

ARTÍCULOS

La fosa mesoamericana: frecuencia sísmica y caracterización geomorfológica básica

The mesoamerican trench: seismic activity and its basic geomorphological characterization

Fidel Martínez García

ORCID: 0000-0001-7567-7161, fmg1376@yahoo.com.mx

Centro de Anteproyectos del Pacífico Sur (CAPS), Comisión Federal de Electricidad (CFE)

Recepción: 25/03/25. Aceptación: 22/10/25. Publicación: 17/06/26

RESUMEN

Este manuscrito ofrece un panorama actual sobre las características geomorfológicas de la fosa mesoamericana y su posible relación con la sismicidad local. Se analizan los avances en tecnología de teledetección para mapear y estudiar los fondos marinos; la importancia de la cooperación internacional para generar bases batimétricas globales en el estudio de las zonas de subducción mediante la interpretación geomorfológica, y la interacción geomorfológica entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana. Se subraya la necesidad de un compromiso global para el uso sostenible de los océanos e investigaciones científicas que exploren la relación entre la geomorfología marina y la actividad sísmica a partir del uso de bases batimétricas más detalladas.

PALABRAS CLAVE

caracterización geomorfológica, sismos interplaca, sismos intraplaca, fosa mesoamericana, placa de Cocos

ABSTRACT

This manuscript offers an overview of the current knowledge about the geomorphological characteristics of the Mesoamerican Trench and its possible relationship with local seismicity. Advances in remote sensing technology for mapping and studying the seabed, the importance of international cooperation in generating global bathymetric databases for the study of subduction zones through geomorphological interpretation, and the geomorphological interaction between the Cocos plate and the North American plate. The need for a global commitment to the sustainable use of the oceans and the development of scientific research exploring the relationship between marine geomorphology and seismic activity using more detailed bathymetric databases is underlined.

KEYWORDS

geomorphological characterization, interplate earthquakes, intraplate earthquakes, mesoamerican trench, Cocos plate

Introducción

En términos de riesgo sísmico, en un rango de 350 km a la redonda, la Ciudad de México (CDMX) es una de las megalópolis mexicanas que más efectos negativos ha tenido entre su población y construcciones por la actividad sísmica. Lo anterior se sustenta en el hecho de que, a lo largo de 2024 en el territorio nacional, ocurrieron 1,970 sismos significativos de magnitud superior a 4 MW, y varios de ellos dejaron sentir sus efectos negativos en esta ciudad (EarthquakeList.org, sf). Por su cercanía a la CDMX, en ese rango de distancia también se encuentran involucradas las ciudades de Cuernavaca, Puebla y Toluca.

De acuerdo con las estadísticas de la Earthquake List, el territorio mexicano ocupa el segundo lugar a nivel mundial en lo referente a la frecuencia sísmica, sólo desplazado por Indonesia; el tercero y el cuarto lugar le corresponden a Chile y Filipinas (figura 1, p. 3). Estos países tienen en común su cercanía con una zona de subducción o región donde la placa oceánica se hunde bajo la placa continental, un proceso tectónico causante de importantes terremotos. El 22 de mayo de 1960, en la falla de Valdivia, localizada en la zona de subducción del centro-sur de Chile, se presentó el evento más grande registrado con instrumentos. Tuvo una magnitud de 9.5 MW. Cincuenta años después, en 2010, la misma falla presentó una nueva ruptura que ocasionó un terremoto de 8.8 MW (Dzierma et al., 2012).

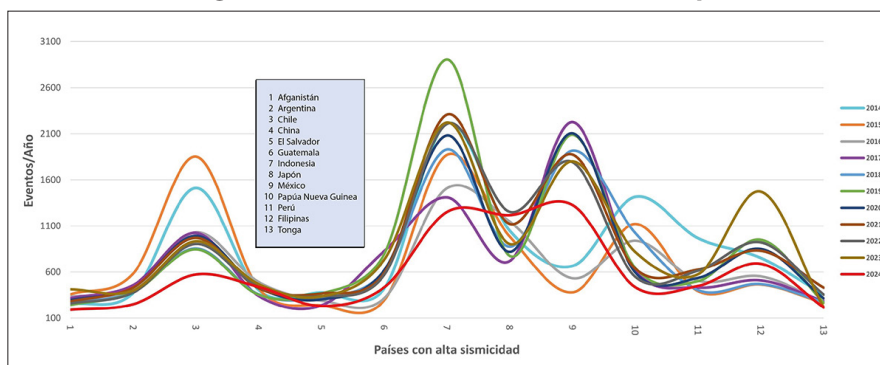
Coincidencia o azar: un recuerdo imborrable

En la época moderna permanecen en la memoria de los mexicanos los sismos de 1985 (8.1 MW) y 2017 (7.1 MW), eventos que, coincidentemente, ocurrieron un 19 de septiembre, pero con 32 años de diferencia entre ambos. El sismo de 1985 ocurrió 45 km al noroeste de La Mira, en las costas de Michoacán, a una profundidad de 15 km. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el sismo de 2017 se presentó a ocho km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, a una profundidad de 57 km (Astiz et al., 1987; SSN, 2017).

Esta condición desfavorable se debe primordialmente al proceso de subducción asociado a la fosa mesoamericana (MAT, por sus siglas en inglés). Ésta se localiza en la costa del Pacífico mexicano, y está dividida por la cordillera de Tehuantepec en la Trinchera de Acapulco, al sur de México, y la Trinchera de Guatemala, al sur de Centroamérica. En este lugar convergen la placa norteamericana (PNA) y la placa oceánica de Cocos (PC), consideradas las formaciones tectónicas más importantes y peligrosas de México (Yamamoto et al., 2013), ya que la oposición entre ellas es la responsable de la alta sismicidad en el centro, sur y sureste del territorio mexicano.

La morfología de la MAT corresponde a una trinchera abismal o fosa monumental localizada a 70 km de la costa, con 5,600 m de profundidad en promedio. Corre paralela al litoral desde Jalisco hasta Chiapas, pero continúa hasta Centroamérica dentro del océano Pacífico (figura 2, p. 4).

Figura 1
Ranking mundial de la frecuencia sísmica entre países



Fuente: elaboración propia.

A pesar de las coincidencias en fechas, los eventos sísmicos de 1985 y 2017 tienen sus particularidades y, estadísticamente, de ninguna forma indican una tendencia a la actividad sísmica para algún mes en particular, si bien esto no es del todo descartable (Allier Montaña, 2018; Singh et al., 2023). El evento de 1985 fue un sismo interplaca (entre las placas PNA y PC) que liberó 32 veces más energía que el de 2017, pero su epicentro estuvo a 400 km de la CDMX, en las costas de Michoacán (Martínez-García, 2019; Stone et al., 1987).

Este sismo es considerado el movimiento terrestre más catastrófico en la historia reciente de México e implantó un hito en la historia sismológica del país. La distancia que las ondas sísmicas recorrieron desde el epicentro en las costas michoacanas también ha sido considerada atípica, y evidenció el insuficiente conocimiento acumulado hasta entonces sobre el tema (Astiz et al., 1987; García-Acosta, 2004). Este suceso derribó edificios emblemáticos de la CDMX y dejó un número de víctimas incierto, si bien se han manejado cifras fluctuantes, locales e internacionales, entre dos mil y cuarenta mil decesos (Allier Montaña, 2018).

Por su parte, el terremoto de 2017 fue un evento intraplaca, es decir, ocurrió al interior de la placa oceánica de Cocos, que es subducida por la placa norteamericana. Es considerado el terremoto que ha ocurrido más cerca de la capital del país y ha sido calificado como el segundo más destructivo en el centro del territorio nacional. El epicentro se localizó a 110 km al sureste de la CDMX, es decir, que la ciudad quedó muy cerca de él. Sin embargo, la intensidad de las ondas sísmicas fue bastante débil debido a la trayectoria (directividad) con la que irradió la ruptura (dirección noreste), lo que limitó sustancialmente los daños a la infraestructura urbana (alrededor de 20%), no así para los estados de Morelos y Puebla (Arroyo et al., 2020; SSN, 2017).

El evento de 2017 ocurrió absurdamente dos horas con catorce minutos y cuarenta segundos después de haberse celebrado un simulacro nacional para recordar el terremoto de 1985, exactamente a las 13:14:40, también un 19 de septiembre. Fue un movimiento telúrico

Figura 2
Morfología regional de la franja de convergencia entre la placa de Cocos y la placa norteamericana



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth (Blue Marble Geographics, 2022; Google LLC, 2024).

sorpresivo que se dejó sentir en la CDMX y que causó daños sobre todo al sur de la ciudad. En un inicio se reportó la cifra de 115,220 viviendas afectadas en diversos estados del centro, sur y sureste del país; pero más tarde la Presidencia de la República dio cifras oficiales de 180,731 hogares afectados, de los cuales un 28% presentaba daño total. A pesar de su severidad, sólo un 4.5% de las edificaciones al sur de la CDMX, de entre dos y ocho pisos de altura, resultaron afectadas, pero se reportaron 228 personas fallecidas. Los estados del sur y sureste del país, como Morelos, Puebla y Chiapas, reportaron afectaciones en el 89% de este tipo de viviendas (Allier Montaño, 2018).

Al parecer la combinación de factores, como la trayectoria de la ruptura (directividad) y las placas tectónicas fragmentadas (Yamamoto et al., 2013; Singh et al., 2023), actuó a favor de la CDMX y los estados de México y Tlaxcala, pese a su cercanía con el epicentro; no así para las regiones sur y sureste de México, donde las ondas sísmicas se dejaron sentir con mayor intensidad. Y una vez más, aunque parezca absurdo o ilógico, pero científicamente explicable, cinco años después, también un 19 de septiembre pero de 2022, un sismo interplaca de 7.6 Mw ocurrió en la celebración de un nuevo aniversario de la tragedia de 1985, pero esta vez

45 minutos después del simulacro nacional (Singh et al., 2023). Por fortuna, factores como la lejanía del epicentro, una ruptura de falla (directividad) con trayectoria noroeste de tipo inversa y las barreras geográficas desempeñaron nuevamente un papel fundamental en la atenuación de daños y pérdidas humanas (Martínez García, 2022; Singh et al., 2023). Además, la alerta sísmica advirtió segundos antes del evento (SSN, 2022).

Sin duda, al ocurrir un sismo, la directividad es un factor notable que condiciona de forma sustancial la severidad de las ondas sísmicas al momento en que se inicia una ruptura. Éstas se propagan al frente de la zona de fractura generando movimientos del suelo más intensos, cuya aceleración en los primeros segundos es cercana a la velocidad de la onda de corte, capaz de causar daños significativos en edificaciones, ya que concentra un gran pulso de movimiento hacia el frente de la dirección de la fractura.

Esta energía deforma el suelo produciendo fallas, grietas y licuefacción, con el consecuente desplazamiento de estructuras de sustentación, lo que deriva en la inclinación y el colapso de construcciones, así como el daño de la infraestructura subterránea. En resumen, en los primeros segundos al momento de la fractura, “por varios kilómetros, el suelo al frente de las ondas sísmicas se desplaza frenéticamente, de lado a lado o hacia arriba y hacia abajo. En suma, el sismo es más destructivo considerando la cercanía al epicentro y la dirección en la que se mueve la fractura, como fue el caso del evento del 2017” (Donahue et al., 2019).

En términos estadísticos, en una proporción de 1/30, los sismos intraplaca son menos frecuentes que los sismos interplaca, pero son más destructivos, fundamentalmente porque:

- La placa está menos fracturada y acumula energía durante más tiempo.
- En zonas alejadas de los límites de placas, la población y las autoridades no esperan sismos.
- La infraestructura es menos resistente, por lo regular se carece de protocolos de emergencia y hay menos conciencia pública de los sismos.
- En la placa continental es mayor la propagación de las ondas sísmicas que en un sismo similar en un borde de placa.

Sin duda, el sismo de 1985 fue un parteaguas en términos de prevención de sismos, ya que dio la pauta para el diseño de medidas de construcción más seguras y una cultura de los sismos, además de crear conciencia y preparación en la sociedad para enfrentar los terremotos y otros fenómenos naturales afines.

En términos simples, un *sismo interplaca* refiere a un evento que ocurre por el roce o fricción que se produce por la interacción entre dos placas tectónicas; el *sismo intraplaca* se caracteriza por un rompimiento (falla) o fractura que ocurre en una placa y se asocia mayormente a la placa que subduce, flexiona o dobla en dirección al manto terrestre debido a su peso. Existe un tercer tipo denominado *sismo cortical*, que se refiere a eventos superficiales

que son el resultado de las deformaciones y esfuerzos en la placa continental, regularmente por la influencia que ejerce la zona de subducción colindante.

Genealogía de la zona de subducción mesoamericana

La historia geológica entre la placa de Cocos y la MAT se sitúa a casi 33 millones de años, durante el Oligoceno tardío. Desde entonces ha pasado por una serie de cambios que han influido en la vulcanidad y sismicidad en el territorio mexicano. Esta interacción tectónica ha manifestado una migración y transformación por al menos veinticinco millones de años, desde la costa del oceano Pacífico hasta el golfo de México, dejando a su paso huellas externas en la placa norteamericana mediante volcanes activos e inactivos (Kim et al., 2010; Pérez-Campos et al., 2008).

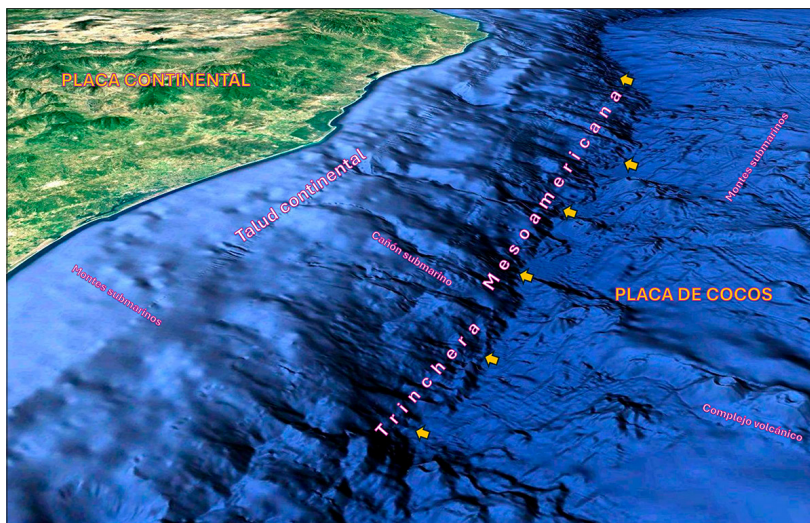
La evidencia actual de este desplazamiento es patente por la presencia de volcanes, como el Volcán de Fuego en Colima; el Parícutín en Michoacán; el Xinantécatl en Toluca; el Popocatepetl en los límites de México, Morelos y Puebla, y el Chichonal y el Tacaná en Chiapas, que dan forma a un arco volcánico conocido como Cinturón Volcánico Transmexicano o Eje Neovolcánico (Milenio Digital, 2023).

La MAT es, en términos de extensión, la más importante en el territorio mexicano y es la responsable del 80% de la sismicidad (figura 2, p. 4). La región donde se asienta tiene una antigüedad de al menos veinticinco millones de años y llegó a su actual configuración espacial hace aproximadamente seis millones de años como consecuencia de por lo menos tres procesos de modificación (Pardo y Suárez, 1995).

En el Mioceno temprano, un centro de expansión o crecimiento espacial de la placa oceánica original surge con la fragmentación de una gran placa llamada el Farallón. Ésta se fragmentó en las microplacas de Magdalena y Guadalupe, y es esta última la que da origen a dos segmentos: la placa de Rivera y la placa de Cocos, ubicadas al este de la dorsal del Pacífico oriental (Boschman et al., 2018; Lonsdale, 2005; Pardo y Suárez, 1995).

La migración y transformación de la placa de Cocos es perpetua a escala humana y se subduce en la MAT con dirección noreste, en forma oblicua, a una tasa de 4.8 a 7.5 cm/año, con grandes variaciones contiguas en la edad y el desnivel de la placa (Dougherty y Clayton, 2014; Pérez-Campos et al., 2008) (figura 2, p. 4). De acuerdo con su transformación temporal en millones de años, la placa de Cocos, antes de subducir en la zona de convergencia, presenta un rango diferencial de tres periodos: diez millones de años (corteza más joven y menos profunda), veinticinco millones de años y hasta cuarenta millones de años cerca de la cordillera de Tehuantepec (Müller et al., 2019; Pardo y Suárez, 1995). Por lo tanto, es una interacción dinámica que manifiesta su actividad tectónica con la presencia de volcanes activos en Colima, Puebla, Morelos y Chiapas, así como una actividad sísmica incesante, principalmente en la región de la costa, desde Colima hasta Chiapas, con eventos que ocurren entre las placas (PC-PNA).

Figura 3
Características geomorfológicas generales de la zona de subducción
frente a las costas de Oaxaca y Guerrero (México)

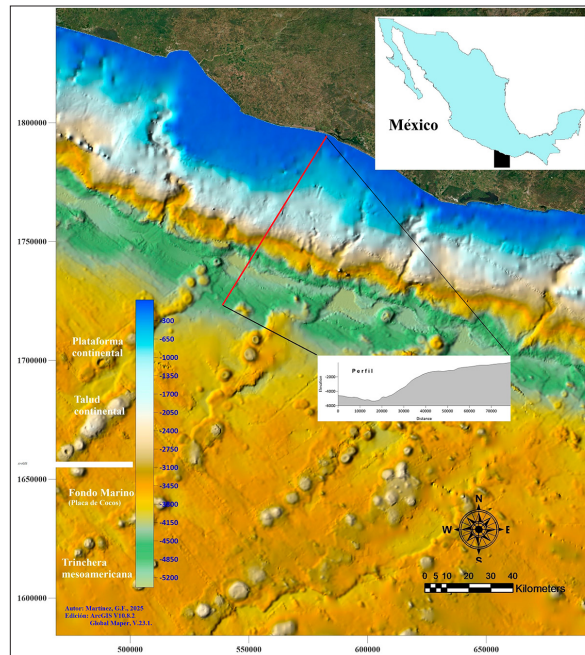


Fuente: elaboración propia con base en Google Earth (Blue Marble Geographics, 2022; Golden Software LLC, 2020; Google LLC, 2024).

Las características del fondo marino de la placa de Cocos antes de que penetre en la MAT en general corresponden a diez formas genéricas del relieve tectónico: la dorsal del Pacífico (EPR), corteza oceánica, fallas transformantes oceánicas, zonas de fractura, cadenas de montañas, cadenas de estructuras volcánicas, conos volcánicos submarinos, montes submarinos solitarios, la trinchera y la cordillera de Tehuantepec, relieve que confirma algo más global: la deriva tectónica (figura 3). Ésta corresponde a un proceso que tiene millones de años llevándose a cabo, el cual da fe de la dinámica del planeta, en el que se reacomoda incesantemente la placa continental y se recicla el fondo marino.

La interacción que involucra la morfología de la placa continental, la zona de subducción y la placa oceánica al momento de converger origina una dinámica que va modificando el comportamiento y el movimiento de las estructuras geológicas. Esta coincidencia en tiempo y espacio va dejando secuelas, ya que, al momento de que la placa oceánica penetra en la placa continental, arrastra megatoneladas de material, movimiento que no es raso y apacible, sino todo lo contrario: altera significativamente la morfología interna de la zona de subducción y sus estructuras. A escala humana esto es desastroso y pone en continuo riesgo a las poblaciones. Aunado a la errónea toma de decisiones en el establecimiento de los asentamientos, los equivocados métodos de construcción y la falta de prevención, ésta ha sido la causa de incontables pérdidas humanas y daños materiales (Amador et al., 2017; Rosenblueth et al., 1992).

Figura 4
Segmento de la MAT, convergencia entre la placa de Cocos y la placa Continental colindante con la línea de costa en Oaxaca



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth (Blue Marble Geographics, 2022; Environmental Systems Research Institute, 2021; Golden Software LLC, 2020).

Peculiaridades de los escenarios marinos

El conocimiento planetario que se tiene de las condiciones que prevalecen en los alrededores de las placas continentales, zonas de subducción y placas oceánicas es relativamente reciente. Su geomorfología en cualquier parte del planeta se caracteriza por la presencia de plataformas y taludes; escarpes; cañones; sumideros; arcos, mesetas e islas volcánicas; zonas de fracturas; sistemas de dorsales oceánicas, montañas y montes abisales (Müller et al., 2019) (figura 3, p. 7), con una composición, morfología y procesos tectónicos muy distintivos que, a mediados del siglo pasado, eran desconocidos (Mayer et al., 2018).

Ante la dificultad de un muestreo directo, desde entonces, a partir del desarrollo de la tecnología de teledetección de superficie, aérea y satelital, como el sonar de barrido lateral, ecosondas de reflexión, magnetometría marina, batimetría multihaz, reflexión sísmica y altimetría satelital, montados en boyas, barcos, aeronaves, astronaves y satélites, ha sido posible la fotointerpretación y el análisis de ortoimágenes o imágenes georreferenciadas de alta resolución de la superficie de la tierra (Landsat, IKONOS, MODIS, SPOT), además de modelos digitales altimétricos

(figura 4, p. 8). Gracias a estos avances se ha podido inferir y generar registros de lo que existe en el ámbito terrestre, en el fondo marino y más allá (Müller et al., 2019).

Este conocimiento ha permitido no sólo mapear, sino saber la edad de las estructuras, identificar anomalías magnéticas, fases de expansión, fuerzas que actúan, dinámica interna, entre otros procesos, lo cual proporciona información que ha permitido reconstruir la historia tectónica, geofísica y geológica global, e inferir procesos actuales y futuros del entorno marino y planetario para la creación de nuevos modelos (Makowski y Finkl, 2016).

Los fondos marinos y el desarrollo de la tecnología de teledetección

Para el estudio de los fondos marinos y su topografía, incluyendo aguas continentales, se ha pasado de formatos análogos a formatos digitales cuya resolución ha cambiado con el tiempo, con lo cual se ha generado información actual que va más allá de la placa oceánica e involucra el interior de la Tierra. Se tienen registros de la dinámica, flujo y química global del manto terrestre; dimensiones y volúmenes de las estructuras internas; procesos de gravedad y topografía oceánica; reconstrucción tectónica de placas y determinación de la edad de la corteza oceánica, entre otros.

Por ejemplo, ahora se sabe con más certeza que la edad de la corteza terrestre del océano Atlántico tiene una antigüedad promedio de 69.2 millones de años, y es la depresión o accidente geográfico más antiguo de las principales cuencas oceánicas; complementariamente, la edad promedio de la corteza terrestre del océano Pacífico es de 65.7 millones de años. Esta dinámica de incesante aumento de las cuencas oceánicas fluctúa de lenta, con 20-55 mm/año, a súper rápida, con >180 mm/año, y se origina por la presencia de dorsales o crestas de expansión que reemplazan la corteza más antigua con material más *joven* (Müller et al., 2019).

Estado actual del conocimiento de los fondos marinos

El conocimiento de la morfología, procesos y dinámica de los fondos marinos continúa siendo limitado debido principalmente a la dificultad de penetración de las ondas electromagnéticas en el rango del espectro visible y radar. Estas ondas son fuertemente atenuadas por el agua de los océanos y no logran penetrar más allá de una decena de metros de la superficie.

Estas limitantes han sido poco a poco sorteadas con el uso inicial de las ecosondas, lo que permitió a Marie Tharp y Bruce Heezen, en los años cincuenta, comenzar a comprender la complejidad de los fondos marinos y la relación que existía entre las recién mapeadas dorsales oceánicas y la sismicidad local. Estos descubrimientos fueron fundamentales para entender y apoyar paradigmas, como la deriva continental, la tectónica de placas y la expansión del fondo marino (Gutiérrez Martínez et al., 2014; Mayer et al., 2018; Pérez-Malvárez et al., 2003).

Los esfuerzos por generar una base de datos batimétricos tienen más de cien años, y esto ha sido posible gracias a la intervención de organismos como la Organización Hidrográfica Internacional y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, pertenecientes a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). El resultado ha sido una cuadrícula digital con un espaciado de celdas de treinta segundos obtenidos de ecosondas de un haz y multihaz; además de ecosondas modernas de alta resolución, sobrepuestas a datos de altimetría digital.

A pesar de que los datos batimétricos siguen siendo limitados, mediante técnicas recientes de interpolación el producto que se ha obtenido representa adecuadamente un fondo marino entendible (Mayer et al., 2018). Sin embargo, es un hecho que el conocimiento de las condiciones existentes en los fondos oceánicos está incompleto, por ejemplo, para desarrollar estudios detallados de la geomorfología marina asociada a zonas de subducción y su importante correlación con la sismicidad local.

Con el propósito de contribuir al uso sostenible de los océanos y el desarrollo de investigaciones científicas apoyadas con datos batimétricos detallados, en el Reino Unido se creó a finales de 2017 el Equipo del Nippon Foundation GEBCO Seabed 2030 (GEBCO, 2025). Los esfuerzos enfocados en el conocimiento futuro de los fondos marinos serán fundamentales en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de recursos marinos (minerales y gas natural), identificación de impactos ambientales, seguridad marítima relacionada a la navegación y demás campos de la ciencia (Mayer et al., 2018; Ou et al., 2021).

Conclusiones

En las condiciones actuales de desarrollo tecnológico y cooperación mundial se estima que se requerirían 350 años para cartografiar el 93% del fondo oceánico mundial que está más allá de los doscientos metros de profundidad; el 7% restante recaería en las agencias hidrográficas locales, las cuales se encargarían de mapear los fondos marinos con menos de doscientos metros de profundidad, correspondientes a las aguas territoriales de los estados costeros. Sin embargo, se esperan avances significativos con el desarrollo de nuevas tecnologías de teledetección, pero fundamentalmente deberá ser mediante la cooperación y la colaboración internacional, lo que permitiría acortar los tiempos de esta monumental empresa (Mayer et al., 2018).

Al considerar que el 80% de la actividad sísmica mundial ocurre en las zonas de subducción, abreviar los tiempos en el mapeo de los fondos marinos es una tarea prioritaria, en particular porque la actividad sísmica afecta en forma distinta a los países de acuerdo con su extensión. Por ejemplo, para los países centroamericanos, desde Honduras hasta Panamá, la actividad sísmica representa más víctimas mortales al afectar una mayor proporción de su población por km² ante sismos >5 Mw, contrario a lo que ocurre en países de gran extensión,

como México (Wyss et al., 2024). A esto hay que sumar la existencia de edificaciones antiguas y la frecuente puesta en práctica de criterios de construcción inadecuados que a menudo ignoran en su diseño el dar seguridad estructural para soportar deformaciones sin colapsar ante un sismo, con la inherente pérdida de seres humanos.

Referencias

- Allier Montaña, E. (2018). Memorias imbricadas: terremotos en México, 1985 y 2017. *Revista Mexicana de Sociología*, 80, núm. especial, 9-40. <https://doi.org/10.22201/iis.01882503p.2018.e.57772>
- Amador, J., Salazar, S. y Serrano, C. (2 de octubre de 2017). Earthquakes in Mexico: we are not changing our 2017 growth forecast and we introduce a positive bias for 2018. *BBVA Research. Mexico Economic Watch*, 1-4. https://www.bbva.com/wp-content/uploads/2017/10/171002_MexicoEarthquakesEffects.pdf
- Arroyo, D., Krishna Singh, S., Ordaz, M., Meli, R. y Ramírez, M. (2020). Observed seismic intensities and damage pattern in central Mexico during intraslab earthquakes of 1999 (MW6.9) and 2017 (MW7.1). *Geofísica Internacional*, 59(2), 83-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.2.2082>
- Astiz, L., Kanamori, H. y Eissler, H. (1987). Source characteristics of earthquakes in the Michoacan seismic gap in Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4), 1326-1346. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770041326>
- Boschman, L. M., van Hinsbergen, D. J. J., Kimbrough, D. L., Langereis, C. G. y Spakman, W. (2018). The dynamic history of 220 million years of subduction below Mexico: A correlation between slab geometry and overriding plate deformation based on geology, paleomagnetism, and seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(12), 4649-4672. <https://doi.org/10.1029/2018GC007739>
- Donahue, J. L., Stewart, J. P., Gregor, N., Bozorgnia, Y., Bray, J. D., Mahin, S. A., Idriss, I. M., Graves, R. W., Luco, N. y Shantz, T. (2019). *Ground-motion directivity modeling for seismic hazard applications*. PEER. <https://doi.org/https://doi.org/10.55461/GPHH9609>
- Dougherty, S. L. y Clayton, R. W. (2014). Seismicity and structure in central Mexico: evidence for a possible slab tear in the South Cocos plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4), 3424-3447. <https://doi.org/10.1002/2013JB010883>
- Dzierma, Y., Thorwart, M., Rabbel, W., Siegmund, C., Comte, D., Bataille, K., Iglesia, P. y Prezzi, C. (2012). Seismicity near the slip maximum of the 1960 MW 9.5 Valdivia earthquake (Chile): Plate interface lock and reactivation of the subducted Valdivia Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B6). <https://doi.org/10.1029/2011JB008914>
- EarthquakeList.org (sf). Top 100 countries with most earthquakes. *EarthquakeList.org*, sp. <https://earthquakelist.org/reports/top-100-countries-most-earthquakes/#2015>

- García-Acosta, V. (2004). Historical earthquakes in Mexico. Past efforts and new multidisciplinary achievements. *Annals of Geophysics*, 47(2-3), 487-496. <https://doi.org/https://doi.org/10.4401/ag-3315>
- GEBCO (27 de marzo de 2025). The Nippon Foundation–GEBCO training program in 2025. *GEBCO*. GEBCO/UNESCO/IHO, sp. <https://www.gebco.net/news/nippon-foundation-gebco-training-program-2025>
- Gutiérrez Martínez, M. C., Quaas Weppen, R., Ordaz Schroeder, M., Guevara-Ortiz, E., Muriá Vilá, D. y Krishna Singh, S. (2014). *Sismos*. CENAPRED/SEGOB. https://www.escom.ipn.mx/docs/escomunidad/formatosDocumentos/uipc_folletoSismos.pdf
- Kim, Y., Clayton, R. W. y Jackson, J. M. (2010). Geometry and seismic properties of the subducting Cocos plate in central Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B6), 1-22. <https://doi.org/10.1029/2009JB006942>
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3-4), 237-264. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.011>
- Makowski, C. y Finkl, C. W. (2016). History of modern seafloor mapping. *Coastal Research Library*, 13, 3-49. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25121-9_1
- Martínez-García, F. (2019). Simulation of ground acceleration routes by interpolation of PGA data, within Guerrero and Oaxaca states coastal border, Mexico. *Advances in Biology & Earth Sciences*, 4(2), 73-89. <http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/ABES/V4N2/Martinez-GarciaF.pdf>
- Martínez García, F. (2022). Landforms spatial interference with seismic waves in the area of influence of the Cocos Plate, Mexico. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 42913. <https://www.redalyc.org/journal/6953/695375056024/html/>
- Mayer, L., Jakobsson, M., Allen, G., Dorschel, B., Falconer, R., Ferrini, V., Lamarche, G., Snaith, H. y Weatherall, P. (2018). The Nippon Foundation-GEBCO seabed 2030 project: the quest to see the world's oceans completely mapped by 2030. *Geosciences*, 8(2), 63. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020063>
- Milenio Digital (1 de junio de 2023). ¿Cuáles son los volcanes activos en México y dónde están? *Milenio*, sp. <https://www.milenio.com/estados/volcanes-activos-en-mexico-cuales-son-y-donde-estan>
- Müller, R. D., Zahirovic, S., Williams, S. E., Cannon, J., Seton, M., Bower, D. J., Tetley, M. G., Heine, C., Le Breton, E., Liu, S., Russell, S. H. J., Yang, T., Leonard, J. y Gurnis, M. (2019). A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic. *Tectonics*, 38(6), 1884-1907. <https://doi.org/10.1029/2018TC005462>
- Ou, X., Zhu, J., Li, S., Jia, Y., Jia, Z., Zhang, S., Zhang, S., Chen, R., Chen, X., Ding, D., Xing, H., Suo, Y., Wang, P. y Liu, Y. (2021). Submarine geomorphological features and their origins

- analyzed from multibeam bathymetry data in the south China sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1419. <https://doi.org/10.3390/jmse9121419>
- Pardo, M. y Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7), 12357-12373. <https://doi.org/10.1029/95JB00919>
- Pérez-Campos, X., Kim, Y. H., Husker, A., Davis, P. M., Clayton, R. W., Iglesias, A., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Manea, V. C. y Gurnis, M. (2008). Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. *Geophysical Research Letters*, 35(18), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2008GL035127>
- Pérez-Malvárez, C., Bueno H., A. y Morrone, J. J. (2003). Recepción temprana de la teoría de la deriva continental y su competencia con las teorías rivales. *Asclepio*, 55(1), 3-34. <https://doi.org/10.3989/asclepio.2003.v55.i1.91>
- Rosenblueth, E., García Acosta, V., Rojas Rabiela, T., Núñez de la Peña, J. y Orozco Castellanos, J. (1992). *Macrosismos. Aspectos físicos, sociales, económicos y políticos*. CIESAS. https://cultura.buap.mx/observatoriocultural/sites/default/files/Archivos_Ensayos/Macrosismos.pdf
- Singh, S. K., Iglesias, A., Arroyo, D., Pérez-Campos, X., Ordaz, M., Mendoza, C., Corona-Fernández, R. D., Rivera, L., Espindola, V. H., González-Ávila, D., Martínez-López, R., Castro-Artola, O., Santoyo, M. A. y Franco, S. I. (2023). A Seismological study of the Michoacán-Colima, Mexico, Earthquake of 19 september 2022 (M_w 7.6). *Geofísica Internacional*, 62(2), 445-465. <https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2023.62.2.1453>
- Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte Especial. Grupo de Trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). *Servicio Sismológico Nacional*. UNAM, 1-11. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- Servicio Sismológico Nacional (2022). Reporte Especial. Grupo de Trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM. Sismo del 19 de septiembre de 2022, Michoacán (M 7.7). *Servicio Sismológico Nacional*. UNAM, 1-10. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2022/SSNMX_rep_esp_20220919_Michoacan_M74.pdf
- Stone, W. C. y Yokel, F. Y., Celebi, M., Hanks, T. y Leyendecker, E. V. (1987). *Engineering aspects of the september 19, 1985 Mexico earthquake*. NIST. <https://doi.org/https://doi.org/10.6028/NBS.BSS.165>
- Wyss, M., Speiser, M. y Tolis, S. (2024). The earthquake fatality load: a measure of impact. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(3), 1437-1443. <https://doi.org/10.1785/0120230187>
- Yamamoto, J., González-Moran, T., Quintanar, L., Zavaleta, A. B., Zamora, A. y Espindola, V. H. (2013). Seismic patterns of the Guerrero-Oaxaca, Mexico region, and its relationship to the continental margin structure. *Geophysical Journal International*, 192(1), 375-389. <https://doi.org/10.1093/gji/ggs025>

Plataformas geomáticas utilizadas en el diseño y edición de las figuras

Blue Marble Geographics (2022). *Global Mapper Pro V.23.1*. SO Windows.

Environmental Systems Research Institute (2021). *ArcGIS software Release 10.8.2*. SO Windows.

Google LLC (2024). *Google Earth Pro. Software V.7.3.3.6. 10201*. SO Windows.

Golden Software LLC (2020). *Surfer Software V.18.1*. SO Windows.