



---

## **VI. HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

### **6.1 Breve Historia del Hundimiento y el Agrietamiento en la Ciudad de México**

En los últimos años el hundimiento y el agrietamiento en la CM son fenómenos que han sido estudiados debido a las consecuencias que han traído consigo desde que se comenzó a construir la Ciudad de México, principalmente por la baja capacidad de resistencia del suelo, la sobreexplotación de los acuíferos y la escasa concientización que se le ha dado al problema.

Los fenómenos del hundimiento y el agrietamiento comenzaron a ser estudiados gracias al Dr. Nabor Carrillo quien fuera rector de la UNAM, comenzó a estudiar más a fondo la Mecánica de Suelos y estableció las bases para poder definir sus causas. Posteriormente se puso énfasis en el estudio de casos ocurridos principalmente en la Ciudad de México y en el Lago de Texcoco, donde se realizaron varios estudios que fueron documentados para poder explicar el fenómeno. También fueron identificados casos similares en otras partes del mundo como en la zona de Eloy-Picacho y en el oeste del Condado de Pinal en el estado de Arizona, USA, en donde el hundimiento y las fracturas se atribuyeron al abatimiento del agua subterránea usada para el riego, entre otros casos.

La CM experimenta actualmente un hundimiento considerable de hasta 30 cm por año en algunas zonas de área metropolitana. Este fenómeno se presenta desde hace más de un siglo y en los últimos años ha ido incrementando principalmente a causa de la intensificación del bombeo de los acuíferos para el abastecimiento de agua potable ya que se tiene calculado que tan solo en el DF se consumen  $33 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua potable, esto se traduce como una sobreexplotación de los acuíferos de unos  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$  aproximadamente provocando el abatimiento de la presión hidrostática en las arcillas y esfuerzos de tensión en el agua que causan compresión en las tres direcciones ortogonales en la estructura del suelo, esto es debido a que en temporada de lluvias el agua forma una lámina delgada sobre el estrato que disipa tensión.



---

No solo la extracción del agua del subsuelo provoca hundimientos, sino también de cualquier material del subsuelo como petróleo, gas o azufre también son capaces de ocasionar el hundimiento de la superficie deformándola no solo verticalmente sino también horizontalmente, este es un fenómeno importante ya que algunas estructuras son mucho más sensibles a los movimientos laterales que a los verticales.

Las grietas pueden o no estar asociadas al hundimiento del suelo; sin embargo, hoy se sabe que el agrietamiento se hace más frecuente durante fuertes lluvias, ya que incrementa la presión de poros lo que causa esfuerzos de tensión del agua al suelo. La mayoría de las grietas se forman a profundidad y luego se propagan hacia arriba; sin embargo, existen varios mecanismos propuestos por distintos autores que pueden explicar su origen tales como: las deformaciones horizontales asociadas al hundimiento diferencial, las fuerzas de filtración que generan tensión en la estructura, la tensión provocada por la contracción horizontal de la zona donde se extrae el agua, etc.

En la Cuenca de México el fenómeno del agrietamiento está directamente relacionado con el hundimiento regional de la cuenca debido al bombeo del agua de estratos del subsuelo. Aproximadamente en el año de 1847, se comenzaron a utilizar los pozos artesianos para abastecer de agua a la ciudad; sin embargo, la necesidad de abrir nuevos pozos se hizo cada vez mayor y con el tiempo se agotaron muchos de los manantiales que se tenían en ese entonces. Como consecuencia los hundimientos se empezaron a hacer notables en la superficie del suelo y muchas estructuras fueron dañadas, varios edificios, el sistema de drenaje, casas, etc.

Es importante realizar el estudio del hundimiento, el agrietamiento y los desplazamientos o deformaciones laterales que sufre el suelo de la CM ya que estos están provocando problemas no solo económicos por los daños que causan directamente sobre la infraestructura urbana, sino también traen consigo problemas sociales y legales debido al riesgo que conlleva habitar zonas donde estos fenómenos están latentes y además son capaces de provocar inundaciones en donde se han registrado pérdidas humanas. Estudios demuestran que el abatimiento de 30m o un hundimiento de 30 cm son suficientes para que se comiencen a formar grietas en el suelo (Molina, 1957)



Debido a los grandes daños ocasionados por el hundimiento y el agrietamiento en la Ciudad de México, principalmente en distintos lugares de Iztapalapa, Netzahualcóyotl, Chalco, Tláhuac, Xochimilco, el Centro Histórico, entre otros, el estudio de estos fenómenos se ha ido acrecentando con el paso de los años. La delegación Iztapalapa en el año de 1999 propuso rellenar diversas fracturas con una mezcla de cemento-bentonita-tepetate con el fin de mitigar el problema del agrietamiento, además implementó diversas normas para reducir el riesgo de hundimiento y la generación de grietas a causa de la extracción del agua en áreas de riesgo. En septiembre del 2007 puso en marcha el Centro de Monitoreo de desarrollo de Fracturas del Subsuelo con la colaboración del Centro de Geociencias de la UNAM. Este centro cuenta con una base de datos (Fig. 6.1) y una página web donde se le permite al público en general consultar información del fenómeno del agrietamiento y además de reportar algún problema.

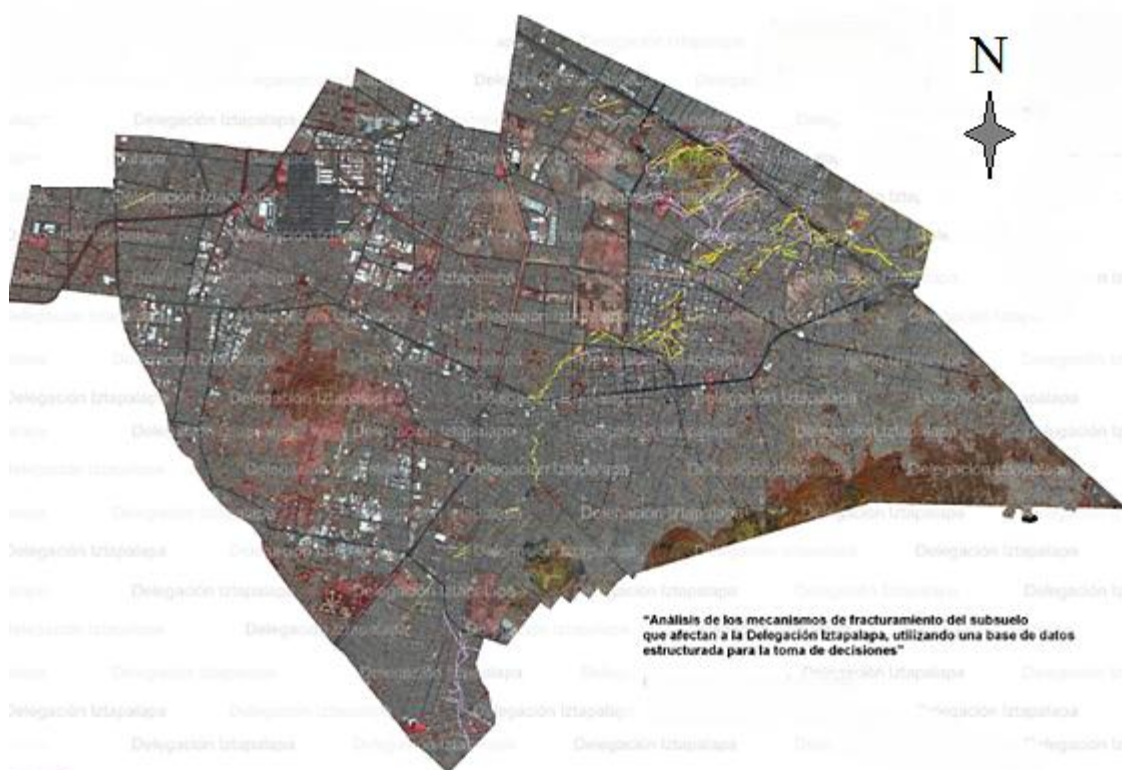


Fig. 6.1. Mapa de fracturas cartografiadas en la Delegación Iztapalapa actualizada hasta el 2007 (Modificada de CMFS).

Para estudiar el hundimiento y el agrietamiento del suelo es importante conocer la geología y la ubicación de cada zona para poder determinar la gravedad del problema y sus



---

implicaciones económicas y sociales. Actualmente el Instituto de Geofísica de la UNAM también realiza trabajos de GPS para la observación y el monitoreo de estas grietas en la ciudad de México para poder construir una base de datos.

## **6.2 Mecanismos de Generación y Propagación de Grietas**

Las grietas son planos de separación o rotura presentes en una formación rocosa y que pueden variar desde unos cuantos centímetros hasta varios metros de tamaño, están relacionadas con procesos tectónicos o con procesos de hundimiento diferencial del suelo. Cualquier cuerpo sólido puede experimentar una deformación que genera grietas cuando se somete a fuerzas externas y pierde continuidad entre dos o más de sus partes.

Estudios realizados acerca del comportamiento mecánico y la fracturación del sistema lacustre de la CM (Orozco y Figueroa, 1991) señalan que las fracturas solo aparecen en zonas de transiciones estratigráficas laterales y en zonas que tienen un alto nivel de hundimiento. La mayoría de estas fracturas se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie, pero existen otros factores geológicos que determinan la susceptibilidad a la fracturación tales como:

- Las características de una secuencia sedimentaria, como el ambiente de depósito y estructuras pre-existentes en el basamento.
- Los cambios verticales y horizontales en la granulometría de la formación sedimentaria.
- La permeabilidad del terreno que condiciona el comportamiento mecánico de los materiales.
- La interacción de factores geológicos que actúan como aceleradores que rompen el equilibrio mecánico del sistema.
- La variación del espesor de los sedimentos y la humedad determinan la forma de las fracturas, su evolución y lo que sucede a sus alrededores.



- La variación mineralógica en el material arcilloso se puede traducir en movimientos de compresibilidad y fracturación por efecto de la deformación diferencial.

Holzter y colaboradores (1976) afirman que las grietas se presentan en puntos de máxima curvatura donde se presenta el hundimiento y que la topografía de la roca basal es un factor importante. Larson (1983) propuso una lista de lugares en donde comúnmente la aparición de las grietas es más susceptible debido al abatimiento del agua subterránea (Fig. 6.2)

- Sobre el eje del lomo de un talud.
- En la orilla de un talud o un frente móvil de hundimientos.
- Sobre el lomo de un talud sepultado.
- Sobre el contacto de dos facies sedimentarias de distinta compresibilidad.

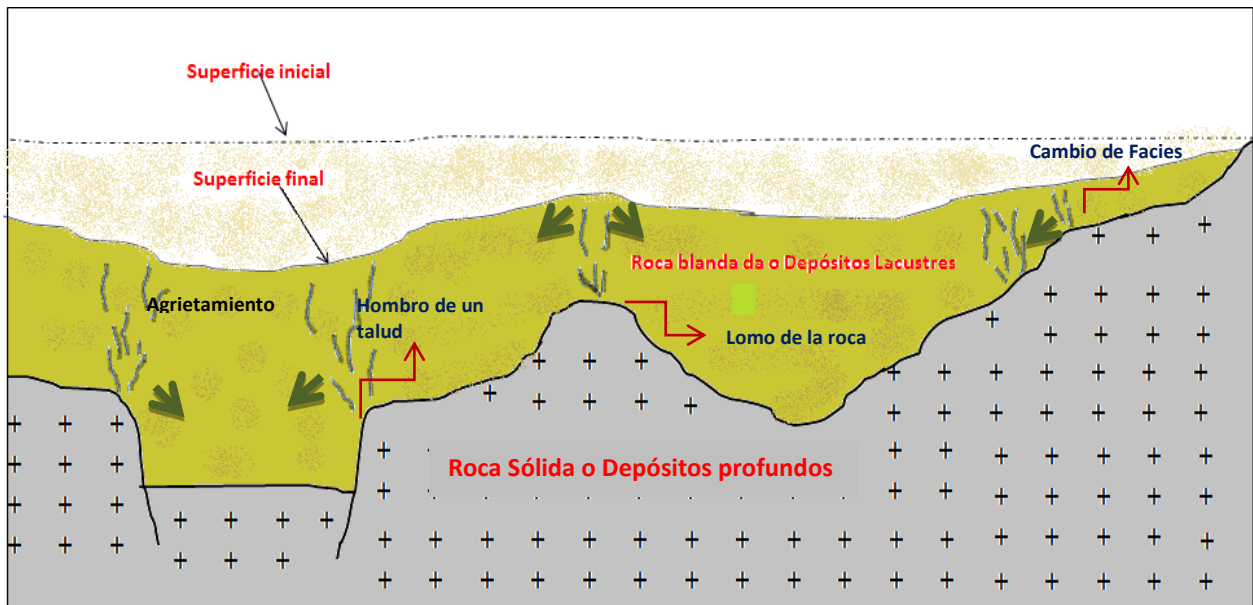


Fig. 6.2. Lugares Susceptibles para la aparición de grietas (Modificado de Pacheco, 2007).

## Mecanismos de generación de grietas.



---

Varios autores propusieron algunos mecanismos de agrietamiento del suelo, pero no todos fueron aceptados por la comunidad científica; a continuación mencionaremos algunos de ellos:

1. Las deformaciones horizontales asociadas a hundimientos diferenciales (Feth, 1951)
2. Fuerzas de infiltración que generan tensión (Lofggren, 1972)
3. Tensión provocada por la contracción horizontal en la zona donde se extrae agua subterránea (Holtzer and Davis, 1976)

Uno de los principales factores generadores de grietas en sedimentos lacustres es el desequilibrio mecánico causado por la alteración de las propiedades físicas del sistema en tiempos muy cortos. Existen fenómenos naturales que actúan como mecanismos generadores de fracturas, como son la actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales; sin embargo, los mecanismos más importantes son los procesos provocados por actividades humanas.

Las grietas han sido clasificadas en tres grupos principales de acuerdo con las causas externas o el mecanismo por el cual son generadas:

- *La variación del contenido de agua de la formación:* el agrietamiento comienza cuando una variación del contenido de agua produce un cambio en forma rápida en el estado de esfuerzos en las formaciones arcillosas, las fuerzas de tensión son provocadas por la evaporación. En el primer ciclo de secado del suelo se generan fracturas provocando grietas muy cercanas entre si y en un ciclo posterior se genera otro agrietamiento con separaciones mayores e irregulares.

Las grietas por variación del contenido de agua son tradicionales en el Lago de Texcoco, generalmente son de trazo irregular con una separación hasta de cientos de metros, normalmente tienen una dirección preferencial, aparecen durante la temporada de lluvias, su abertura puede ser de unos cuantos centímetros hasta medio metro. Aparecen repentinamente y se azolvan en pocos meses con arcillas y limos transportados por el viento y los escurrimientos.



---

Este tipo de grietas generalmente se encuentran rellenas por material fino o por arena con incrustaciones de caliche y tequesquite. Estas grietas no atraviesan construcciones importantes ya que generalmente solo se aproximan a las construcciones y desaparecen cerca de estas.

- *El asentamiento diferencial provocado por el hundimiento regional:* debido al hundimiento regional se manifiestan grietas generadas por la tensión que se produce, generalmente este tipo de grietas sigue trayectorias semejantes a las curvas de nivel topográfico o el contorno de alguna formación subterránea con mayor rigidez que las formaciones arcillosas. Su longitud es superior a 100 metros, generalmente existe un desnivel entre las grietas, quedando el más alto hacia la zona en que aumenta la elevación del terreno. Se presentan en cualquier época del año, aunque las lluvias favorecen su aparición y en ocasiones se manifiestan periódicamente en la misma zona.
- *La rápida variación de esfuerzos horizontales:* es provocado por excavación o por la aplicación de cargas horizontales; por ejemplo, las excavaciones requeridas por plantas de tratamiento para la construcción de estructuras de concreto para tanques de 30 o 40 m de diámetro y profundidades de 4.5 m, aproximadamente, la perforación de pozos, el hincado de pilotes, etc. (SMMS, 1991 ).

### **Propagación de grietas.**

Los principales factores que determinan la propagación de grietas son el desequilibrio mecánico producido por sobrecarga estática y dinámica y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo como agua, petróleo o gas (SMMS, 1991).

Las grietas pueden desarrollarse o propagarse de tres distintos modos:



*Por tensión:* este tipo de grietas se generan cuando un esfuerzo de tensión separa entre sí las caras de la grieta, es decir, se observa una abertura simétrica con desplazamiento relativo entre las caras correspondientes perpendicular a la superficie de la fractura, se aplica tensión normal al plano de fractura (Fig. 6.3).

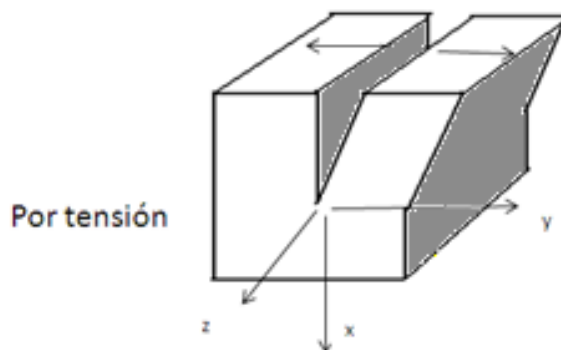


Fig. 6.3. Propagación de grietas por tensión (Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991)

*Por tensión cortante o deslizamiento:* las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra en dirección perpendicular a su vértice por la separación asimétrica por lo que se presenta un desplazamiento tangencial y perpendicular al frente de la grieta denominándose falla a causa del movimiento ocurrido (Fig. 6.4).

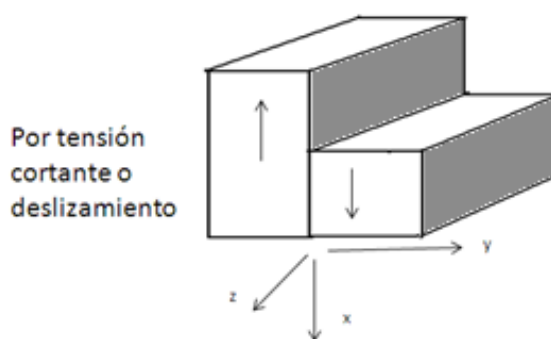


Fig. 6.4. Propagación de grietas por tensión cortante o deslizamiento (Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991).





*Por rotura transversal o por tensión cortante y torsión:* las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra pero con un desplazamiento paralelo al frente de la grieta y ocasionado por la inducción de un esfuerzo de torsión (Fig. 6.5).

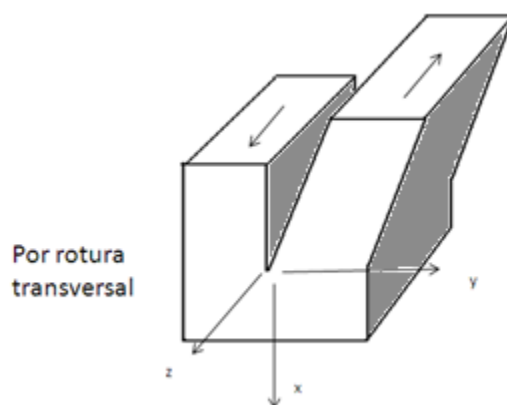


Fig. 6.5. Propagación de grietas por rotura transversal o por torsión cortante y torsión  
(Modificada de Agrietamiento de Suelos, SMMS, 1991).

En general el agrietamiento de un cuerpo se puede generar por cualquiera de los modos descritos o por la combinación de ellos, las grietas pueden ser controladas si se modifica el estado de esfuerzos en la masa del suelo por medio del uso de rellenos aplicados progresivamente para reducir los esfuerzos de tensión en el vértice de la grieta.

### **6.3 Campos de Esfuerzos y Generación de Fallas.**

En esta sección se describen los campos de esfuerzos existentes en la Cuenca de México documentados gracias a distintos estudios geológicos realizados por diferentes autores como Mooser (1975), de Cserna y colaboradores (1988), Huesca(2008), entre otros, donde establecen las posiciones geográficas de las fallas, su cinemática y el campo de esfuerzos que las generan. Los esfuerzos en la CM generan tres principales sistemas de fallas en direcciones NE-SW, SE-NW y E-W.

En la teoría de la Tectónica de Placas se dice que las placas son bloques rígidos en movimiento y que solo se deforman en los bordes, en la parte que se encuentra en contacto con otra placa; sin embargo se ha comprobado que dentro de las placas existen grandes zonas de deformación. Por medio de la Geodesia se sabe que la deformación en las placas



tectónicas no solo sucede sus límites, ya que una parte del movimiento sucede a distancias considerables de los límites. Este caso sucede en el sur de México donde existe una gran zona de deformación que proviene del movimiento convergente de las placas tectónicas.

La Placa de Norteamérica se encuentra cabalgando sobre la Placa de Cocos y sobre la Placa de Rivera como se muestra en la figura 6.6, debido a este fenómeno existe una zona en movimiento muy grande, desde la trinchera en las costas del Pacífico hasta el centro del país que provoca la deformación en toda esa región, además de la formación de sistemas de fallas en diferentes direcciones. El área deformada es muy extensa, abarca en el norte el Eje Neovolcánico, en el sur la costa del Océano Pacífico, en el este hacia Oaxaca y Chiapas, al oeste hasta Jalisco.

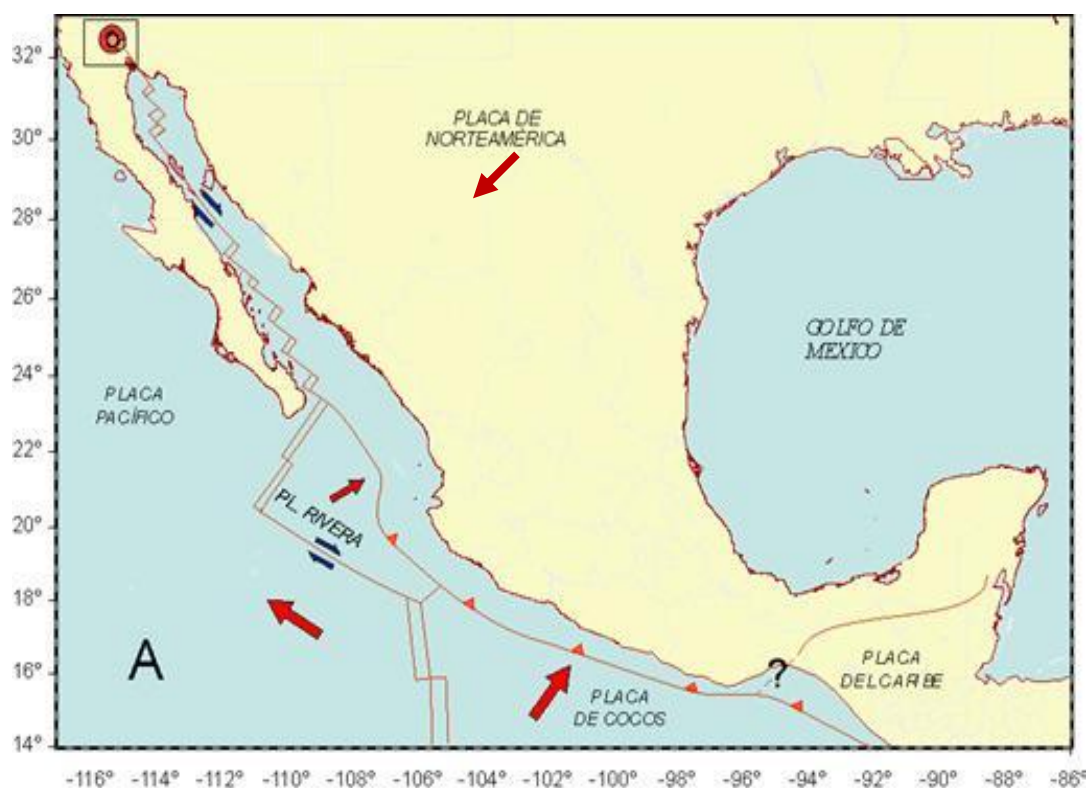


Fig. 6.6. Movimiento de las placas tectónicas que influyen en México (Modificada de SSN).

Es importante recordar que debido al movimiento de las Placas tectónicas, la CM se encuentra en una zona de alta sismicidad, por esta razón la mayoría de los estudios que se



---

han realizado van enfocados a la evaluación del riesgo sísmico; sin embargo nos enfocaremos en el análisis de la deformación de CM provocada por la convergencia entre dos placas oceánicas y una continental que hacen que la placa cabalgante se someta a un campo de esfuerzos extensivos y compresivos. La deformación en el centro de México se denomina por extensión y cizalla, este fenómeno no es muy común en los procesos de subducción ya que se esperaría que la placa cabalgante estuviera sometida a un campo compresivo orogénico con fallamiento inverso como sucede en la mayoría de los procesos de subducción activos.

La forma en la que sucede la deformación en el centro de México es muy particular y por lo tanto haciendo un análisis tectónico regional de la estructura geológica de la cuenca, se puede inferir que los lineamientos tienden a reflejar la presencia de sistemas de fallas (Chavacán, 2007) con orientación NE-SW (A), SE-NW (B) y E-W(C) (Fig.6.7). Las fallas orientadas al NE corresponden a un desplazamiento lateral o cizallamiento horizontal (de Cserna y colaboradores, 1988).

La zona de cizallamiento necesariamente implica un movimiento diferencial de dos bloques continentales mayores de México, cuyo motor es la subducción oblicua que se está efectuando a lo largo de la fosa México-Mesoamericana con un vector de movimiento cercano a  $45^\circ$  E y velocidad de 5 a 7 cm por año (de Cserna y colaboradores, 1988).

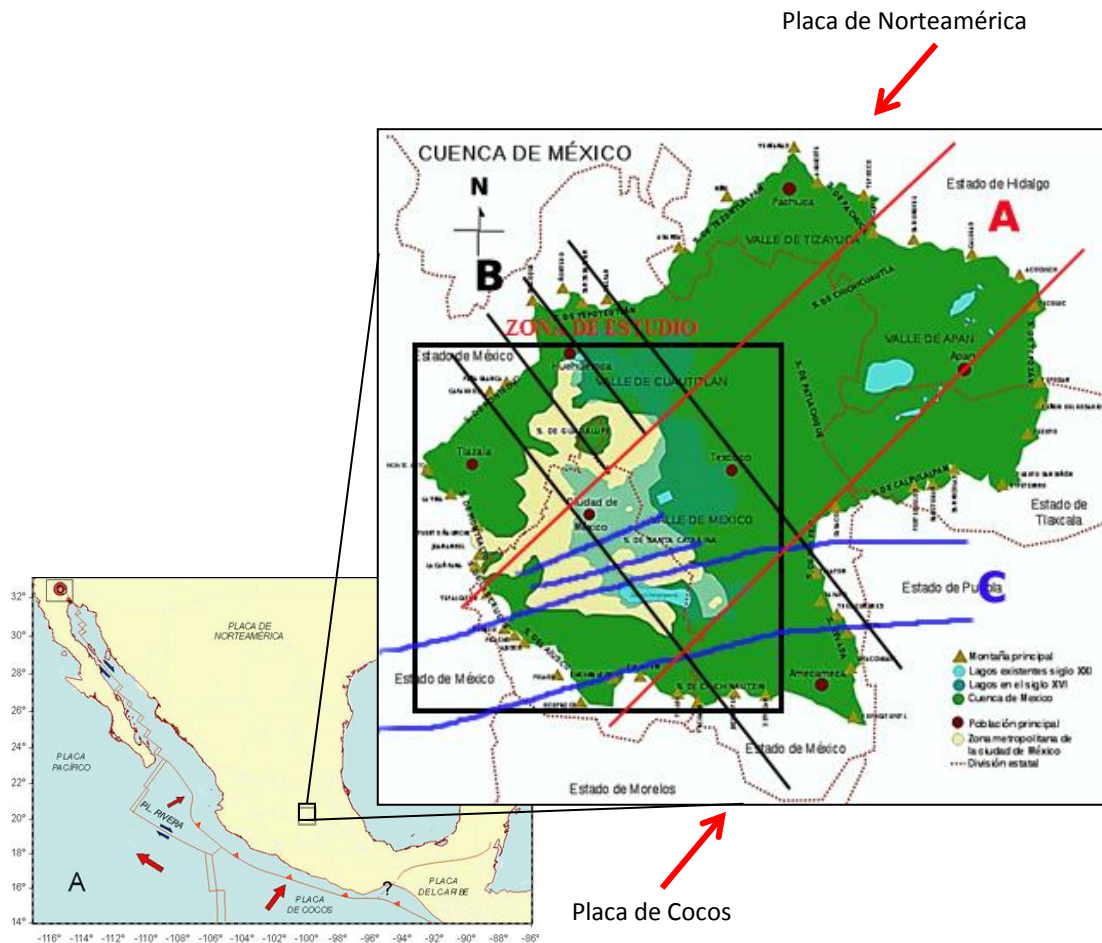


Fig. 6.7. Sistemas de fallas al NE (A en líneas rojas), SE(B en líneas negras) y E(C en líneas azules) originadas por la influencia del movimiento de la Placa de Cocos y la Placa de Norteamérica que influyen en la deformación de la CM (Modificada de Chavacán, 2007).

## 6.4 Desplazamientos Horizontales

Los movimientos de la litósfera, en general de la corteza terrestre, son tridimensionales. Dependiendo del estado de esfuerzos y las características geodinámicas del terreno, pueden dominar los movimientos verticales o los movimientos horizontales. La componente vertical se refleja mejor en la topografía por la subsidencia y puede ser fácilmente estudiada a partir de métodos geológicos, geodésicos, y otros; sin embargo, los movimientos laterales o la componente horizontal es menos evidente y se manifiesta menos, sobre todo en áreas planas, donde la componente vertical es pequeña es muy difícil identificar dichas



---

deformaciones con métodos tradicionales. Por esta razón recurrimos a hacer mediciones utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para poder llevar a cabo el estudio de los movimientos horizontales y así poder encontrar su relación con la geodinámica de la cuenca.

La importancia de este capítulo radica en la breve descripción de los principales mecanismos que participan en el comportamiento de una superficie. A continuación se describen algunas de las principales características de los desplazamientos horizontales:

- a) El espesor de la secuencia estratigráfica que conforma el relleno de la cuenca debe ser muy significativo.
- b) Es esencial la existencia de hundimientos diferenciales en el área.
- c) En el punto de máximo hundimiento no hay desplazamientos horizontales ni a distancias grandes de la zona de hundimientos, es decir que la máxima deformación horizontal de la superficie se presenta en los puntos de menor subsidencia, en la dirección del campo de esfuerzos horizontales principales, esto es, el punto de máximo movimiento corresponde con el punto de mayor pendiente del perfil de subsidencia vertical, la tensión horizontal de este punto es cero.
- d) Los desplazamientos horizontales se dirigen hacia la zona del hundimiento.
- e) El máximo desplazamiento horizontal se presenta en el punto de máxima pendiente de la zona de hundimiento.
- f) En el centro de la zona de hundimiento, la deformación horizontal es de compresión y en las orillas la deformación es de extensión.
- g) Se presentan principalmente en zonas donde hay estructuras geológicas activas, por ejemplo una falla o una superficie de contacto, que pueden provocar hundimientos ya que están presentes planos de discontinuidad que se convierten en superficies con movimiento horizontal del suelo.

---

## **6.5 Desplazamientos Horizontales en la Cuenca de México**

---



---

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las principales causas de subsidencia en la CM es la extracción de agua subterránea. Sin embargo, cuando se hace una extracción de cualquier tipo de material del subsuelo, ya sean sólidos, líquidos o gases, se presenta una deformación de la superficie, pero no solo en dirección vertical, sino también lateralmente, es decir, los movimientos horizontales y los campos de velocidad vertical son complementarios entre sí.

La subsidencia en la CM es muy variable, podemos encontrar territorios en los que existe un gradiente de velocidad muy pequeño en dirección vertical y otros sitios que se caracterizan por gradientes de alta velocidad, lo mismo sucede con los movimientos horizontales.

Las características de los distintos tipos de suelo que conforman la CM influyen directamente en el origen de los desplazamientos horizontales. La Cuenca de México está consolidada sobre una cuenca hidrográfica antigua, profundamente disectada, que drenaba hacia el sur (antiguo Río Amacuzac), que quedó bloqueada por la Sierra de Chichinautzin hace unos 500000 años. Los sedimentos lacustres del sitio son considerados altamente compresibles y generan demasiados problemas en la cimentación para cualquier construcción que se desea hacer en la ciudad de México (Díaz-Rodríguez, 1998).

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