registro periódico en superficie y subsuelo de las áreas de afectación y de las estructuras que presentan algún daño.
5. Generar y establecer nuevas normas constructivas entre las cuales sean necesarias la aplicación de estudios geológico-geofísicos para determinar las características del subsuelo (tipo y distribución de materiales presentes) y con esto determinar la factibilidad y en su caso el tipo adecuado de proyecto constructivo.
6. Es necesario tomar medidas preventivas ante este tipo de fenómenos geológicos, agilizando en este momento los estudios geofísicos, hidrológicos y geotécnicos en las áreas de afectación y a futuro apoyando la investigación científica en diferentes aéreas coordinada por el Instituto científico y tecnológico del Distrito Federal, integrando a todas las instituciones y compañías de investigación nacionales.
7. Desarrollar un programa de planeación presupuestal para atacar en su momento este tipo de afectaciones puesto que se trata de eventos que tiene progresión hacia el futuro.
8. Concientización e instrucción a la población para que esta tenga idea de cómo detectar y dar aviso ante las primeras manifestaciones de afectación en el sitio donde viven y sean capaces de distinguir la vulnerabilidad en que viven.
9. Se deben realizar programas para modificar los procesos de obtención del recurso hidráulico ya sea con proyectos alternativos con obtención de agua de acuíferos lejanos (fuera de la cuenca de México) y principalmente adecuar las captaciones de agua pluvial a nivel vivienda en las azoteas y a nivel urbano con nuevos sistemas de canalización, separación e inyección de agua al subsuelo y a vasos almacenadores, o en su caso pensar en mega cisternas para agua pluvial.