

La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra: Los Grandes Terremotos en México

Héctor González Huizar

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

Resumen

Los sismos se encuentran entre los fenómenos naturales que causan más daño a los seres humanos. Tan sólo en el presente siglo alrededor de medio millón de personas a nivel mundial han muerto a causa de sismos. México es uno de los países que a sufrido terremotos de gran magnitud en años recientes, tanto en el norte como en el sur, los cuales han causado muertes y grandes daños materiales. En este artículo se presenta un breve resumen de los conceptos básicos necesarios para entender por qué ocurren los terremotos y se exploran las características de algunos terremotos relevantes ocurridos en México. El presente documento sirvió como guía de estudio a la Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra, efectuada en el CICESE.

La Olimpiada de Ciencias de la Tierra en su edición XXIV (<http://olimpiadas.ugm.org.mx>) se realizó el día 14 de junio del 2019 en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (CICESE) en Baja California, México. El tema de la Olimpiada fue “Los grandes terremotos en México”. Participaron 91 estudiantes de preparatorias públicas y privadas del Estado de Baja California. Los ganadores de la Olimpiada fueron: Primer lugar, Xania Lizeth Hernández Pérez, perteneciente al COBACH Plantel Tijuana Siglo XXI, asesorada por la maestra Gabriela de la Selva; segundo lugar Andrea López Márquez del CETMAR No. 11 de Ensenada, asesorada por el maestro Roberto Carlos Martínez Peralta y tercer lugar, Adrián Virgilio Padilla Mondragón del Bachillerato UNDL de Ensenada, asesorado por el maestro Sergio Pou. Además, dentro de los 10 primeros lugares también se encontraron estudiantes del Centro Educativo Patria (de Ensenada), la Preparatoria Xochicalco (campus Mexicali), y el Bachillerato Anáhuac (de Ensenada).

Abstract

Earthquakes are one of the natural phenomena that cause more damage to people. Only in the present century around a half million fatalities have occurred related to earthquakes worldwide. Mexico is one of the countries that has been hit by large magnitude earthquakes in recent years, from north to south, causing deaths and a large economic impact. This article presents a brief summary of basic concepts needed for understanding why earthquakes occur, and explores the characteristics of some relevant earthquakes occurred in Mexico. This document served as study guide for the XXIV Earth Science Olympiad, hosted at CICESE.

1. Introducción

Los sismos se encuentran entre los fenómenos naturales que causan más daño a los seres humanos. Desde el año 2000 a la fecha en que se elaboró este documento alrededor de medio millón de personas murieron a causa de sismos a nivel mundial. México se encuentra entre los países que han sido golpeados por sismos de

gran magnitud en los últimos años; por ejemplo, se estima que los sismos ocurridos en septiembre del 2017 al sur de México causaron la muerte de cerca de 500 personas y afectaciones por más de 2 mil millones de dólares (Capraro et al., 2018). Al norte del país también se han presentado sismos importantes en años recientes. En Baja California en el año 2010 un sismo de magnitud 7.2 ocurrió cerca de la ciudad de Mexicali, dando

como resultado la muerte de cuatro personas, cerca de un centenar de heridos, y cuantiosos daños materiales. En este trabajo se presentan algunos de los conceptos básicos de sismología necesarios para entender por qué ocurren terremotos en todo el mundo, y en particular en México. Además, se exploran algunas de las características de cinco eventos sísmicos ocurridos en México, que por su magnitud y efectos son relevantes. Los sismos no se pueden predecir, sin embargo, el estudio de las causas y efectos de sismos pasados nos provee de valiosa información que ayuda a entender mejor estos fenómenos naturales y a tomar las acciones necesarias para reducir el daño que causan a la sociedad.

El presente documento sirvió como base para la preparación de los estudiantes que participaron en la Olimpiada XXII de Ciencias de la Tierra organizada por la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Unión Geofísica Mexicana (UGM). Al final del documento se presentan las preguntas basadas en este temario que fueron añadidas al examen, así como algunos datos relacionados a la Olimpiada.

2. Conceptos Básicos De Sismología

¿Sismos, terremotos o temblores?

Seguramente alguna vez has escuchado que a un mismo evento se le llama sismo, terremoto y temblor, ¿pero cual es la diferencia?. La palabra “sismo” es de origen griego y la palabra “terremoto” de origen latino, sin embargo, ambas tienen el mismo significado: “movimiento de la tierra”. Científicamente hablando, estos términos significan lo mismo. De hecho, es más correcto llamarlos simplemente “sismos”. Un sismo es un rompimiento repentino de las rocas en el interior de la Tierra que resulta en una liberación de energía, la cual se propaga en forma de ondas

elásticas (conocidas como ondas sísmicas) que provocan el movimiento del suelo. La energía que se libera en un sismo es principalmente energía potencial elástica, similar a la que se acumula y se libera si lentamente comprimimos un resorte y luego lo soltamos rápidamente. Para entender el origen de esta energía es necesario entender que es la Tectónica de Placas.

Las Placas Tectónicas

La Tierra se formó aproximadamente hace 4,600 millones de años. Inicialmente pequeñas partículas transitando en el espacio en forma de gas eran atraídas entre sí por fuerzas electromagnéticas. Una vez que cúmulos de partículas alcanzaban ciertas dimensiones, eran atraídos entre sí por su fuerza gravitacional. Eventualmente, se fueron formando grandes cuerpos masivos, como asteroideos, y pequeños planetas primitivos, o protoplanetas los cuales también colisionaban entre sí, algunos de ellos finalmente dando forma a nuestro planeta. Factores como la rotación de la Tierra, su fuerza gravitacional interna, la emisión de energía por elementos radioactivos, así como las colisiones de asteroides en su superficie, dieron lugar a que lentamente el interior de la Tierra se fuera seccionando. La Tierra no es simplemente una roca sólida compuesta homogéneamente de los mismos materiales. En su interior está dividida en diferentes capas, que tienen diferente composición y propiedades físicas.

En el centro de nuestro planeta se encuentra una masa sólida conocida como el **“núcleo interno”**, compuesto mayormente de los elementos químicos hierro y níquel, y se estima que se encuentra a una temperatura de más de 5000°C. Rodeando el núcleo interno se encuentra una capa que es conocida como **“núcleo externo”**, que tiene una composición similar a la del núcleo interno, con la diferencia que en el núcleo externo estos elementos se encuentran en estado más o menos líquido, quizás algo similar

a la consistencia del hierro fundido. Luego, existe una gran zona conocida como **“manto”** que está principalmente compuesta de magma, es decir, roca fundida. La parte más profunda del manto se encuentra a una temperatura mucho mayor que en su parte más superficial. Esta diferencia en temperatura (de $\sim 2000^{\circ}\text{C}$) causa que el magma más profundo tienda a subir a través del manto. Una vez que esto sucede, este mismo magma enfriado tiende a sumergirse hacia la parte profunda del manto. Este proceso genera corrientes de magma conocidas como **“celdas de convección”**. La capa más superficial de la Tierra, que es la formada por la roca sólida con la que tenemos contacto en el fondo de los océanos y sobre los continentes, se conoce como **“corteza”**. Es una capa relativamente delgada. Ahora bien, aunque en su gran mayoría el manto se forma de magma parcialmente líquido, en su parte más superficial, es decir, justo por debajo de la corteza, se empieza a solidificar y a unir a la roca de la corteza, para así formar una sola capa sólida. A esta capa sólida, formada en su conjunto por la corteza, más la parte solidificada del manto, se le conoce como **“litósfera”**. La litósfera tiene en promedio un ancho de alrededor de 75 km por debajo el suelo de los océanos y de 125 km donde hay continentes (Figura 1).

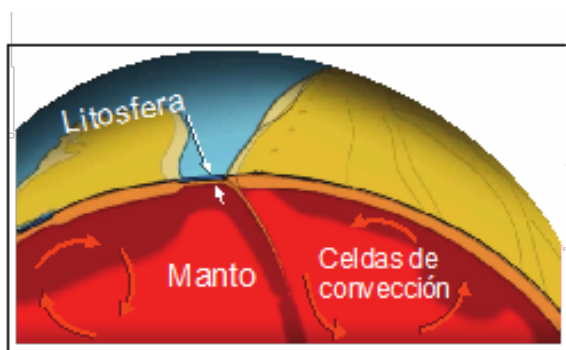


Figura 1. Sección transversal de la Tierra donde se muestra la litósfera (roca sólida) y el manto (magma parcialmente líquido). En el manto, la gran variación de la temperatura con la profundidad causa el flujo del magma, generando las celdas de convección.

La litósfera en sí misma no se forma de una sola pieza. Se divide en grandes fragmentos que se pueden mover en diferentes direcciones. Estos fragmentos se conocen como **“placas tectónicas”**. Es decir, las placas tectónicas son como las piezas de un gran rompecabezas que forman la litósfera. La Figura 2 muestra las principales placas tectónicas. Es importante notar que aunque algunas de las placas solo tienen en su superficie océanos (por ejemplo, la placa de Nazca), sobre otras placas se puede encontrar a la vez océanos y corteza continental. La placa Norteamérica, por ejemplo, sostiene en su superficie parte del océano Atlántico así como a algunos países del continente Americano (incluyendo México, Estados Unidos y Canadá) y algunos países de Asia (incluyendo partes de Rusia y de Japón). En general, las placas tectónicas que sostienen en su superficie mayormente océanos, conocidas como **placas oceánicas**, son mucho más densas y pesadas que las placas que sostienen mayormente continentes, a las cuales se les conoce como **placas continentales**.

¿Qué causa que se muevan las placas tectónicas? Se cree que las placas se mueven principalmente debido a las celdas de convección. Si consideramos cada placa como un barco flotando sobre el manto líquido, las celdas de convección serían como las corrientes que empujan a estos barcos en cierta dirección. Cabe mencionar que el magma no fluye en la misma dirección en todas las celdas. Note por ejemplo, en la Figura 1, que se representa una de las celdas como magma circulando en el sentido de las manecillas de un reloj, mientras que en la otra celda el magma circula en sentido contrario. Esto causa que las placas, que navegan empujadas por la corriente de estas celdas, también se muevan en diferentes direcciones. El movimiento de las placas tectónicas ocurre muy lentamente, en promedio entre 5 a 10 cm por año (cm/año). Sin embargo, puesto que este movimiento ha ocurrido por millones de años, las placas se han desplazado grandes distancias. Se sabe, por ejemplo, que el movimiento de las

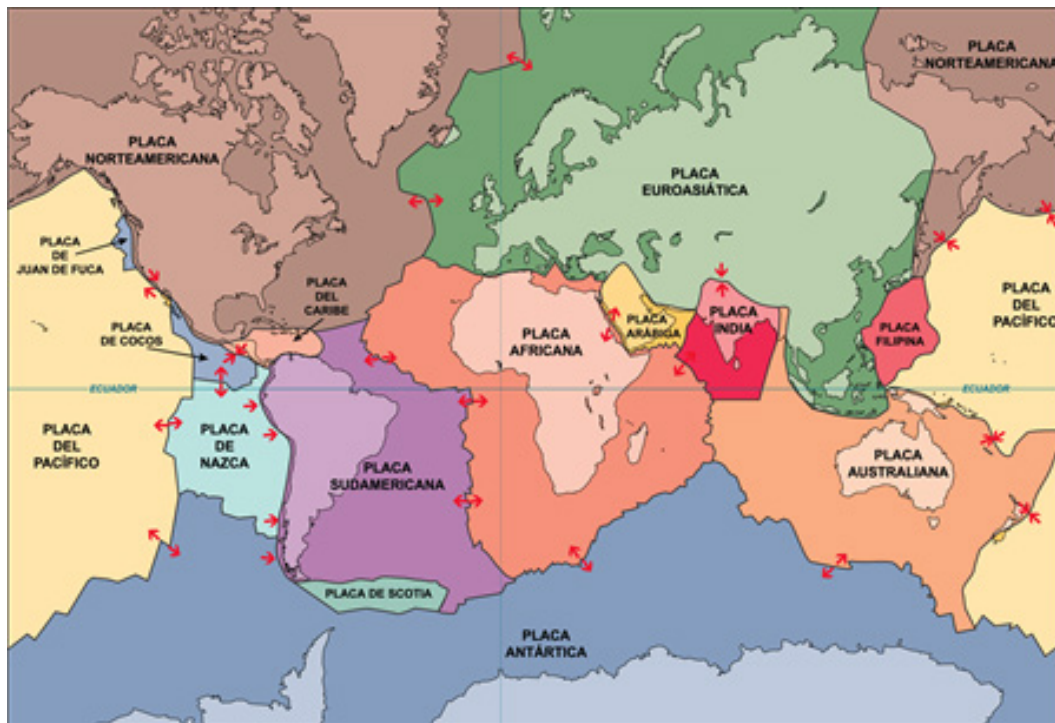


Figura 2. Principales placas tectónicas. Flechas rojas representan la dirección de movimiento relativo entre placas. Imagen modificada de: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>.

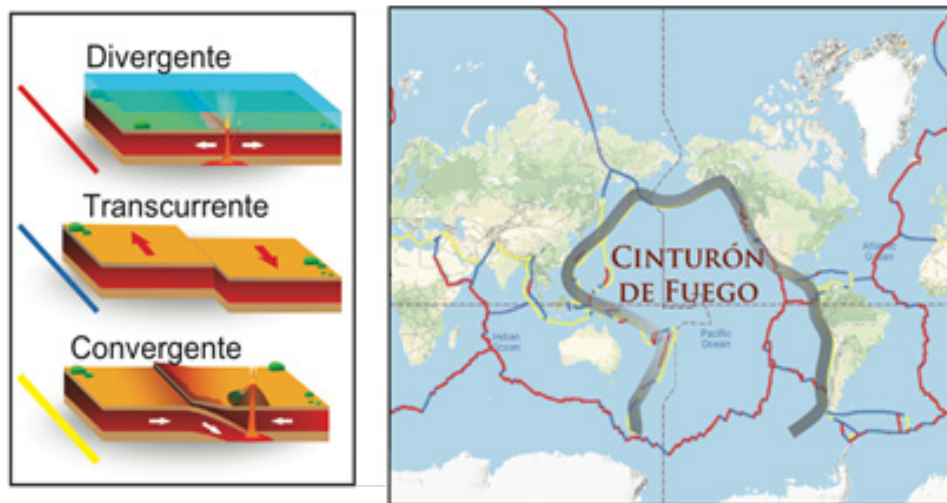


Figura 3. Los modelos muestran el movimiento relativo para los tres tipos de fronteras entre placas. El mapa muestra dónde ocurre cada tipo de frontera, de acuerdo a los colores definidos. El área gris representa el Cinturón de Fuego. Figura de modelos modificada de: <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.

placas tectónicas unió a todos los continentes en un mega continente llamado **"Pangea"** hace unos 300 millones de años, y que estos se empezaron a separar hace unos 200 millones de años, hasta llegar a su posición actual.

La dirección en que se mueve cada placa tectónica con relación a sus placas tectónicas vecinas es sumamente importante para los sismólogos, puesto que estas direcciones nos ayudan a estimar el peligro sísmico para cada

región en particular. La región entre dos placas tectónicas se conoce como **“frontera”** o **“límite”** entre placas. Se pueden definir **tres tipos de fronteras** según el movimiento relativo entre las placas: fronteras **“divergentes”**, **“convergentes”** y **“transcurrentes”** (Figura 3).

Fronteras Divergentes (de extensión). Son aquellas donde dos placas se mueven alejándose una de la otra. En este tipo de frontera, por el espacio que queda entre las dos placas, emerge magma desde el manto, el cual eventualmente se solidifica y se une a las placas que se están separando, y de esta forma se genera nueva litósfera. En estas regiones, las cuales usualmente se localizan en medio de los océanos, se pueden encontrar muchos volcanes submarinos, que conforman las zonas conocidas como **“dorsales oceánicas”**. Las dorsales son zonas elevadas sobre el piso oceánico que llegan a medir hasta 3 km sobre el nivel medio del suelo oceánico. Este tipo de frontera ocurre, por ejemplo, entre la placa Sudamericana y la placa Africana.

Fronteras Convergentes (de compresión). Son aquellas donde dos placas tectónicas chocan de frente. Este tipo de movimiento genera que se eleven grandes cordilleras de montañas, como los Himalaya, que son el resultado de la colisión entre la placa tectónica Euroasiática y la placa India. En los Himalaya se encuentra el **Monte Everest**, la montaña más alta del mundo, que alcanza casi 9 km de altura respecto al nivel del mar. Cuando la colisión ocurre entre una placa tectónica que sostiene continentes y una que sostiene océanos (la cual es más pesada), la placa oceánica se sumerge (o **subduce**) por debajo de la continental (que **cabalga**). A estas regiones se les conoce como **“zonas de subducción”**. Por ejemplo, la placa Nazca subduce por debajo de la placa Sudamericana. En general, en las zonas de subducción se forman volcanes sobre la placa cabalgante. Además, la gran deformación que ocurre entre placas crea depresiones muy profundas en los océanos, justo donde las placas

colisionan, conocidas como **“fosas oceánicas”**. Por ejemplo, donde se unen la placa Pacífico con la placa Filipina se forma la **“Fosa Oceánica de las Marianas”**, la cual es la parte más profunda conocida de los océanos en el mundo, llegando a una profundidad de cerca de 11 km. Se piensa que además de las celdas de convección, la fuerza de gravedad que se ejerce sobre la placa que se sumerge también contribuye al movimiento de ésta. En una zona de subducción, la placa que subduce eventualmente se deshidrata y funde parcialmente para formar magma y así forma parte del manto.

Fronteras Transcurrentes. En estas zonas una placa tiene un movimiento lateral una con respecto a la otra. Mientras que en las dorsales oceánicas (que son fronteras divergentes) se crea nueva litósfera y en las zonas de subducción (que son fronteras convergentes) se destruye litósfera, en las fronteras transcurrentes no ocurren ninguno de estos procesos. Como ejemplo, la falla de San Andrés forma parte la frontera transcurrente entre la placa Norteamérica y la placa Pacífico, donde esta última se mueve lateralmente hacia el noroeste con respecto a la primera.

Placas Tectónicas, Fallas Geológicas y Sismos

El movimiento de las placas tectónicas causa que estén sujetas a grandes esfuerzos y deformaciones, principalmente cerca de las fronteras. Estos esfuerzos causan la acumulación de energía, en fallas geológicas, que se libera en forma de sismos.

Los sismos ocurren en **“fallas geológicas”**, que son áreas que dividen dos bloques de roca. Un sismo puede iniciar en una falla ya existente, o bien, inicia con el rompimiento de la roca, formando una nueva falla. El sismo se genera cuando uno de los bloques se desliza súbitamente con respecto al otro, causando gran fricción a

lo largo de la falla. En algunos casos las fallas se pueden observar en la superficie, pero en otros casos existen solo por debajo de la superficie, y muchas veces sólo son identificadas una vez que generan sismos. A la parte de una falla que se puede observar en la superficie, que aparece comúnmente como una desnivelación en el suelo, se le conoce como **“escarpe de falla”**. Mientras más grande es la falla, mayor la magnitud del sismo que puede producir.

La mayoría de las fallas se encuentran dentro de las áreas que se consideran fronteras entre placas. De hecho, las fronteras entre placas no son siempre muy claras. Es difícil especificar exactamente el límite donde termina una placa y comienza la siguiente. En muchos casos, un grupo de fallas (y los sismos que generan), pueden ayudar a delimitar más claramente la frontera entre dos placas. Por ejemplo, la falla de San Andrés, en Estados Unidos, junto con otras fallas de menor tamaño, como la falla Imperial cerca de Mexicali, y las fallas dentro del Mar de Cortés, ayudan a delimitar la frontera entre las placas Norteamérica y Pacífico. A los sismos que

ocurren en fallas que se consideran ser parte de la frontera entre placas se les puede llamar sismos **“interplaca”**, es decir, que se localizan entre dos placas. Aunque la mayoría de las fallas se encuentran cerca de estas fronteras, algunas otras se encuentran lejos, por ejemplo, hacia dentro de los continentes. Del mismo modo, también existen fallas dentro de las placas que se mueven por debajo de otras. A los sismos generados por fallas relativamente lejos de las fronteras tectónicas se les puede llamar sismos **“intraplaca”**, es decir, que ocurren dentro de una placa tectónica.

La gran mayoría de los sismos que ocurren en nuestro planeta (cerca del 90%), así como los de mayor magnitud, son localizados a lo largo de la región conocida como el **“Cinturón de Fuego”** o **“Cinturón del Pacífico”** (Figura 3). Además, en esta área se localizan cerca del **75%** de los volcanes actualmente activos. El Cinturón de Fuego es una franja que se extiende alrededor del océano Pacífico, a lo largo de la cual se localizan un gran número de zonas de subducción, responsables de los volcanes y de los sismos de gran magnitud.

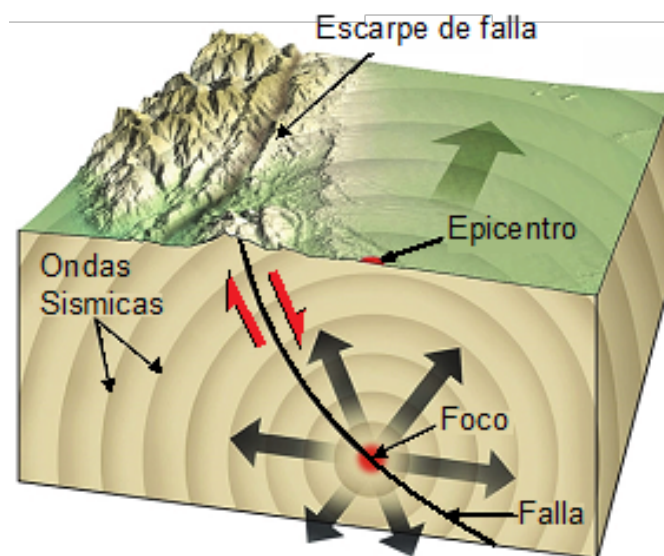


Figura 4. La imagen muestra una falla geológica y el escarpe que sobresale en la superficie. Las flechas de color rojo representan la dirección en la que se desplazan los bloques a cada lado de la falla, generando el sismo. Se muestra el epicentro del sismo y su relación con el foco. Las ondas sísmicas se propagan alejándose del foco. Imagen modificada de Tarbuck y Lutgens (2001).

Ondas Sísmicas y Localización de Sismos

Al punto en una falla donde un sismo se origina se le conoce como **“foco”** o **“hipocentro”**. Recordemos que los sismos se generan por un deslizamiento súbito en una falla. El foco es el punto donde este deslizamiento comienza. El **“epicentro”**, por otro lado, es el punto, sobre la superficie de la Tierra, justo por encima del foco. Si queremos definir la localización del epicentro de un sismo, es necesario conocer su latitud y longitud; mientras que para definir la localización del foco, es necesario conocer, además de su latitud y longitud, también su profundidad (Figura 4).

Una vez que ocurre el deslizamiento súbito en una falla, se generan vibraciones, que afectan a la roca y su alrededor, causando que también vibre. Estas vibraciones se van transmitiendo a suelo cada vez mas lejano, propagándose grandes distancias, hasta que finalmente se disipan. A estas vibraciones que se propagan a través del suelo es a lo que se le conoce como **“ondas sísmicas”**. La propagación de las ondas sísmicas es algo similar a lo que observamos cuando lanzamos una piedra en el agua. Las ondas de agua inician donde cae la piedra, se propagan y finalmente se disipan a cierta distancia. Sin embargo, mientras que estas ondas de agua durante un segundo se propagarían menos de un metro de distancia, las ondas sísmicas pueden viajar incluso más de 10 kilómetros por segundo. De hecho, las ondas sísmicas viajan por el suelo mucho más rápido que el sonido en el aire (aproximadamente a 0.34 km/s).

Un mismo sismo genera diferente tipos de ondas sísmicas, a continuación se describen brevemente los tres tipos más importantes. Las **“ondas P”** (también conocidas como **“ondas primarias”**) son las más veloces, y por lo tanto son las que llegan primero a cualquier lugar, de ahí su nombre. Por lo general este tipo de onda viaja a una velocidad de entre 4 a 7 kilómetros por segundo (km/s) en

la corteza, pero dentro del manto puede llegar a velocidades superiores a 12 km/s. Este tipo de onda causa compresiones y descompresiones de la roca por la que se propaga, por lo tanto las partículas individuales se mueven en dirección paralela a la dirección de propagación de la onda (Figura 5). Las **“ondas S”** (también conocidas como **“ondas secundarias”**) son un poco más lentas que las ondas P, por lo tanto, llegan a cualquier lugar en segundo puesto, después de las ondas P. Las ondas S tienen una velocidad de entre 3 y 4 km/s en la corteza, y pueden alcanzar más de 7 km/s dentro del manto. Las ondas S causan movimiento en dirección perpendicular a la dirección en la que se propaga la onda. Las ondas S tienen dificultad para propagarse en líquidos. La viscosidad y densidad del manto aún permite que las ondas S se propaguen a través de éste; sin embargo, en el núcleo externo las ondas S no se pueden propagar debido a que su consistencia es demasiado líquida. A las ondas P y S también se les conoce como **“ondas de cuerpo”** o **“internas”**, puesto que pueden viajar dentro del interior de la Tierra. Otro tipo de ondas sísmicas son las **“ondas superficiales”**. Las ondas superficiales son más lentas que las ondas P y S, y a diferencia de éstas, solo pueden propagarse cerca de la superficie de la Tierra, es decir, no pueden viajar muy profundo. Las ondas superficiales resultan de una combinación de movimientos en diferentes direcciones. Por ejemplo, pueden desplazar el suelo en un movimiento hacia delante y hacia atrás al mismo tiempo que hacia arriba y abajo, lo que resulta en un movimiento elíptico, similar al que causan las olas del mar en un pequeño barco (Figura 5). Frecuentemente, hemos escuchado que a los sismos se les clasifica como oscilatorios (movimiento lateral del suelo) o trepidatorios (movimiento vertical); sin embargo, el tipo de movimiento sentido va a depender de dónde y que tan lejos nos encontramos con respecto al foco del sismo. Es decir, un mismo sismo siempre genera ambos movimientos (laterales y verticales), puesto que se generan los tres tipos

de ondas (Figura 5), pero estos movimientos pueden ser percibidos con diferente intensidad, dependiendo de dónde nos encontramos.

Para los sismólogos es muy importante conocer a qué velocidades se propagan las ondas sísmicas a través de las diferentes capas y los diferentes materiales que forman nuestro planeta. Esa información permite, por ejemplo, localizar la fuente de los sismos cuando sus ondas sísmicas llegan a cierto lugar y son analizadas. Por ejemplo, una vez que se conoce a qué velocidad se propagan las ondas P y S, midiendo el tiempo que transcurre entre la llegada de la onda P y la llegada de la onda S a una estación sismológica, se puede calcular a qué distancia de la estación se encuentra el epicentro del sismo que generó estas ondas. Esta distancia se conoce como **“distancia epicentral”**. Si se registran los tiempos de arribo de las ondas P y S en al menos tres estaciones sismológicas y con esta información se calculan las distancias epicentrales para cada estación, entonces es posible usar la técnica conocida como **“triangulación”** para obtener la localización del epicentro. Para entender

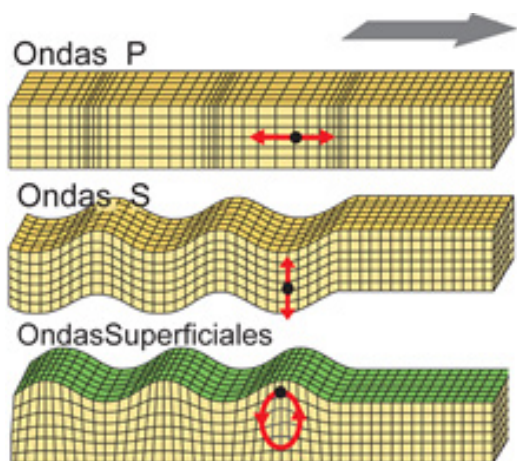


Figura 5. Representación del movimiento que causan los tres tipos de ondas sísmicas. La flecha de color gris representa la dirección en la que se propagan las ondas. Las flechas pequeñas de color rojo muestran la dirección en la que vibraría el suelo en cierto punto al paso de cada tipo de onda. Figura modificada de Bolt (1993).

mejor este método, te recomendamos leer el documento que se encuentra en: https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/cmo_son_localizados_los_terremotos.

Intensidad y Magnitud

Comúnmente después de que ocurre un sismo, en los medios de comunicación los términos intensidad y magnitud son usados erróneamente como sinónimos para describir qué tan grande fue el sismo. Sin embargo, estos términos representan dos cosas diferentes. La magnitud se utiliza para medir el tamaño del sismo, con base en la energía que libera, mientras que la intensidad es una descripción de los efectos causados por el sismo.

La **“intensidad”** se asigna en función de los daños o efectos causados en las personas y construcciones. Para un mismo sismo varios lugares pueden reportar diferentes intensidades dependiendo del daño causado en cada lugar. En general, mientras más alejado se encuentre un lugar del epicentro menor será el daño, y por lo tanto, menor la intensidad reportada para ese lugar. La escala más común para medir la intensidad se conoce como escala de **“Intensidades Modificada de Mercalli (MMI)”**, que se basa en cómo las personas perciben el sismo y el daño observable que causa en construcciones. Esta escala varía del 1 al 12, donde por ejemplo, un número 2 representa que se sintió el movimiento del suelo muy levemente sin causar daños notables en construcciones, mientras que un número 11 significa que el suelo se sacudió muy violentamente, destruyendo puentes y derrumbando la mayoría de las construcciones (Figura 6).

La **“Magnitud”** mide qué tan grande fue un sismo, con base en la energía que libera. A diferencia de la intensidad que depende de dónde se mide, a un sismo se le asigna un solo valor para definir su magnitud. Existen varias escalas para definir la

Escala Sísmica Modificada de Mercalli	
I. Imperceptible	Microsismo, detectado por instrumentos
II. Muy Leve	Sentido por algunas personas (generalmente en reposo)
III. Leve	Sentido por algunas personas dentro de edificios
IV. Moderado	Sentido por algunas personas fuera de edificios
V. Poco Fuerte	Sentido por casi todos
VI. Fuerte	Sentido por todos
VII. Muy Fuerte	Las construcciones sufren daño moderado
VIII. Destructivo	Daños considerables en estructuras
IX. Muy Destructivo	Daños graves y pánico general.
X. Desastroso	Destrucción en edificios bien contruidos
XI. Muy Desastroso	Casi nada queda en pie
XII. Catastrófico	Destrucción total

Figura 6. Escala de Intensidades Modificada de Mercalli (MMI). Figura tomada de Pin-Molina (2019).

magnitud de un sismo. Entre las más conocidas se encuentra la **“escala de Richter”**. Esta escala fue desarrollada en 1935 para medir sismos en el sur de California, y se basa en el tamaño de las ondas P y S registradas por un tipo en partícula de sismógrafo y a una distancia específica desde el epicentro. Esta escala ya no es comúnmente usada por los sismólogos, puesto que ya existen escalas mucho más generales y precisas. Una de estas escalas, particularmente útil para medir sismos grandes, es la que se conoce como **“Magnitud de Momento”** y se representa con las siglas **Mw**. La magnitud de momento es proporcional al desplazamiento que ocurrió sobre la falla que generó el sismo y al área (en el plano de la falla) que se deslizó. La magnitud se calcula a partir de las ondas sísmicas que se registran en estaciones sismológicas alrededor del mundo. Sin embargo, un sismo tiene solo un valor de magnitud, independientemente de donde se midan sus ondas. Es importante mencionar que las escalas de magnitud son escalas logarítmicas. El incremento de una unidad en la escala de magnitud es equivalente a un aumento de 10 veces la amplitud de las ondas registradas. Es decir, un sismo de magnitud 7 causa ondas sísmicas de 10 veces mayor amplitud que un sismo de magnitud 6. En términos de energía, el incremento de una unidad en la

escala de magnitud es equivalente a 32 veces de aumento en la energía liberada. Es decir, un sismo de magnitud 6 libera 32 veces más energía que uno de magnitud 7, y uno de magnitud 8 libera 32 veces más que uno de magnitud 7. Como referencia, un sismo de magnitud 6 libera aproximadamente la misma energía que se liberó por la bomba atómica en la ciudad japonesa de Hiroshima al final de la Segunda Guerra Mundial; por lo tanto, un sismo de magnitud 8 liberará la energía equivalente a aproximadamente 1024 (es decir, 32x32) bombas atómicas como la de Hiroshima.

El sismo más grande que ha sido registrado en el mundo ocurrió en **Chile en 1960**. Tuvo una magnitud de **9.5**. El sismo que ha causado más muertes en el presente siglo fue el ocurrido en **Sumatra en 2004**, de magnitud de **9.1**, el cual causó un gran tsunami, resultando en la muerte de cerca de 228 mil personas en 14 diferentes países. Otro sismo que causó un gran número de muertes ocurrió en **2010 en Haití**. Este sismo posiblemente causó la muerte de más de 200 mil personas, además de grandes pérdidas económicas que aún afectan a ese país, todo esto a pesar de que sólo fue de magnitud **7**. Por otro lado, el sismo que ha causado más daños económicos fue el ocurrido en **Japón en**

2011, de magnitud de **9.1**. Este sismo, junto con un gran tsunami que generó, causaron daños económicos de cerca de \$235,000 millones de dólares (Kajitani et al., 2013).

En general, un sismo de magnitud menor a 3 es casi imperceptible por las personas, mientras que uno de magnitud 4 puede ser sentido por alguien que se encuentre relativamente cerca de su epicentro. Los sismos de magnitud 5 son los que generalmente empiezan a causar daños ligeros en construcciones. Los sismos mayores que 7, si ocurren cerca de poblaciones, generalmente causan pérdidas de vidas y grandes daños materiales. Cada día ocurren miles de sismos alrededor del mundo, la gran mayoría son sismos pequeños e imperceptibles. Estadísticamente, se estima que alrededor del mundo cada año ocurren:

- ~1 millón de sismos de magnitud ≥ 2 ,
- ~1,500 sismos de magnitud ≥ 5 ,
- ~18 sismos de magnitud ≥ 7 ,
- ~1 sismo de magnitud ≥ 8 .

En la siguiente sección se describe la tectónica de México, así como algunos de los sismos ocurridos en México que por su magnitud y por el daño causado son relevantes.

3. Tectónica y Grandes Sismos en México

Tectónica en México

En México interactúan cinco placas tectónicas: las placas Norteamérica, Pacífico, Cocos, Caribe, y la pequeña placa Rivera (Figura 7). Las placas Rivera y Cocos se encuentran en el océano Pacífico, es decir, son placas oceánicas. La mayor

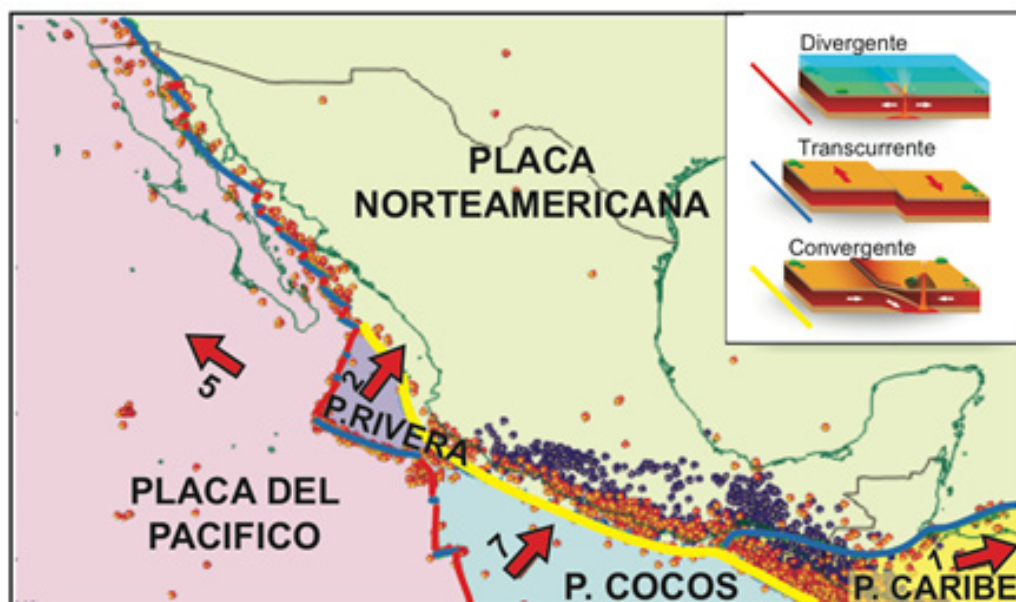


Figura 7. Mapa de las placas tectónicas que interactúan en México. Las flechas rojas representan la dirección de movimiento de cada placa con respecto a la placa de Norteamérica, y el número cerca de la flecha representa su velocidad en cm/año. Los colores de las fronteras entre placas corresponden al tipo de frontera (divergente, convergente o transcurrente) de acuerdo a los modelos en la esquina superior derecha. Los puntos representan epicentros de sismos. Mapa modificado de Kostoglodov y Pacheco (1999) y figura de modelos modificada de <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.

parte de México se encuentra sobre la placa Norteamérica, sin embargo, la península de Baja California se encuentra sobre la placa Pacífico, y una parte de Chiapas se encuentra sobre la placa Caribe.

Como se puede observar en la Figura 7, en México ocurren los tres tipos de frontera entre placas. La placa Pacífico se desplaza a una velocidad de aproximadamente 5 cm/año hacia el noroeste con respecto a la placa Norteamérica. Este proceso ha causado que la península de Baja California, junto con parte del estado de California, se separen lentamente del resto del continente, lo cual comenzó a ocurrir hace aproximadamente 12 millones de años (Espíndola y Pérez, 2018). Desde entonces, la península de Baja California se ha desplazado hacia el noroeste aproximadamente 330 km, dando espacio para el Mar de Cortés. La dirección de desplazamiento de la placa del Pacífico causa que la frontera entre esta placa y la placa Norteamérica sea mayormente del tipo transcurrente, especialmente hacia el norte; sin embargo, a lo largo del Mar de Cortés alternan fronteras del tipo transcurrente y divergente.

Las placas Cocos y Rivera se mueven hacia la placa Norteamérica a una velocidad de aproximadamente 7 cm/año y 2 cm/año, respectivamente. Esto causa que las placas Cocos y Rivera formen fronteras del tipo convergente con la de Norteamérica. Puesto que Cocos y Rivera son placas oceánicas, se sumergen por debajo de la placa Norteamérica formando zonas de subducción cerca de la costa. Gran parte de esta región se conoce como la **“Fosa Mesoamericana”**. Como en otras zonas de subducción, esto causa que se generen volcanes en la placa cabalgante, en este caso la placa de Norteamérica, y por eso existen muchos de los volcanes en el centro del México (incluyendo el Popocatepetl), a los que en su conjunto se les conoce como el **“Eje Neovolcánico Mexicano”** o **“Faja Volcánica Transmexicana”**. La frontera tectónica entre las placas Cocos Norteamérica

se considera como una de las más activas sísmicamente en el Mundo.

La placa Caribe se mueve hacia el este, a aproximadamente 1 cm/año con respecto a la placa Norteamérica. Esta placa contiene a la parte sur del estado de Chiapas, así como a los países de Centroamérica y a gran parte de las islas caribeñas. En general, la placa Caribe forma una frontera de tipo transcurrente con respecto a la placa Norteamérica, es decir, el movimiento es lateral, sin embargo, en ciertos fragmentos también existe divergencia (Kostoglodov y Pacheco, 1999). A lo largo de la frontera entre estas dos placas se forma un sistema de fallas conocido como **Polo chic-Motagua**.

Toda esta actividad tectónica causa que México sea uno de los países sísmicamente más activos en el mundo. Desde el año 1900, a la fecha en que se elaboró este documento, en México han ocurrido 84 sismos de magnitud ≥ 7 ; 4 de ellos fueron de magnitud ≥ 8 (Sismos Históricos de México, 2014). Usando estos números, podemos decir que, en promedio, cada 1.4 años ocurre un sismo de magnitud ≥ 7 en México. Aunque de muchos de los sismos no se conocen datos exactos, es posible que desde 1900 a la fecha, los sismos en México hayan cobrado más de 40,000 vidas. A continuación se describen algunos de los sismos más relevantes ocurridos en México.

Los Sismos y el Tsunami de 1787

En **1787** ocurrió una secuencia de cuatro sismos enormes al sur de México, entre los cuales quizás se encuentre el más grande ocurrido en México del que se tenga conocimiento. Estos ocurrieron los días 28, 29 y 30 de mayo, y 3 de junio, y fueron seguidos por un gran número de réplicas en los días posteriores. El primero coincidió con la celebración religiosa de San Sixto, por lo que se les conoce como **“Los Temblores de San Sixto”**. Los primeros sismógrafos se empezaron a desarrollar poco antes de 1900, por lo tanto,

en 1787 no existía la instrumentación necesaria para registrar las ondas sísmicas y así poder definir los epicentros y la magnitud de los sismos. Sin embargo, existen archivos históricos con descripciones y relatos que permiten conocer en qué lugares, qué tan fuerte, y por cuánto tiempo las personas sintieron que el suelo se sacudía (ver por ejemplo: Sismos Históricos de México, 2014). Además, existen archivos con descripciones de los daños ocurridos, por ejemplo, en iglesias, haciendas y palacios de gobierno. Con esta información se puede definir una intensidad para cada lugar de donde hay reportes. Luego, usando esas intensidades se puede estimar donde fue el epicentro, y más o menos qué magnitud debieron haber tenido los sismos. Para los temblores de San Sixto existen reportes de daños en las ciudades de Oaxaca, Puebla, Veracruz, Acapulco y la Ciudad de México, entre otras (Figura 8). Usando esta información se sabe que los sismos ocurrieron cerca de las costas de Oaxaca y Guerrero, por lo que probablemente están relacionados a la frontera convergente entre las placas Cocos y Norteamérica, así que se pueden catalogar como sismos interplaca. En cuanto a

la magnitud de cada sismo, no es muy clara. Las descripciones escritas sugieren que los cuatro sismos (o al menos los dos primeros y el cuarto) fueron sentidos como “igual de potentes”. Este tipo de secuencia no es tan común, puesto que usualmente en una secuencia primero ocurre un sismo de mayor tamaño, llamado **“sismo principal”**, y luego le siguen las **“réplicas”** de menor tamaño, cada vez más pequeñas conforme avanza el tiempo. Con base en las intensidades se cree que al menos uno de los cuatro sismos de 1787 tuvo una magnitud (M_w) de alrededor de **9.0**, lo que lo convierte en el sismo de mayor magnitud en México del que se tenga registro histórico. Otra característica importante es que el primero de los cuatro sismos generó un gran tsunami. De acuerdo a los testigos, el mar se alejó unos 5 km, dejando al descubierto “tierras de colores, peñascos y árboles submarinos” (Sismos Históricos de México, 2014), y luego regresó violentamente entrando casi 7 km tierra adentro, provocando la muerte de algunos pescadores y ganado. Este parece ser el tsunami más grande registrado México (Sismos Históricos de México, 2014).



Figura 8. Mapa muestra las intensidades, usando la escala de Intensidades Modificada de Mercalli (IMM), obtenidas a partir de información histórica, para diferentes ciudades después de los temblores de San Sixto. Datos obtenidos de: Sismos Históricos de México (2014).

El Sismo de Xalapa de 1920

Como se mencionó, la gran mayoría de los sismos ocurren entre dos placas tectónicas; sin embargo, también pueden ocurrir dentro ellas, es decir, ser sismos intraplaca, y causar mucho daño. Un ejemplo de esto es el sismo ocurrido cerca de la ciudad de Xalapa, Veracruz el 3 de enero de **1920**. Este sismo tuvo magnitud **6.4** y se originó dentro de la placa Norteamérica, aparentemente, en una falla que podría tener relación con la Faja Volcánica Transmexicana, donde existen varias fallas activas que han provocado sismos importantes en el pasado.

En Xalapa se registraron daños en construcciones por el movimiento propio del sismo (Figura 9); sin embargo, la verdadera catástrofe ocurrió debido a otros eventos inducidos por el mismo. El movimiento brusco provocó una avalancha de lodo sepultando varias poblaciones. Se calcula que en algunas partes el lodo alcanzó una profundidad de más de 60 metros (Flores y Camacho, 1922), matando a más de 400 personas. Además, el sismo también generó el nacimiento



Figura 9. Fotografía tomada en Xalapa, Veracruz, después del sismo de 1920. Imagen obtenida de Servicio Sismológico Nacional (2019).

de manantiales, derrumbes en montañas, inundaciones de lodo, y hundimientos de suelo. Se estima que todo ésto causó la muerte de alrededor de 650 personas. Esto lo convierte en el segundo evento sísmico que ha causado más muertes en México de que se tiene registro. La Figura 10 muestra la localización del epicentro de este sismo, junto con los epicentros de los otros sismos importantes ocurridos en México que se discuten en este documento.

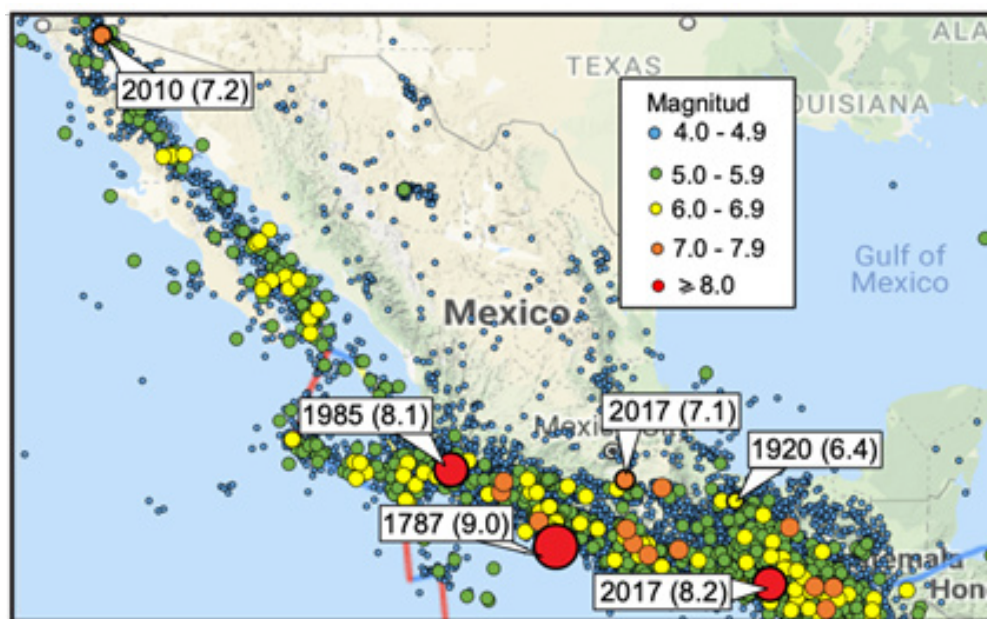


Figura 10. El mapa muestra los epicentros de sismos registrados en México desde 1900. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud. Están etiquetados con el año y la magnitud los sismos descritos en este documento (se incluye la posible localización del sismo de magnitud 9.0 de los terremotos de San Sixto de 1787

El Sismo de 1985

Definitivamente, el sismo que ha causado más muertes en México fue el ocurrido el **19 de septiembre de 1985** en las costas de Michoacán, de magnitud (Mw) **8.1** (Figura 11). Existe mucha controversia acerca de la cifra real de muertos pero el número de víctimas pudo haber alcanzado 40,000, principalmente en la Ciudad de México (<https://www.milenio.com/cultura/cuantos-muertos-causo-el-terremoto-de-1985>). Este sismo derrumbó cientos de edificios y casas, causando daños materiales calculados en unos \$8,000 millones de dólares (Najar, 2017) por lo que también es el sismo que ha causado más daño económico al país.

Este fue un sismo interplaca ocurrido en la zona de subducción en la frontera convergente entre las placas Norteamérica y Cocos, una de las fronteras entre placas más activas del mundo. Causó dos grandes réplicas, la primera un día después, de magnitud 7.5, y la segunda siete meses después, de magnitud 7.0.

A pesar de que el epicentro del sismo ocurrió a una distancia de más de 350 km de la Ciudad de México, ahí el suelo se sacudió fuertemente, alcanzando una intensidad (MMI) de 9. Estudios posteriores han mostrado que esto se debió

en gran parte a cómo responde el suelo de la Ciudad de México al paso de las ondas sísmicas. Esta ciudad se construyó sobre una isla en la mitad del antiguo Lago de Texcoco. La que se conoció como la Ciudad de México-Tenochtitlan se fue expandiendo sobre el lago, a través de chinampas, usadas para la agricultura y para ganar territorio a la superficie del lago. Gran parte de la actual Ciudad de México se encuentra sobre los restos de este antiguo lago, donde el subsuelo está formado por arcilla suave con un gran contenido de agua. En algunos lugares este material alcanza una profundidad de más de 30 metros. Este tipo de suelo, junto con la propia geometría del antiguo lago, causan que las ondas sísmicas se amplifiquen, además de que se genere un efecto de resonancia, lo que causa que el movimiento del suelo sea más brusco y dure por más tiempo. Estos efectos, conocidos como **“efectos de sitio”**, son los responsables de que ondas sísmicas puedan causar mucho daño al pasar por la Ciudad de México, incluso cuando estas ondas provienen de sismos con epicentros muy lejanos a la ciudad. En el caso del sismo de 1985, las ondas sísmicas tardaron en llegar desde el epicentro a la Ciudad de México alrededor de 2 minutos, y una vez que llegaron a la ciudad en algunos lugares la sacudida del suelo se sintió hasta por 4 minutos.



Figura 11. Fotografía del edificio Nuevo León de Tlatelolco, en que murieron entre 200 y 300 personas en el sismo de 1985. Imagen tomada de Najjar (2017).

Este sismo también generó un tsunami, el cual se observó en Manzanillo y Colima, y causó daños en las ciudades de Lázaro Cárdenas, Michoacán y en Zihuatanejo, Guerrero, con olas que alcanzaron los 3 metros de altura en esta última ciudad (Moreno, 1995).

El Sismo de Mexicali del 2010

Este sismo ocurrió el **4 de abril de 2010**, a las 3:40 pm tiempo local. El epicentro se localizó a unos 60 km al sureste de la ciudad de Mexicali, B.C., en una falla a lo largo de la sierra Cucupah y el cerro El Mayor, por lo que se le conoce como el **“Terremoto El Mayor-Cucupah”**, o de **“Easter Sunday (domingo de pascua)”** por la fecha en que ocurrió. Esta falla, junto con otras como la falla de Cerro Prieto y la Falla Imperial, forman un sistema de fallas que se puede considerar como la continuación de la Falla de San Andrés en California. Estas fallas están relacionadas al movimiento a lo largo de la frontera transcurrente entre las placas Norteamérica y Pacífico (Figura 7), por lo tanto se considera un sismo interplacas.

Este sismo causó un gran número de réplicas; tan sólo durante las 6 horas siguientes ya se habían registrado más de 90 réplicas. El sismo principal tuvo una magnitud (M_w) de **7.2**, y en algunos lugares se calcula que alcanzó una intensidad (MMI) de hasta 9 (Figura 12). El daño mayor se sufrió en las ciudades de Calexico, California y en Mexicali, B.C. donde se le asigna una intensidad (MMI) de 7. Este sismo causó la muerte de 4 personas y al menos 100 heridos en Mexicali, donde también se suscitaron varios incendios debido a la afectación en tuberías de gas. Además, el sismo causó que aguas subterráneas salieran a la superficie, inundando canales de irrigación. En Mexicali, uno de los principales hospitales de la ciudad sufrió daños por los que los pacientes tuvieron que ser transferidos a otros hospitales. El sismo también fue sentido claramente en ciudades como Ensenada, Tijuana, San Diego, e incluso en Los Ángeles, California (Figura 12). Además, se suscitó un derrumbe en la carretera que conecta las ciudades de Tijuana y Mexicali, causando graves problemas viales (Figura 13). Se estima que alrededor de 25,000 personas fueron afectas por este sismo.

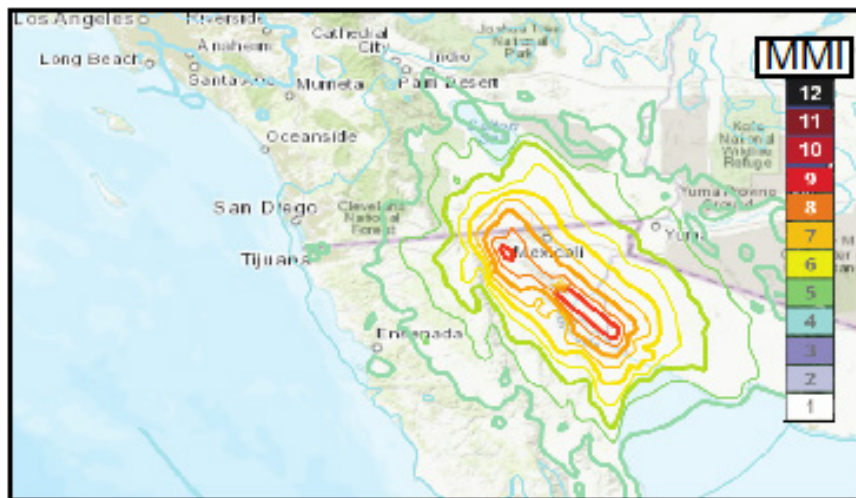


Figura 12. El mapa muestra las intensidades, usando la escala de Intensidades Modificadas de Mercalli (IMM), para el sismo de 2010. Mapa generado por el U.S. Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov>)



Figura 13. La imagen muestra el derrumbe de la carretera que conecta a las ciudades de Tijuana y Mexicali, B.C., causado por el sismo del 2010.

Los Dos Sismos en Septiembre del 2017

En septiembre del **2017** ocurrieron dos de los sismos que han causado más víctimas en nuestro país. El primero de estos ocurrió poco antes de la media noche del **7 de septiembre** y tuvo su epicentro cerca de las costas de Chiapas, con una magnitud (M_w) de **8.2** (Figura 10). Este fue el sismo de mayor magnitud registrado en México después de los Temblores de San Sixto de 1787. El sismo del 7 de septiembre ocurrió relativamente cerca de la frontera entre las placas Cocos y

Norteamérica, sin embargo, diversos estudios han mostrado que fue un sismo muy profundo (~ 70 km) que se generó como una ruptura dentro de la placa Cocos, en la parte que se encuentra ya por debajo de la placa Norteamérica. Por lo tanto, se considera un sismo intraplaca. El epicentro se localizó a unos 140 km de la ciudad de Pijijiapan, Chiapas, dentro del Golfo de Tehuantepec, por lo que se le conoce como el “sismo de Pijijiapan”, “**sismo de Tehuantepec**” o “sismo de Chiapas”. El sismo también generó un gran número de réplicas, incluyendo una de magnitud 6.1 el 23 de septiembre. El sismo principal causó al menos 100 muertos y 900 heridos, principalmente en los estados de Chiapas y Oaxaca (Figura 14). Además, originó un tsunami que causó olas de hasta 3 metros de altura en las costas de Chiapas. Este sismo fue tan grande que incluso causó afectaciones en Guatemala, El Salvador y Honduras.

El sismo del 7 de septiembre fue sentido en la Ciudad de México, donde incluso activó la alerta sísmica, causando la evacuación de cientos de personas de sus casas, afortunadamente sin causar víctimas. Sin embargo, tan solo 12 días después, el **19 de septiembre**, un sismo de magnitud (M_w) **7.1** sacudió fuertemente la



Figura 14. Fotografías muestran el daño causado por el sismo del 7 de septiembre en el estado de Oaxaca. Fotografías tomadas el 12 de noviembre del 2017.

Ciudad de México. Este sismo, al igual que el del 7 de septiembre, parece ser el resultado de una ruptura dentro de la placa Cocos, por lo que también es un sismo intraplaca. A diferencia del sismo del 7 de septiembre, el del 19 de septiembre ocurrió muy cerca de la ciudad de México (Figura 10), casi por debajo de esta ciudad, por lo que se sintió con una gran intensidad, causando que el suelo se sacudiera fuertemente por cerca de 20 segundos. El sismo causó la muerte de 370 personas y la caída de cerca de 40 edificios. Este es el sismo que ha causado más muertes en la Ciudad de México después del de 1985.

Es curioso que el sismo del 19 de septiembre del 2017 haya ocurrido en la misma fecha que el de 1985. Sin embargo, gracias al estudio de grandes bases de datos de sismos recientes e históricos, los sismólogos estamos seguros que no hay nada en particular en esa fecha, o en ninguna otra, que sugiera que los sismos son más probables de ocurrir en cierto día. Es decir, ambos ocurrieron un 19 de septiembre simplemente por casualidad.

Como ya se mencionó, México es uno de los países del mundo donde ocurren más sismos y de los de mayor tamaño, y aunque “los sismos no se pueden predecir”, los científicos en México y en el mundo estamos haciendo un gran trabajo para entender dónde es más probable que ocurran, de qué tamaño pueden ser, y qué efecto pueden tener en nuestras ciudades. Por otro lado, es responsabilidad de las autoridades y de los ciudadanos entender cuál es el riesgo de que ocurra un gran terremoto en sus ciudades, y tomar las medidas necesarias para reducir los daños si se presenta la ocasión.

4. Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra. Problemas

Los participantes tomaron un examen que contenía un total de 100 preguntas de opción múltiple, de las cuales 70 fueron basadas en los temarios de las tres ediciones pasadas de la

Olimpiada, es decir, en las ediciones de los años 2016, 2017 y 2018, cuyos temas fueron “Energía”, “El Cosmos y Nuestro Planeta” y “Erupciones Volcánicas”, respectivamente. El examen también contenía 30 preguntas basadas en el presente documento, las cuales se presentan a continuación

1. ¿Aproximadamente hace cuánto tiempo se formó el planeta Tierra?
 - a) 2,019 años
 - b) 4,600 años
 - c) 4,600 millones de años
 - d) 60,000 millones de años
2. ¿Cuál de las siguientes capas de la Tierra está compuesta principalmente de magma?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) manto
 - d) corteza
3. ¿Cuál de las siguientes capas de la Tierra está compuesta principalmente de hierro y níquel en estado más o menos líquido (similar a hierro fundido)?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) manto
 - d) corteza
4. ¿La litósfera se forma de la parte superior solidificada del manto y de qué otra capa de la Tierra?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) atmósfera
 - d) corteza
5. ¿Qué es lo que se piensa causa el movimiento de las placas tectónicas?
 - a) la rotación de la Tierra
 - b) la traslación de la Tierra
 - c) la rotación del núcleo interno
 - d) las celdas de convección

6. ¿Qué nombre se le conoce al mega continente que se formó de todos los presentes continentes hace unos 300 millones de años?

- a) Mega América
- b) Pangea
- c) Litósfera
- d) Continente tectónico

7. ¿Cuál es ancho promedio de la litósfera por debajo del suelo oceánico?

- a) 7 km
- b) 25 km
- c) 75 km
- d) 125 km

8. ¿Cuál es el ancho promedio de la litósfera por debajo de los continentes?

- a) 7 km
- b) 25 km
- c) 75 km
- d) 125 km

9. En este tipo de frontera entre placas tectónicas una placa se mueve lateralmente con respecto a la otra.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

10. En este tipo de frontera entre placas tectónicas una placa se mueve alejándose de la otra, y nueva litósfera se forma entre ellas.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

11. En este tipo de frontera entre placas tectónicas las placas chocan de frente.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

12. En este tipo de frontera entre placas tectónicas se forman las dorsales oceánicas.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

13. En este tipo de frontera entre placas tectónicas se forman las zonas de subducción.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

14. ¿Aproximadamente qué porcentaje de los sismos del todo los planetas ocurren alrededor del Cinturón de Fuego (del Pacífico)?

- a) 30 %
- b) 50 %
- c) 60 %
- d) 90 %

15. ¿En general a qué velocidad viajan las ondas sísmicas “P” en la corteza?

- a) entre 1 y 2 km/s
- b) entre 3 y 4 km/s
- c) entre 4 y 7 km/s
- d) entre 7 y 10 km/s

16. ¿En general a qué velocidad viajan las ondas sísmicas “S” en la corteza?

- a) entre 1 y 2 km/s
- b) entre 3 y 4 km/s
- c) entre 4 y 7 km/s
- d) entre 7 y 10 km/s

17. Un sismo de magnitud 8 liberará aproximadamente la misma energía que:

- a) 10 sismos de magnitud 7
- b) 32 sismos de magnitud 6
- c) 10 sismos de magnitud 5
- d) 32 sismos de magnitud 7

18. ¿Aproximadamente a qué velocidad se mueve la placa del Pacífico con respecto a la placa Norteamérica?

- a) 1 cm/año
- b) 2 cm/año
- c) 5 cm/año
- d) 7 cm/año

19. ¿Aproximadamente a qué velocidad se mueve la placa Cocos con respecto a la placa Norteamérica?

- a) 1 cm/año
- b) 2 cm/año
- c) 5 cm/año
- d) 7 cm/año

20. ¿Qué tipo de frontera entre placas existe entre la placa Norteamérica y la placa Cocos?

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

21. ¿Aproximadamente qué distancia se ha desplazado hacia el noroeste la península de Baja California con respecto al resto de México desde que se empezó a separar, hace unos 12 millones de años?

- a) 300 km
- b) 500 km
- c) 900 km
- d) 1000 km

22. ¿Cuál de los siguientes sismos ha causado más muertes en México del que se tenga registro histórico?

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

23. ¿Cuál de los siguientes sismos se considera que fue el de mayor magnitud en México del que se tenga registro histórico?

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

24. ¿Cuál de los siguientes sismos se considera que fue el segundo que ha causado más muertes en México? La mayoría de estas muertes fueron causadas por una avalancha de lodo.

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

25. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido cerca de Mexicali en 2010 de magnitud 7.2?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

26. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido en Xalapa, Veracruz en 1920 de magnitud 6.4?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

27. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido en México en 1985 de magnitud 8.1?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

28. ¿Qué tipo de sismo fueron los ocurridos en México en 2017 de magnitudes 7.1 y 8.2?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

29. ¿Qué tipo de sismo se cree que fueron los temblores de San Sixto de 1787?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

30. ¿De qué magnitud fue el sismo conocido como “El Mayor-Cuapah” del 2010?

- a) 5.0
- b) 6.2
- c) 7.2
- d) 8.2

Referencias

Bolt A.B. (1993), *Earthquakes*: New York, W. H. Freeman, p. 33.

Capraro, S., S. Ortiz, R. Valencia (2018), Los efectos económicos de los sismos de septiembre, *Economía Informal*, 408, pp.16-33.

Espindola, V.H. y X. Pérez (2018), ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden?, *Ciencia*, v. 69, n. 3, pp. 8-15.

Flores T., H. Camacho. (1922). “Terremoto Mexicano del 3 de enero de 1920”, *Boletín* 38, Instituto Geológico Mexicano.

Kajitani, Y., S.E. Chang, M.EERI, H. Tatano (2013), Economic Impacts of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami. *Earthquake Spectra*: March 2013, Vol. 29, No. S1, pp. S457-S478.

Kostoglodov, V. y J. F. Pacheco (1999), “Cien años de sismicidad en México”, Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <<http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Moreno J.M. (1995), The 1985 Mexico earthquake, *Geofís. Colombiana*, n.3, pp 5-19.

Najar, A. (2017), Terremoto de 1985: el devastador sismo que cambió para siempre el rostro de la Ciudad de México. BBC Mundo News. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150917_mexico_sismo_antes_despues_fotos_an>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Pin-Molina, J.A. (2019), ¿Cómo se mide un Terremoto?, Siemicknowledge, <<http://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/tag/escala-de-mercalli>>, Consultado el 10 de mayo de 2019.

Tarback, E., F. Lutgens (2001), *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*, 6 ed., p. 540. Prentice Hall, Madrid España.

Otros sitios de Internet referidos:

¿Cuántos muertos causó el terremoto de 1985?. Milenio. <<https://www.milenio.com/cultura/cuantos-muertos-causo-el-terremoto-de-1985>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica de la UNAM, <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/1920/SSNMX_rep_his_19200103_xalapa_M64.pdf>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Sismos Históricos de México. Instituto de Geofísica de la UNAM (2014) <<http://www.sismoshistoricos.org/>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

XXIV Olimpiadas Estatal de Ciencias de la Tierra. Unión Geofísica Mexicana, <<http://olimpiadas.ugm.org.mx>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Recibido: 4 de septiembre de 2010

Corregido por el autor: 2 de octubre de 2019

Aceptación: 5 de octubre de 2019