

LOS SISMOS Y SUS CAUSAS

Ismael Herrera Revilla,* L. Ponce Mori* y G. Suárez Reynoso*
*Investigador, Instituto de Geofísica, UNAM

RESUMEN Se presenta en forma breve un panorama del potencial sísmico en México y sus diversas causas. Se hacen algunas consideraciones respecto a la necesidad de fortalecer las observaciones sismológicas y la investigación en este campo.

1. INTRODUCCION

En general, llamamos temblor o sismo a cualquier vibración o estremecimiento del suelo. La tierra puede temblar por razones muy diversas, entre las que se tienen: explosiones, colapsos del subsuelo o cualquier otro tipo de deslizamiento o acomodamiento que se produzca por debajo de la superficie del terreno. Los sismos producidos por las explosiones volcánicas pueden ser bastante fuertes. Sin embargo, la mayor parte de los temblores, sobre todos los más fuertes, tienen origen tectónico.

La Tierra, nuestro planeta, está formada por capas concéntricas. La más superficial es la corteza, cuyo espesor es de alrededor de 30 km en los continentes y se reduce a 15 km en los océanos. El límite inferior de la corteza se conoce como "Discontinuidad de Mohorovic". Por debajo está el manto que se extiende hasta una profundidad de 2,900 km, donde se encuentra el núcleo de la Tierra. Tomando en cuenta que el radio de la Tierra es de 6,378 km, resulta que el núcleo terrestre es una esfera de 3,478 km de radio.

El cascarón más externo de la Tierra se comporta como un cuerpo rígido. Esta porción tiene un espesor de aproximadamente 100 km y forma la litósfera, constituida por la corteza y parte del manto que flota sobre el resto del manto. El comportamiento del manto, desde una perspectiva geológica (es decir, en períodos del orden de millones de años) es similar al de un líquido.

Dicho recubrimiento sólido no es continuo, sino que está partido en pedazos similares a los gajos de una pelota de fútbol; a estas porciones se les llama placas. Las que forman o colindan con nuestro país son: la del Pacífico, la de Norteamérica, la de Cocos y la del Caribe. Otras placas muy importantes son: la de Nazca, la Sudamericana, la Africana, la Euroasiática, la Australiana y la Antártica (Fig. 1)

o distinguir dos clases de movimientos en las fronteras de subducción: sismos ordinarios y sismos característicos. En la zona de subducción mexicana se generan sismos característicos con magnitud del orden de 7.8 y cuya longitud de ruptura tiene cierta relación con el tamaño de las brechas, alcanzando unos 200 km. Por otra parte, los sismos ordinarios son más pequeños y frecuentes.

transcurrir muchos años antes de que ocurra un sismo característico en una misma brecha. Por ejemplo, en el caso de México, los períodos de recurrencia se han estimado entre 35 y 80 años. Durante este tiempo la brecha está quieta, en el sentido en que no presenta actividad sísmica mayor, por lo que se habla de una zona de quietud. En general, una zona de quietud que se localiza en una zona de subducción sísmica indica que se está acumulando energía que finalmente se liberará en forma de sismos. Es importante que estas zonas de quietud sísmica apoyen los indicios más significativos para realizar la predicción de los temblores. evidente que si es posible determinar, a partir de la observación directa de las fallas, el momento en que esta energía sea liberada, la predicción de los temblores sería una realidad. Sin embargo, hasta ahora la ciencia no ha logrado dar este último paso.

EL CASO DE MEXICO

El movimiento de una placa bajo la otra no es continuo, pues la fricción origina discontinuidades en el desplazamiento. Por ello, el esfuerzo se acumula hasta llegar a un nivel mayor que la fuerza de fricción entre las placas, lo que produce un deslizamiento súbito que genera las ondas sísmicas o vibraciones del terreno, mismas que constituyen el temblor o terremoto. Así, cada movimiento repentino es un temblor, pero al mismo tiempo ese movimiento es el que mantiene a la placa continental por encima del océano. De esta manera, el motor de los sismos es el mismo que origina los cambios geológicos: sin él no tendríamos continentes, valles, ni atmósfera, o vida sobre la Tierra.

La frontera o contacto entre las placas, en una zona de subducción, es una gigantesca falla o sistema de fallas. Así, por ejemplo, frente a las costas de Michoacán y Guerrero se encuentra el contacto entre las placas de Norteamérica y de Cocos, lo que origina la profundidad oceánica conocida como fosa de Acapulco.

El movimiento de una placa bajo la otra no es continuo, pues la fricción origina discontinuidades en el desplazamiento. Por ello, el esfuerzo se acumula hasta llegar a un nivel mayor que la fuerza de fricción entre las placas, lo que produce un deslizamiento súbito que genera las ondas sísmicas o vibraciones del terreno, mismas que constituyen el temblor o terremoto. Así, cada movimiento repentino es un temblor, pero al mismo tiempo ese movimiento es el que mantiene a la placa continental por encima del océano. De esta manera, el motor de los sismos es el mismo que origina los cambios geológicos: sin él no tendríamos continentes, valles, ni atmósfera, o vida sobre la Tierra.

Se reconoce en la actualidad que en las placas existen segmentos llamados brechas, que tienen relativa independencia de movimiento. En México, que es un país altamente sísmico (Fig. 2) debido a que su costa del Pacífico está en el borde de una zona de subducción, en la que la placa de Norteamérica cabalga sobre la de Cocos, existen varias de estas brechas, entre ellas están las de Jalisco, Colima, Guerrero, Ometepe y Tehuantepec. Es nec-

Estos ejemplos justifican la necesidad que tiene México para desarrollar investigaciones y observaciones sismológicas y la preocupación y obligación que tienen las instituciones gubernamentales para prevenir y atender emergencias originadas por terremotos.

3. TECTONICA GLOBAL Y SISMICIDAD DE MEXICO

La actividad sísmica de México tiene su origen en los fenómenos neotectónicos producto de la interacción de cuatro grandes placas (Fig. 1), a saber, de Norteamérica, del Pacífico, de Cocos y del Caribe. En el análisis del potencial sísmico también hay que considerar la pequeña placa de Rivera. En general, en México se presentan dos grandes tipos de actividad sísmica.

- Zona de desplazamiento horizontal de placas (Placas de Norteamérica y del Pacífico).
- Zona de Convergencia de Placas. (Placas de Rivera y Norteamérica, Placas de Cocos y del Caribe).

A continuación se analizan sus características con mayor detalle.

A. El movimiento relativo de las Placas de Norteamérica y del Pacífico da origen, en México, a la actividad sísmica que ocurre en el Golfo de California y en la parte norte de la Península de Baja California. Los grandes sismos presentan, por lo general, un movimiento transcurrente lateral derecho a lo largo de fallas de rumbo. Un ejemplo de desplazamiento repentino en este sistema es el terremoto de Mexicali-Valle Imperial, $M_s=6.9$, ocurrido el 14 de Octubre de 1979 que causó daños tanto en México como en los Estados Unidos de Norteamérica.

El movimiento relativo entre las Placas de Norteamérica y del Pacífico, a lo largo de las fallas de San Andrés y San Jacinto, presenta valores promedios de 2.5 y 10 cm/año; el potencial sísmico en México, en el norte de la Península de Baja California, está asociado a la extensión de este sistema de fallas hacia el Sur.

Hay que recordar que en 1887 ocurrió el terremoto de Bavispe, Sonora que afectó a poblados fronterizos de México y los E.U.A. Su magnitud es de 7.4 y su mecanismo focal corresponde al de una falla normal con desplazamiento de 3 m a lo largo de 80 km de longitud y unos 15 km de profundidad. El origen de este terremoto tiene relación con la provincia tectónica Basin and Range controlada por esfuerzos tensionales horizontales de la corteza terrestre. En los Estados Unidos de Norteamérica, gracias a la amplia cobertura instrumental está claramente definida la actividad sísmica asociada a la provincia tectónica Basin and Range; en México, esta provincia sísmica no ha sido estudiada instrumentalmente.

B. La interacción de las Placas de Cocos y Norteamérica en el Sur de México (Fig. 1) da origen a grandes sismos, que por su naturaleza podemos diferenciar en 4 tipos fundamentales: [1] interplaca, debido al desplazamiento relativo de ambas placas a profundidades someras (15-35 km); [2] Intraplaca, por fracturamiento de la placa subducente de Cocos (Fig. 4) a profundidades intermedias (40-150 km); [3] Intraplaca, por deformaciones tensionales de la corteza terrestre (5-15 km) debido a fenómenos volcánicos; [4] Intraplaca, por deformaciones de compresión de la corteza y manto de la Placa de Norteamérica a profundidades someras (20-30 km).

B.1 Los terremotos de interplaca o típicos de subducción, presentan en México las mayores magnitudes registradas instrumentalmente. En Junio de 1932, los terremotos de Jalisco alcanzaron una magnitud de 8.4 y 8.0 en la escala de Richter. En este siglo en el Sur de México, entre Jalisco y Oaxaca han ocurrido 33 sismos de magnitud mayor que 7.0. Las placas de Cocos y Norteamérica convergen con una velocidad promedio de 6 cm/año. Los grandes sismos liberan aproximadamente la mitad de la energía elástica acumulada por dicho movimiento; la otra mitad se libera por procesos asísmicos.

Un ejemplo de estos grandes terremotos es el ocurrido el 19 de Septiembre de 1985 de magnitud 8.1 y de carácter complejo, pues estuvo constituido por 2 eventos de aproximadamente igual magnitud que ocurrieron a 27 segundos de diferencia, y con epicentros distantes alrededor de 100 km, estando situado el segundo al sureste del primero. Al día siguiente, 36 horas después del terremoto del 19 de Septiembre, ocurrió otro terremoto de magnitud 7.5 situado a continuación del área de réplicas del terremoto principal. Fenómenos de ésta y mayor complejidad se presentan también en otras zonas de subducción. El modelo de tectónica de placas es útil para predecir las regiones de mayor potencial sísmico, pero insuficiente para pronosticar el grado de complejidad de las rupturas por encañamiento casi simultáneo de dos o más unidades sismogénicas. El terremoto de 1787 pudiera constituir un evento múltiple que rompió más de una unidad sismogénica, dando como resultado un terremoto mayor, de magnitud del orden de 8.5.

B.2 En México, la Placa oceánica de Cocos penetra por debajo de la Placa de Norteamérica con un ángulo que varía de 35° en Colima-Michoacán, a 15° en Oaxaca. La expresión superficial de este fenómeno es un Eje Volcánico Transmexicano no paralelo con la Trincheras de Acapulco. Además, a profundidades del orden de 50 a 100 km, en la Placa de Cocos se producen tensiones que originan sismos de gran magnitud, del orden de 6.5 a 7.0, que causan graves daños en las poblaciones del interior de la República. Ciudades de los estados de Puebla, Veracruz y Norte de Oaxaca han sido afectadas notablemente por

terremotos de este tipo. No existen fundamentos para descartar que terremotos de esta naturaleza puedan ocurrir también en la parte norte de los estados de Guerrero y Michoacán, pues allí ocurren sismos de magnitud moderada, menor que 6.0, originados por esfuerzos tensionales en la placa de Cocos que subduce.

A manera de ejemplo de terremotos interplaca de profundidad intermedia, citamos el de Córdoba-Orizaba de Agosto de 1973 y el de Huajuapán de León de Octubre de 1982, ambos de magnitudes del orden de 7.0. El de mayor magnitud de este siglo ocurrió al Sur de la Ciudad de Oaxaca, en enero de 1931, con magnitud igual a 8.0 y profundidad de 40 km. Todos ellos han causado intensos daños en el área epicentral, destruyendo monumentos históricos y otras obras civiles.

B.3 En el territorio continental del Sur de México ocurren también sismos de gran magnitud (M 7.0) asociados al Eje Volcánico Transmexicano. Estos sistemas generalmente son del tipo de falla normal, someros (5-15 km de profundidad) controlados por esfuerzos tensionales de la corteza. Los dos sismos más notables ocurridos durante este siglo son los de Tixmadeje-Acambay, Edo. de México y magnitud 7.0; el segundo ocurrió en 1920 a 30 km de la Ciudad de Jalapa, Ver. con magnitud de 6.5. Estos terremotos son especialmente peligrosos en la región epicentral por su poca profundidad (Fig. 3).

La sismicidad de gran magnitud asociada al Eje volcánico Transmexicano no ocurre al azar sino asociada a rasgos morfoestructurales de origen volcánico. Una de las tareas más urgentes de la sismología mexicana es instrumentar las áreas de alto potencial sísmico del Eje Volcánico Transmexicano y realizar investigaciones multidisciplinarias con geólogos e ingenieros sísmicos, pues las ciudades más pobladas y una porción importante de la infraestructura industrial están asentadas en él.

B.4 En México ocurren también sismos en la región del Golfo de México, debido a la deformación compresional de la corteza terrestre, por la convergencia de las placas de Norteamérica y de Cocos. Estos sismos presentan en general magnitudes moderadas, menores de 5.5. Sin embargo, en la región de Jáltipan-Coatzacoalcos, en el Estado de Veracruz, han ocurrido terremotos destructores como el del 26 de Agosto de 1959, de magnitud 6.4 y a profundidad de 20 km. Los antecedentes históricos confirman que esta zona ha sido afectada anteriormente por terremotos similares, lo que significa que en ella existe un peligro sísmico permanente. Es una región aún no instrumentada en México y requiere una atención urgente por el amplio desarrollo industrial, principalmente petrolero (Fig. 4).

PELIGRO SISMICO ACTUAL EN MEXICO

La descripción anterior ilustra que en México existe un peligro sísmico en una parte importante del país. Sólo en la península de Yucatán y en región central y oriental del norte del país no existe peligro sísmico. La pregunta fundamental es, entonces: ¿Dónde, cuándo y con qué magnitud puede ocurrir un terremoto?

La primera pregunta ya está contestada. La respuesta al cuándo, es imposible contestarla en el momento. Sin embargo, podemos destacar que usando los conceptos de la tectónica de placas y la historia sísmica de México se puede contestar lo siguiente:

Para los terremotos de subducción, los períodos de recurrencia varían, en general, entre 35 y 80 años. Con estos antecedentes, concluimos que en el Sur de México existen a lo menos 2 brechas importantes pronto a romperse; una es la de Guerrero, entre Zihuatanejo y Acapulco y la otra es la del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Los últimos terremotos en la primera brecha ocurrieron a comienzos de este siglo, hace casi 80 años. Los últimos terremotos de la segunda, ocurrieron probablemente hace 200 años, en 1787.

Las magnitudes, de acuerdo al tamaño de la brecha pueden variar de 7.9 a 8.4. Es importante insistir que esta estimación del peligro sísmico no tiene ningún valor predictivo sobre la fecha de ocurrencia; sólo significa que la probabilidad de ocurrencia de un terremoto en dichas regiones es alta, de acuerdo al conocimiento actual de la tectónica global. Otras investigaciones y observaciones pudieran refinar nuestras estimaciones, pero no eliminar el hecho de que tarde o temprano allí ocurrirá un gran terremoto.

Para los grandes terremotos de profundidad intermedia, los períodos de recurrencia parecen ser del orden de 100 años; lamentablemente son difíciles de estudiar espacialmente, pues la actividad microsísmica es de baja magnitud y la cobertura observacional actual de México no es suficiente para localizar confiablemente la sismicidad de fondo. Sin embargo, y muy en general, podríamos sugerir que la región Sur de Puebla, Norte de Oaxaca presentaría un mayor peligro sísmico y magnitud probable del orden de 7.0.

Mucho más difícil es pronosticar el "cuándo" ocurrirán los terremotos del Eje Volcánico y del Golfo de México; las descripciones históricas no permiten estimar un período de recurrencia confiable y esto puede deberse a que los procesos tectónicos allí son lentos y la estructura geológica compleja. Las magnitudes esperadas no deberían ser inferiores a las máximas observadas instrumentalmente.

5. OBSERVACIONES SISMOLOGICAS EN MEXICO

Tradicionalmente las observaciones sismológicas de México las ha realizado el Servicio Sismológico Nacional (Fig. 4), dependiente actualmente del Instituto de Geofísica de la UNAM. El SSN cuenta con observaciones desde comienzos de este siglo; desde 1910 cuenta con una red de sismógrafos mecánicos tipo Wiechert que, en su época fue una de las mejores de América. El desarrollo posterior fue poco homogéneo; en los años 1960-1970 se instalaron sismógrafos electromagnéticos de los cuales aún funcionan algunos. En la segunda mitad de los años 70 se inició el desarrollo de una red telemétrica (RESMAC) que alcanzó a tener unas 12 estaciones en el país, pero con una distribución geográfica poco útil para estudios de sismicidad. En el presente, en el Instituto de Geofísica de la UNAM, existen proyectos ambiciosos de desarrollo instrumental, adecuándose al actual desarrollo de la tecnología electrónica, de comunicaciones y computacional. Sin embargo, este tipo de proyectos rebasan la capacidad financiera de la propia Universidad y su éxito dependerá del apoyo financiero permanente del Gobierno de México.

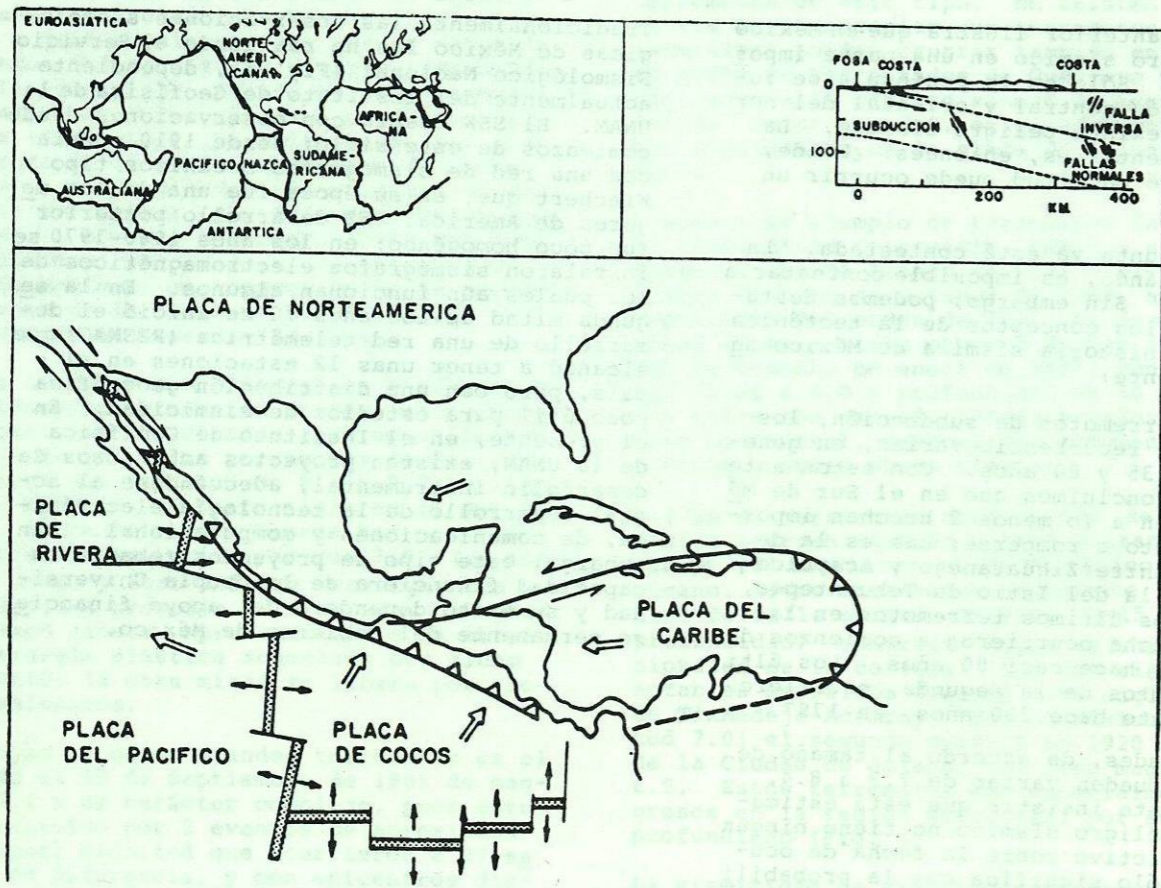


Fig. 1 Disposición de las placas tectónicas, cuyo movimiento relativo determina la sismicidad del territorio de México. En la figura de la esquina superior izquierda se muestra esquemáticamente la distribución global de las mayores placas tectónicas. En la figura de la esquina superior derecha, en un corte esquemático se observa el proceso de subducción y los sismos a los que da origen: de interplaca o subducción, de intraplaca de fallamiento normal y de intraplaca de fallamiento inverso.

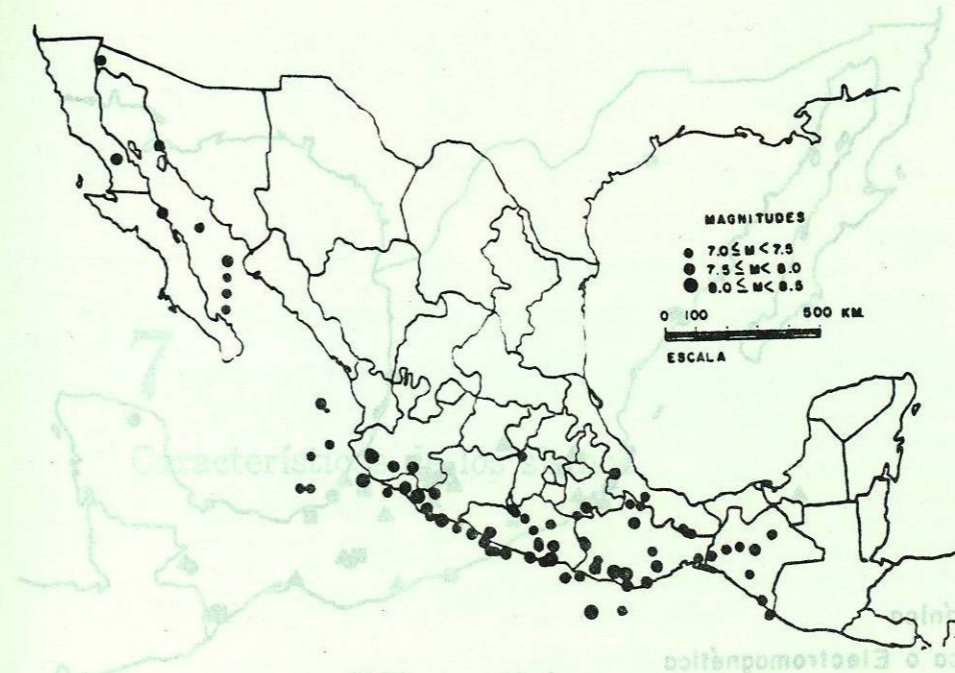


Fig. 2 Mapa epicentral de los sismos mayores ($M \geq 7.0$) ocurridos en México desde 1900 a la fecha. Se observa que la mayor liberación de energía sísmica ocurre en la parte sur de la República.

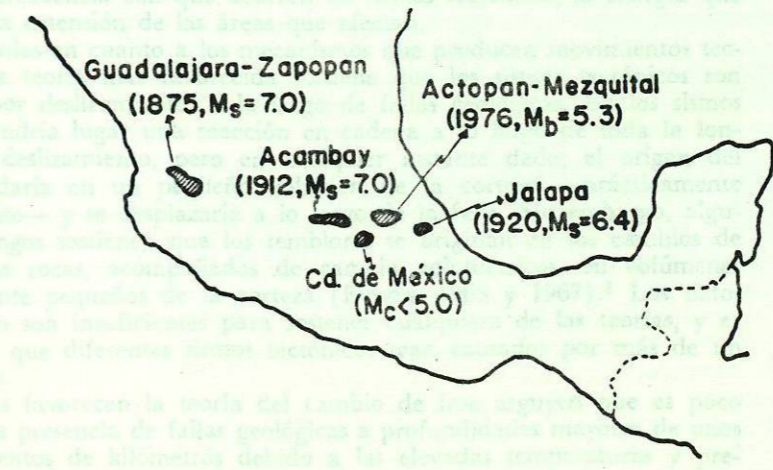


Fig. 3 Mapa esquemático de las regiones del Eje Volcánico Mexicano que han sido afectadas repetidamente por sismos someros de moderada o gran magnitud. Estos sismos son especialmente peligrosos por ocurrir en zonas densamente pobladas.

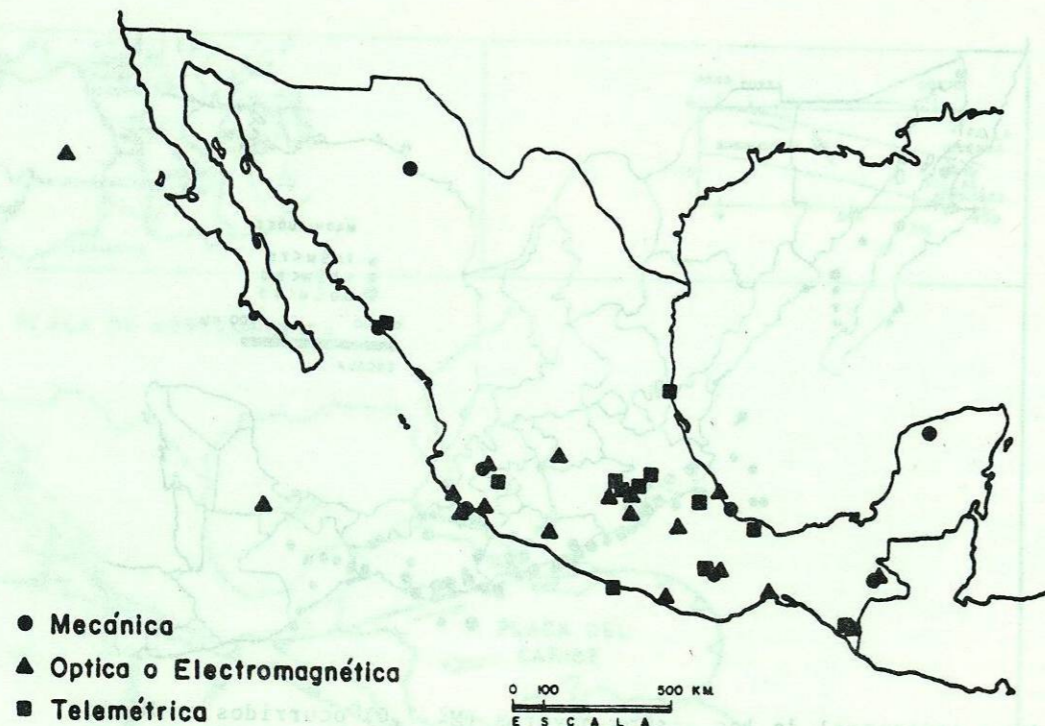


Fig. 4 Distribución actual de la red de observatorios sísmológicos del Instituto de Geofísica, UNAM. Aparentemente la red cubre la zona sísmica del sur del país; sin embargo, la diversidad y obsolescencia del instrumental no permiten asegurar un monitoreo confiable de la actividad sísmica de México.

7

Características de los sismos

7.1 Causas de los sismos

Muchos son los fenómenos que pueden dar origen a los sismos: la actividad volcánica, las explosiones, el colapso de los techos-de-cavernas, etcétera. Con mucho, los sismos más importantes desde el punto de vista de la ingeniería son de origen tectónico, es decir, los asociados con deformaciones a gran escala en la corteza de la tierra. La situación obedece a la frecuencia con que ocurren los sismos tectónicos, la energía que liberan y la extensión de las áreas que afectan.

Hay dudas en cuanto a los mecanismos que producen movimientos tectónicos. La teoría más favorecida sostiene que los sismos tectónicos son causados por deslizamientos a lo largo de fallas geológicas. En los sismos mayores tendría lugar una reacción en cadena a lo largo de toda la longitud del deslizamiento, pero en cualquier instante dado, el origen del sismo quedaría en un pequeño volumen de la corteza —prácticamente en un punto— y se desplazaría a lo largo de la falla. Sin embargo, algunos sísmólogos sostienen que los temblores se originan en los cambios de fase de las rocas, acompañados de cambio volumétricos, en volúmenes relativamente pequeños de la corteza (Evison, 1963 y 1967).¹ Los datos que existen son insuficientes para sostener cualquiera de las teorías, y es concebible que diferentes sismos tectónicos sean causados por más de un mecanismo.

Quienes favorecen la teoría del cambio de fase arguyen que es poco probable la presencia de fallas geológicas a profundidades mayores de unos cuantos cientos de kilómetros debido a las elevadas temperaturas y pre-

¹ Los cambios volumétricos de la roca que se necesitan para alcanzar una condición de equilibrio pueden deberse a cambios importantes en la compresión litostática, causada por migración, acercándose o alejándose la roca respecto a la superficie de la tierra, o pueden deberse a la aplicación o remoción de grandes cargas, como el peso de los glaciales y del agua en los vasos de almacenamiento.