

A critical review of the seismic hazard in the State of Colima, México

Selene Isabel Ruiz Aguilar¹ 

Mentor académico: Sergio Felipe Zaldívar Reyes, Ph.D¹

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., México, 64700.

a01643701@tec.mx, sergio.f.zaldivar@tec.mx

Abstract– *This study presents a comprehensive review of the seismic hazard in the state of Colima, Mexico, using a Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) approach. We propose a new seismogenic regionalisation based on an updated and declustered earthquake catalogue spanning the period from 1787 to 2019. The parameters for both the Truncated Gutenberg-Richter and the Characteristic Earthquake recurrence models are determined, with the latter employed to describe the seismicity of large subduction earthquakes ($M_w > 7$) that occur in western Mexico. The variation of seismic intensity across the study area was determined through the implementation of Next Generation Attenuation (NGA) models, which can account for geological, stratigraphic, and site-effect conditions. Furthermore, the seismic hazard analysis incorporates a digital elevation model of the study area to consider the effect of topography on source-to-site distance and focal depth. The analysis results are presented as uniform hazard spectra for rock site conditions in the cities of Manzanillo and Guadalajara and are compared directly with the spectra from the Manual de Diseño de Obras Civiles of the Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015), which is applicable as national guidelines for Seismic Design. Additionally, seismic hazard maps are generated, showing the spatial distribution of peak ground acceleration (PGA) and spectral accelerations for key structural periods, corresponding to return periods of 150 and 475 years. The analysis is complemented by seismic disaggregation plots for the city of Manzanillo, identifying the sources that contribute most significantly to the hazard. The results indicate that while the estimated seismic hazard for low return periods is consistent with that proposed by the CFE (2015), for the higher return period of 475 years, the obtained accelerations exceed the values recommended by these design's guidelines by up to 20%. This discrepancy suggests that an update of the seismic hazard for the western region of Mexico is pertinent, with potential implications for the seismic safety of critical infrastructure.*

Keywords-- *Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Colima, Subduction Earthquakes, Uniform Hazard Spectra, Peak Gound Acceleration.*

Revisión del peligro sísmico en el estado de Colima, México

Selene Isabel Ruiz Aguilar¹ 

Mentor académico: Sergio Felipe Zaldívar Reyes, Ph.D¹

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., México, 64700.

a01643701@tec.mx, sergio.f.zaldivar@tec.mx

Resumen– Este estudio presenta una revisión exhaustiva del peligro sísmico en el estado de Colima, México, mediante un enfoque probabilista (PSHA). Para ello se propone una nueva regionalización sismogénica basada en un catálogo de sismos actualizado y depurado para el periodo comprendido entre 1787 y 2019. Asimismo, se determinan los parámetros de los modelos de recurrencia Truncado de Gutenberg-Richter y del Sismo Característico, este último modelo es empleado para describir la sismicidad de los grandes sismos de subducción ($M_w > 7$) que tienen lugar en el occidente de México. La variación de la intensidad sísmica en el área en estudio se determinó a través de la implementación de modelos de atenuación de última generación NGA (Next Generation Attenuation Models), los cuales son capaces de tomar en cuenta condiciones geológicas, estratigráficas y de efecto de sitio. Asimismo, en el análisis de peligro sísmico se ha incluido el modelo de elevaciones del sitio en estudio con la finalidad de considerar el efecto de la topografía en la distancia a la fuente y en la profundidad focal del sismo. Los resultados del análisis se presentan en términos de espectros de peligro uniforme para condiciones de roca en las ciudades de Manzanillo y Guadalajara, comparándolos directamente con los espectros del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015). Asimismo, se generan mapas de peligro sísmico que muestran la distribución espacial de la aceleración pico del terreno (PGA) y aceleraciones espectrales para periodos estructurales clave, correspondientes a periodos de retorno de 150 y 475 años. El análisis se complementa con gráficas de desagregación sísmica para la ciudad de Manzanillo, identificando las fuentes de mayor contribución al peligro. Los resultados indican que, si bien el peligro sísmico estimado para periodos de retorno bajos es consistente con lo propuesto por la CFE (2015), para periodos de retorno altos (475 años) las aceleraciones obtenidas superan hasta en un 20% a las recomendadas por dicho manual de diseño. Esta discrepancia sugiere que una actualización del peligro sísmico en la región occidente de México es pertinente, con potenciales implicaciones para la seguridad sísmica de infraestructuras críticas.

Palabras clave– Peligro Sísmico Probabilista, Colima, Sismos de Subducción, Espectros de Peligro Uniforme, Aceleración Pico del Terreno.

I. INTRODUCCIÓN

México es considerado una de las regiones sísmicamente más activas del mundo debido a la compleja interacción de las placas tectónicas que convergen a lo largo de su margen occidental, particularmente la Placa de Cocos y la Placa de Rivera bajo la Placa Norteamericana. Esta interacción genera una extensa zona de subducción a lo largo de la Trinchera

Mesoamericana, la cual es fuente de grandes terremotos interplaca que afectan significativamente las regiones costeras del Pacífico Mexicano [1].

En particular, el estado de Colima, México, se encuentra en una zona tectónicamente compleja donde la subducción de las placas de Cocos y Rivera; y, la presencia de bloques corticales, como el Bloque de Jalisco, contribuyen a una alta sismicidad histórica y a una variabilidad en los mecanismos de ruptura.

Determinar adecuadamente el peligro sísmico del estado de Colima es fundamental porque éste alberga al puerto mercantil más importante de México (Manzanillo) y contribuye a la producción del 18% de hierro del país. En particular, la actividad minera en el estado de Colima representa un sector estratégico cuya infraestructura crítica se encuentra ubicada en un entorno tectónicamente activo; por ejemplo, las presas de almacenamiento de residuos mineros (jales) ocupan áreas de varias decenas de hectáreas y alcanzan grandes alturas y su estabilidad podría verse comprometida ante eventos sísmicos de gran magnitud.

En el estado de Colima, en los últimos 100 años se han registrado diversos sismos que han provocado daños significativos en la infraestructura. Entre ellos destaca el terremoto del 3 de junio de 1932, con una magnitud M_w de 8.1. Este evento fue seguido pocos días después por dos sismos adicionales ocurridos el 18 y 22 de junio del mismo año, con magnitudes M_w de 7.8 y 6.9, respectivamente. El último de estos generó el tsunami más destructivo registrado en la historia de México, el cual devastó por completo la franja costera comprendida entre Cuyutlán y Boca de Apiza, en el estado de Colima [2].

II. GEOLOGÍA

La tectónica regional de Colima se caracteriza por la interacción entre las placas Rivera, Cocos y Norteamericana. El proceso de subducción de las placas Rivera y Cocos por debajo de la placa Norteamericana ha dado como resultado que la corteza continental se divida en dos microplacas: el bloque de Jalisco y el bloque de Michoacán, mismos que se ilustran en la Fig. 1; cada uno de estos bloques presenta movimientos independientes hacia la placa Norteamericana [3].

En este contexto tectónico, el estado de Colima se localiza dentro de la región de antearco volcánico, generado por el

denominado bloque Jalisco; es decir, en la franja comprendida entre la fosa oceánica y el arco volcánico activo asociado al proceso de subducción de las placas de Cocos y Norteamericana. Las propiedades estructurales y térmicas del antearco influyen en los mecanismos de propagación y atenuación de las ondas sísmicas, que se ha asociado con una menor disipación de energía en comparación con el trasarco y, en consecuencia, con el registro de mayores amplitudes sísmicas en este tipo de regiones [4].

La placa de Cocos se subduce debajo de la placa norteamericana con un ángulo de entre 24° y 30° [5] a una velocidad de entre 6 y 7.5 cm/año desde hace aproximadamente 11 millones de años [6]. Por su parte, el movimiento de la placa de Rivera ha experimentado variaciones a lo largo de los últimos 10 millones de años. En la actualidad, se caracteriza por un ángulo de subducción más pronunciado que el de la placa de Cocos con una velocidad estimada entre 3.2 y 3.8 cm/año [7]. Un ángulo de subducción más pronunciado se ha relacionado con una menor extensión del contacto interplaca, lo que puede influir en la generación de sismos de menor magnitud en comparación con la placa de Cocos.

En la zona en estudio convergen tres grabens: el graben de Tepic-Zacoalco, el graben de Colima y el graben de Chapala; estos se unen en un mismo punto a 40 km al sur de Guadalajara y forman una triple unión continental [8]. Los movimientos de las placas Rivera-Cocos han llevado a la generación del graben de Colima desde hace 5 millones de años, dicho graben se extiende desde la triple unión hacia el sur, abarcando desde las proximidades de Guadalajara hasta la costa del océano Pacífico, a lo largo de aproximadamente 170 km, presentando variaciones en sus características a lo largo de su extensión [3].

Finalmente, desde el punto de vista geológico, es importante mencionar que existe un sistema de fracturas que se origina en la bahía de Manzanillo, atraviesa el volcán de Colima y se prolonga hasta el semigraben de Cotija; este conjunto estructural conforma la denominada Falla de Tamazula. Esta falla presenta una orientación de NE-SW, desempeñando un papel fundamental en el comportamiento del volcán de Colima [8].

III. SISMICIDAD

El estado de Colima presenta una elevada actividad sísmica asociada principalmente al proceso de subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana; en particular, para este estudio, las condiciones de sismicidad se definieron con base en el catálogo de la referencia [9].

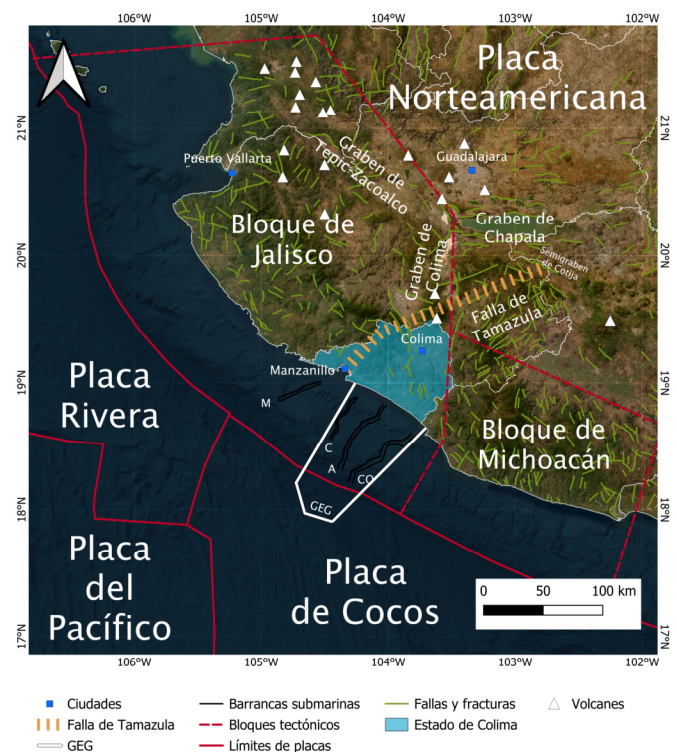


Fig. 1 Mapa de la tectónica de la región de estudio para el estado de Colima. Cuatro placas tectónicas están presentes en esta región. Se muestran los elementos estructurales más importantes. Las fallas y fracturas se distinguen por líneas verdes. Las barrancas de Manzanillo (M), Cuyatlán (C), Armería (A) y Coahuayana (CO) se identifican por líneas negras. Graben el Gordo (GEG) ilustrado con línea blanca. También se muestran los volcanes del área en forma de triángulos.

El catálogo de sismos utilizado para la presente revisión del peligro sísmico del estado de Colima contiene un registro de sismos de 1787 hasta 2018 que cubre la totalidad del territorio mexicano, donde se incluyen terremotos a partir de diferentes bases de datos y agencias locales, regionales e internacionales. Asimismo, en la Ref. [9] se explica de manera detallada el proceso de depuración del catálogo sísmico. En términos generales, éste proceso consistió en la eliminación de réplicas y eventos precursoros; además, se revisaron y ajustaron las coordenadas geográficas epicentrales y se homogeneizaron los valores de magnitud de todos los sismos en términos de la magnitud de momento equivalente M_w .

En el presente análisis de peligro sísmico se consideraron los sismos localizados dentro de un radio de 400 km a partir de la ciudad de Colima. Asimismo, se eliminaron algunos registros que se identificaron como ambiguos y que fueron anteriores al año 1923, año en que se consolidó la primera red de monitoreo sísmico en México por el Servicio Sismológico Nacional. Asimismo, se realizó una revisión adicional del catálogo sísmico para identificar y eliminar registros duplicados, descartando aquellos eventos que coincidían tanto en fecha como en coordenadas geográficas. En particular, el conjunto de datos considerado para el análisis de sismicidad de la zona en estudio consistió en 842 registros sísmicos que

se ubican entre 1806 y 2018. Asimismo, es importante enfatizar que 33 de los registros que conforman el catálogo sísmico están asociados con sismos con magnitud $M_w > 7$.

Dentro del periodo analizado destacan eventos de gran magnitud, como el Terremoto de Colima de 1932, el cual es considerado el terremoto de mayor magnitud que se ha registrado en la república mexicana en la época instrumental; y el Terremoto de Colima de 2003, que constituyen referencias importantes en la historia sísmica del estado.

En la Fig. 2 se presentan los histogramas de frecuencias de la magnitud M_w y de la profundidad de los eventos sísmicos registrados en la vecindad del estado de Colima, destacándose que en los últimos 212 años se han presentado cinco eventos con magnitudes $M_w > 8.0$. Asimismo, es de destacarse que el 54% de los eventos sísmicos se localizan a profundidades menores a los 20 kilómetros.

En la Fig. 3 se muestran los sismos registrados en la zona de estudio con magnitud de momento $M_w > 6$. La distribución espacial ratifica que frente a la costa del Pacífico se presenta una recurrencia importante de fenómenos sísmicos asociados al proceso de subducción y a los desplazamientos de los bloques Jalisco y Michoacán; asimismo, destaca que el estado de Colima presenta una alta tasa de recurrencia de eventos sísmicos de magnitud $M_w > 7.5$.

Así pues, con base en el catálogo de la Ref. [9] se analizó la distribución espacial, temporal y de magnitud de los eventos registrados dentro de la zona de estudio, estimándose, a través del método de regresión por mínimos cuadrados, los parámetros de sismicidad de los modelos de recurrencia Truncado de Gutenberg-Richter y de Sismo Característico.

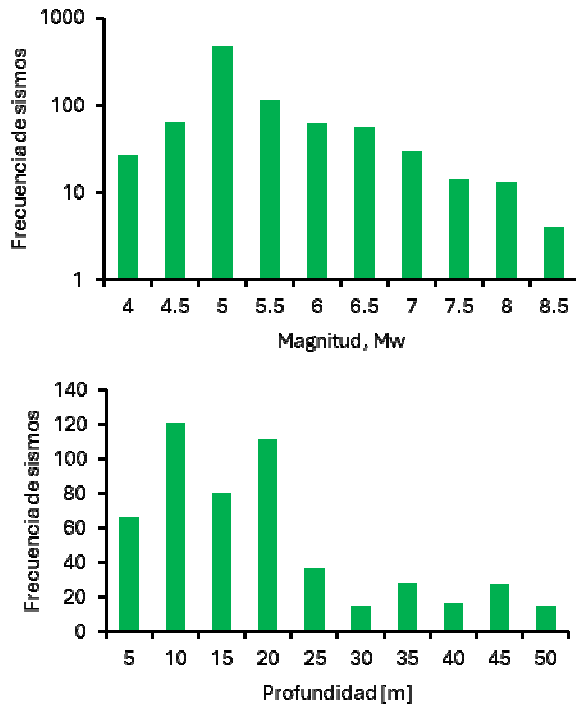


Fig. 2. Histogramas de frecuencias de la magnitud M_w y de profundidad de los eventos sísmicos registrados en la vecindad de la zona en estudio en el periodo 1806-2018.

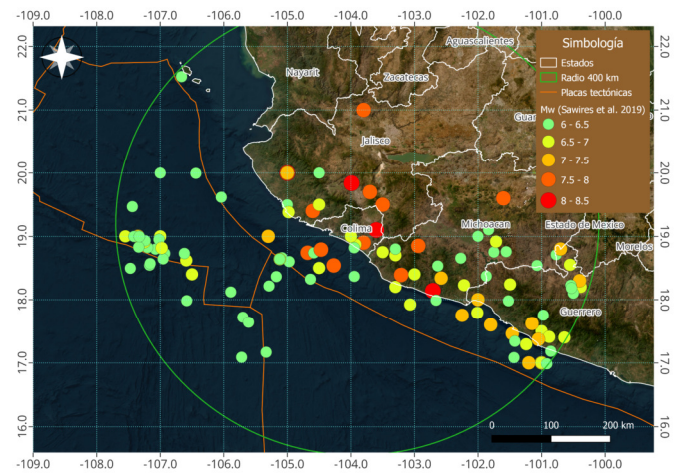


Fig. 3 Sismos con magnitudes M_w mayores a 6 registrados en la vecindad de la zona en estudio.

IV. METODOLOGÍA

El análisis de peligro sísmico probabilista se realizó con base en la metodología clásica establecida en las referencias [10], [11] y [12]. En términos generales esta metodología consiste en i) identificar las fuentes sismogénicas, ii) establecer los modelos de recurrencia que describen la sismicidad para cada una de las fuentes establecidas, iii) implementar los modelos de atenuación para conocer la intensidad sísmica en el área en estudio; y, iv) realizar el cálculo de las curvas de peligro sísmico, definiendo la tasa de excedencia para diferentes niveles de aceleración. De esta manera, la metodología aplicada permite que las incertidumbres en la magnitud, la ubicación, la tasa de recurrencia sísmica y las características de las fuentes sean considerados en la evaluación integral del peligro sísmico.

En la Fig. 4 se presentan de manera gráfica los pasos que se consideran en la aplicación de la metodología clásica de un análisis de peligro sísmico probabilista.

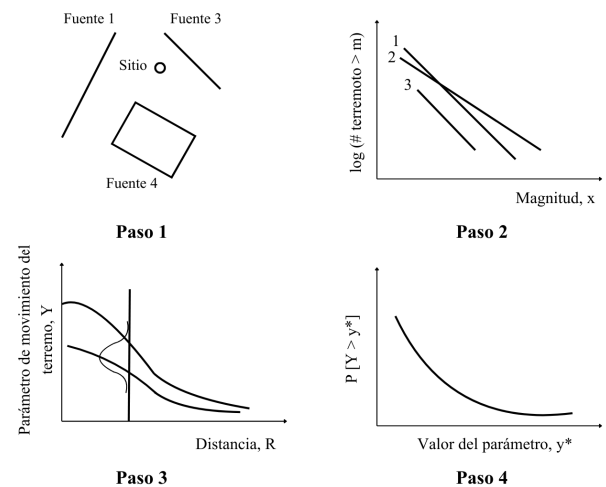


Fig. 4 Pasos para la aplicación de la metodología clásica de un análisis de peligro sísmico probabilista, (Adaptado de la Ref. [12]).

A. Regiones sismogénicas

Con base en el marco geológico regional y considerando los eventos registrados en el catálogo sísmico, se definieron seis (6) zonas sismogénicas para evaluar el peligro sísmico del estado de Colima. Cinco de estas zonas corresponden con sismos interplaca e intraplaca asociados con fenómenos de subducción de las placas Rivera y Cocos con respecto a la placa Norteamericana. La sexta fuente sismogénica está principalmente relacionada con los sismos intraplaca que se presentan con el Eje Neovolcánico de México.

La localización espacial de cada una de las fuentes sismogénicas propuestas para evaluar el peligro sísmico del estado de Colima se indica en la Fig. 5. Por su parte, las profundidades de cada una de las fuentes se definieron con base en el catálogo sísmico. De esta manera la placa de la Rivera se ubicó a una profundidad constante de 17 km; la placa de Nayarit se ubicó a una profundidad que varía de los 15 a los 30 km; por su parte, las placas de Colima, Michoacán y Guerrero se ubicaron a profundidades que varían de los 12 a los 30 km en dirección ortogonal al contacto entre las placas tectónicas; finalmente, la región del Eje Neovolcánico Mexicano se ubicó a profundidades que variaron de los 57 a los 90 km en dirección NE.

En la Fig. 6 se presenta el histograma de profundidades de los sismos registrados en la fuente sismogénica denominada Eje Neovolcánico.

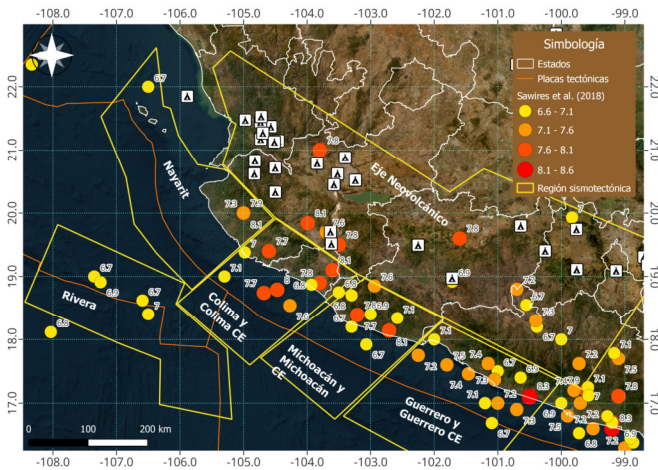


Fig. 5 Fuentes sismogénicas definidas para evaluar el peligro sísmico del estado de Colima.

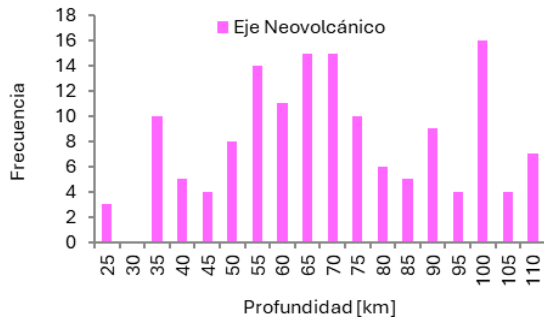


Fig. 6 Histograma de la distribución de profundidades para los sismos registrados dentro de la fuente Eje Neovolcánico.

Finalmente, es importante hacer notar que en la implementación del análisis de peligro sísmico se consideró el modelo de elevaciones del sitio en estudio que se ilustra en la Fig. 7 con la finalidad de considerar el efecto de la topografía en la distancia a la fuente y en la profundidad focal del sismo.

B. Modelos de recurrencia

Con base en el catálogo de la Ref. [9] se analizó la sismicidad registrada dentro de las diferentes zonas sismogénicas y se estimaron los parámetros de sismicidad de los modelos de recurrencia Truncado de Gutenberg-Richter y de Sismo Característico a través del método de regresión por mínimos cuadrados. En este sentido, es importante mencionar que la estimación de los parámetros de sismicidad a través de esta metodología introduce cierto nivel de incertidumbre que usualmente se toma en cuenta a través de la construcción de intervalos de confianza; no obstante, en el presente trabajo únicamente se emplearon los valores medios.

El modelo Truncado de Gutenberg-Richter establece la relación entre la tasa anual de excedencia (λ_m) y un sismo con magnitud m a través de la Ec. 1; en donde ν y β son los parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas y que en este trabajo se determinaron a través de un método de regresión por mínimos cuadrados; m_0 es la magnitud mínima relevante y m_u es la magnitud máxima que potencialmente puede producir la fuente sismogénica.

$$\lambda_m = \nu \frac{e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_u-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (1)$$

En este trabajo la sismicidad de las fuentes Rivera, Nayarit y Eje Neovolcánico se ajustó enteramente a un modelo Truncado de Gutenberg-Richter. A manera de ejemplo, en la Fig. 8 se presenta el ajuste por mínimos cuadrados para la región sismogénica Nayarit, en ella se aprecia que la máxima magnitud sísmica que potencialmente podría producir esta fuente se consideró igual a $m_u = 8.2$.

Ahora bien, las fuentes Colima, Michoacán y Guerrero no se ajustaron enteramente a un modelo Truncado Gutenberg-Richter, tal y como lo señala la referencia [13] para los sismos de subducción que se generan en el pacífico mexicano. Por tanto, en estas fuentes sismogénicas también se implementó el modelo de recurrencia denominado Sismo Característico.

El modelo del Sismo Característico se establece en términos de la desviación estándar de los sismos característicos (σ_M), de la esperanza de la magnitud del sismo característico ($E(M)$), de la distribución de probabilidad normal estándar (Φ) y del tiempo medio de ocurrencia entre dos eventos característicos ($T_0 = 1/\lambda_0$). Este modelo estima la tasa anual de excedencia (λ_m) de un sismo de magnitud m a través de la Ec. 2.

$$\lambda_m = \lambda_0 \frac{\left[1 - \Phi\left[\frac{m - E(M)}{\sigma_M}\right]\right]}{\Phi\left[\frac{m_u - E(M)}{\sigma_M}\right] - \Phi\left[\frac{m_0 - E(M)}{\sigma_M}\right]} \quad (2)$$

En el caso de las fuentes sismogénicas Colima, Michoacán y Guerrero, se estableció un modelo de sismicidad mixto, en donde el modelo de Sismo Característico se empleó para estimar la tasa de excedencia de los sismos de magnitud importante. En la Fig. 9 se presenta el caso de la región sismogénica Colima, en donde la magnitud máxima también se consideró igual a $m_u = 8.2$.

Así pues, en las Tablas I y II se presentan los parámetros de ajuste de los modelos Gutenberg-Richter y Sismo Característico para cada una de las zonas sismogénicas.

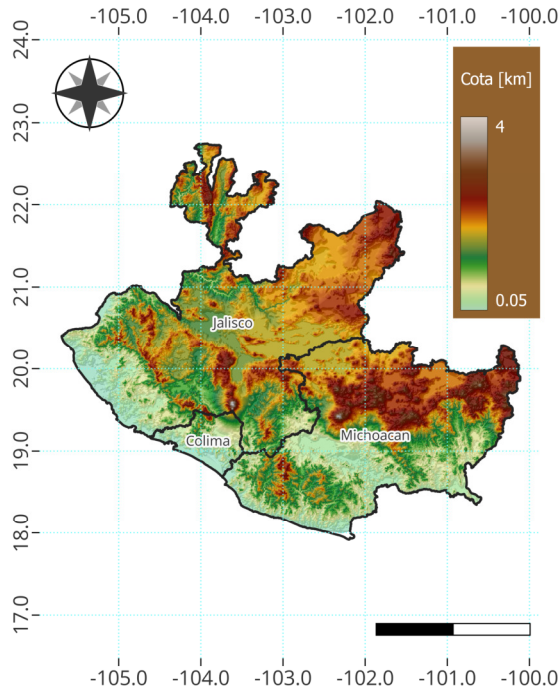


Fig. 7 Modelo de elevaciones considerado en el análisis de peligro sísmico del sitio estado de Colima.

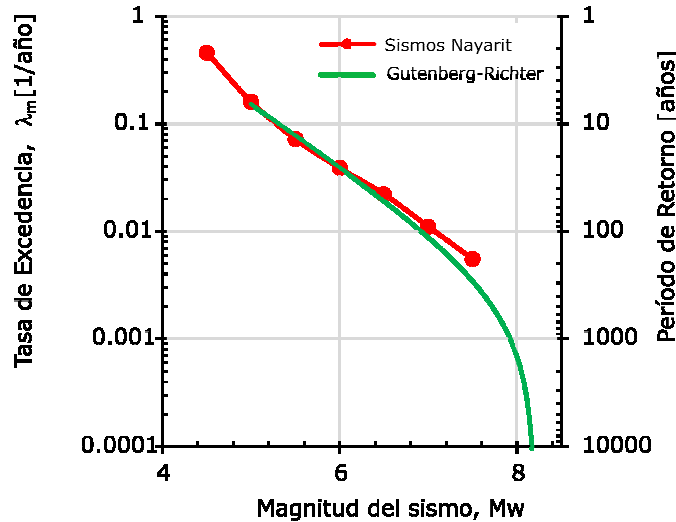


Fig. 8 Ajuste de la sismicidad registrada en la fuente sismogénica Nayarit al modelo Truncado de Gutenberg-Richter mediante el método de mínimos cuadrados.

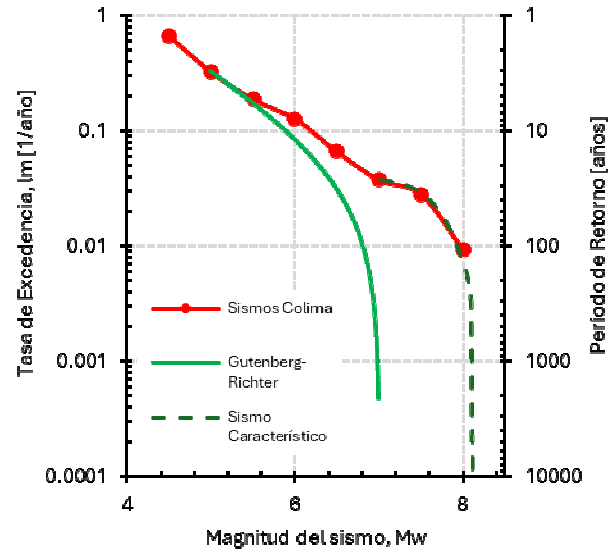


Fig. 9 Ajuste de la sismicidad registrada en la fuente sismogénica Colima a los modelos Truncado de Gutenberg-Richter y Sismo Característico mediante el método de mínimos cuadrados.

TABLA I
PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO GUTENBERG-RICHTER PARA LAS DIFERENTES ZONAS SISMOGÉNICAS CONSIDERADAS

Fuente	m_u	m_o	β	ν [1/año]
Rivera	7.4	5.0	0.88496	0.57129
Nayarit	8.2	5.0	1.31494	0.15112
Colima	7.0	5.0	1.07183	0.33377
Michoacán	6.0	5.0	1.17272	0.42201
Guerrero	6.0	5.0	0.92367	0.57244
E. Neovolcánico	7.5	5.0	1.18139	0.46282

TABLA II
PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO SISMO CARACTERÍSTICO PARA LAS DIFERENTES ZONAS SISMOGÉNICAS CONSIDERADAS

Fuente	m_u	m_o	σ_M	$E(M)$	T_0 [año]
Colima	8.2	7.0	0.39188	7.82	26.5
Michoacán	8.3	6.0	0.67929	7.10	7.6
Guerrero	8.2	6.0	0.56556	6.77	4.4

C. Modelos de atenuación

Las fuentes sismogénicas consideradas están asociadas principalmente con la ocurrencia de sismos de subducción, ya sea interplaca o intraplaca; exceptuando la fuente asociada al Eje Volcánico Mexicano, para la cual se ha considerado la ocurrencia preponderante de sismos intraplaca.

En consecuencia, en la selección de los modelos de atenuación apropiados para tales sismos se siguieron las recomendaciones establecidas en la Ref. [14], en donde se sugiere la implementación de los modelos de atenuación de última generación NGA para determinar la variación de la intensidad sísmica en el área en estudio. Estos modelos son capaces de tomar en cuenta condiciones geológicas, estratigráficas y de efecto de sitio, esto último a través de la velocidad de propagación de onda de corte equivalente en los primeros 30 m de depósito de suelo (V_{S30}).

En particular, para los sismos asociados con fuentes sismogénicas de subducción se consideraron los modelos establecidos en las referencias [15] y [16], tanto para sismos interplaca como intraplaca.

El modelo de la referencia [15], también conocido como NGA 2020, es aplicable para sismos con magnitudes que van desde 4.5 hasta 8.5, por tal motivo este modelo se empleó en todas las fuentes asociadas con sismos de subducción interplaca e intraplaca, tanto para las fuentes asociadas con el modelo de recurrencia Gutenberg-Richter como para aquellas asociadas con el modelo de recurrencia del Sismo Característico. En la aplicación de este modelo se consideró una velocidad de propagación de onda de corte equivalente en los primeros 30 m de depósito de suelo igual a $V_{S30} = 1500$ m/s, a fin de tener el espectro de peligro uniforme en roca.

Por su parte, el modelo de la referencia [16], también conocido como modelo BCHydro Modificado, es aplicable para sismos con magnitudes que van desde 6 hasta 8.4, por tal motivo este modelo de atenuación se implementó únicamente en las fuentes asociadas con el modelo del Sismo Característico; es decir, para estimar la intensidad sísmica de los grandes eventos de subducción del pacífico mexicano. Del mismo modo, en su implementación se consideró una $V_{S30} = 1500$ m/s y el efecto de trasarco volcánico asociado con la geología del estado de Colima.

En el caso de los sismos intraplaca generados por la fuente Eje Neovolcánico Mexicano, y siguiendo las recomendaciones de la Ref. [14], se implementó el modelo de atenuación propuesto en la Ref. [17], también conocido como NGA West 2. Este modelo cubre un rango de magnitudes sísmicas que van desde 3 hasta 8.5; en su implementación se asumió una generación de falla del tipo normal y una $V_{S30} = 1500$ m/s, asociados con condiciones de roca. En este estudio el análisis se acotó a la respuesta dinámica en roca con el objetivo de que los resultados obtenidos sean comparables a los reportados en las referencias [18] y [19].

En la Fig. 10 se presenta el diagrama de árbol mediante el cual se implementaron los diferentes modelos de atenuación en la evaluación del peligro sísmico del estado de Colima con la aplicación del enfoque probabilista.

D. Cálculo del Peligro Sísmico

El cálculo del peligro sísmico con el enfoque probabilista permite estimar de manera cuantitativa la intensidad del movimiento del terreno en un sitio específico tomando en cuenta los parámetros que describen a las fuentes sismogénicas que podrían tener influencia en el movimiento de terreno, la distancia de estas respecto al sitio de estudio y los efectos del intervalo de tiempo de exposición de la estructura que se esté analizando.

Matemáticamente, el enfoque probabilista se representa a través de la doble integral expresada en la Ec. 3, en donde el término λ_{y*} representa la tasa de excedencia a la cual el valor y^* es excedido debido a la acción de los sismos ocurridos en la

fuente i -ésima fuente sismogénica, misma que se encuentra a una distancia r y tiene una magnitud m .

$$\lambda_{y*} = \sum_{i=1}^{N_S} \nu_i \int \int P[Y > y^* | m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad (3)$$

Las curvas de peligro sísmico obtenidas mediante la Ec. 3 usualmente se combinan con un modelo de Poisson para estimar las probabilidades de excedencia en intervalos de tiempo finito; y, a través de la Ec. 4 es posible determinar la probabilidad de excedencia de el parámetro sísmico y^* en un periodo de tiempo T , denominado tiempo de exposición.

$$P[Y_T > y^*] = 1 - e^{-\lambda_{y*} T} \quad (4)$$

La solución de la doble integral de la Ec. 3 se realizó mediante la aplicación del software R-CRISIS, el cual ha sido empleado a nivel mundial por más de 35 años para la implementación de análisis de peligro sísmico empleando el enfoque clásico probabilista. El marco teórico y la validación técnica de dicho software se presenta en la Ref. [20].

R-CRISIS permite considerar la geometría de las diferentes fuentes sismogénicas, el modelo de elevaciones del sitio para una estimación más precisa de la distancia del sitio al evento sísmico, la sismicidad asociada a cada una de ellas a través de los modelos de Trucando de Gutenberg-Richter y Sismo Característico; asimismo, permite la implementación de diferentes modelos de atenuación y la posibilidad de trabajar con árboles lógicos, fundamentales en la evaluación del peligro sísmico a través del enfoque probabilista.

Los principales resultados obtenidos mediante la aplicación de R-CRISIS consisten en las curvas de peligro sísmico que definen la tasa de excedencia para diferentes niveles de aceleración; asimismo, se obtienen los espectros de pseudoaceleración para diferentes periodos de retorno y mapas de peligro sísmico.

La evaluación del peligro sísmico se realizó en el área definida por las longitudes -98.55° y -106.5° y las latitudes 17.5° y 23.45° , teniéndose dentro de esta área 19200 puntos de integración.

El postprocesado de los mapas de peligro sísmico obtenidos con el software R-CRISIS se realizó con el software de información geográfica QGIS.

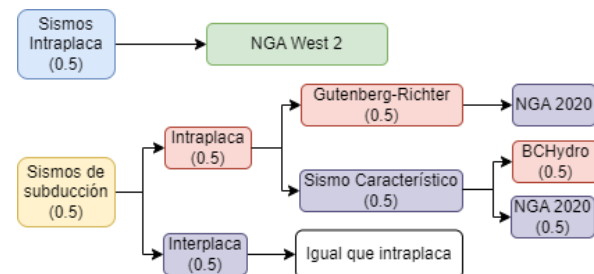


Fig. 10 Diagrama de árbol mediante el cual se implementaron los diferentes modelos de atenuación.

V. RESULTADOS

La Fig. 11 presenta tres curvas de peligro sísmico obtenidas a través del análisis probabilista implementado, se indican dos ciudades del estado de Colima, Manzanillo y Cuauhtémoc; y, una del estado de Jalisco, Guadalajara. Esta última se ha incluido para verificar la validez del análisis implementado más allá de la zona de subducción. En efecto, se aprecia que conforme nos alejamos de la zona de subducción, las aceleraciones pico del terreno tienden a disminuir significativamente. Por ejemplo, para un periodo de retorno $T_r = 475$ años, en la ciudad de Manzanillo se espera una Aceleración Pico del Terreno en Roca de 818 gales, en ciudad Cuauhtémoc del orden de 530 gales y en la ciudad de Guadalajara de tan solo 120 gales, siendo casi siete veces menor a la esperada en la ciudad de Manzanillo.

Las Figs. 12 y 13 presentan las comparativas de los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en Roca para la ciudad de Manzanillo, en línea punteada se indican los resultados obtenidos con base en el análisis probabilista implementado; en tanto que, en línea continua se indican los EPU generados con el Manual de Obras Civiles para Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad, Ref. [18]. Destaca que, si bien el peligro sísmico estimado para periodos de retorno bajos es consistente con lo propuesto por la Ref. [18], para periodos de retorno altos (475 años) las aceleraciones obtenidas superan hasta en un 20% a las recomendadas por dicho manual de diseño. Resultados similares a los aquí presentados han sido reportados en el análisis de peligro sísmico de la Ref. [14] para el occidente mexicano.

En complemento a los EPU calculados para el estado de Colima, en la Fig. 14 se presenta la misma comparativa entre el EPU estimado con el análisis probabilista y el propuesto por la Ref. [18] para un $T_r = 475$ años. En este caso, la PGA propuesta por la Ref. [18] es 26% menor al estimado con el análisis de peligro sísmico probabilista, no obstante, para otros periodos se invierte esta condición, si bien la diferencia entre uno y otro se mantiene por debajo del 10%.

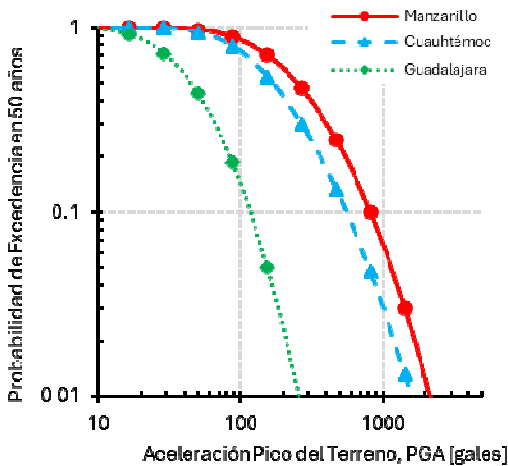


Fig. 11 Curva de Peligro Sísmico obtenida para la Probabilidad de Excedencia en 50 años de la Aceleración Pico del Terreno, PGA.

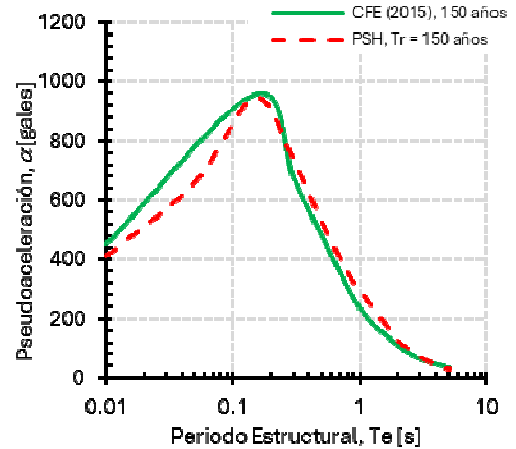


Fig. 12 Comparativa de los Espectros de Peligro Uniforme en Roca para la ciudad de Manzanillo obtenidos con el análisis de peligro sísmico probabilista y el MDOC-Sismo-CFE, Ref. [18], para un periodo de retorno de 150 años.

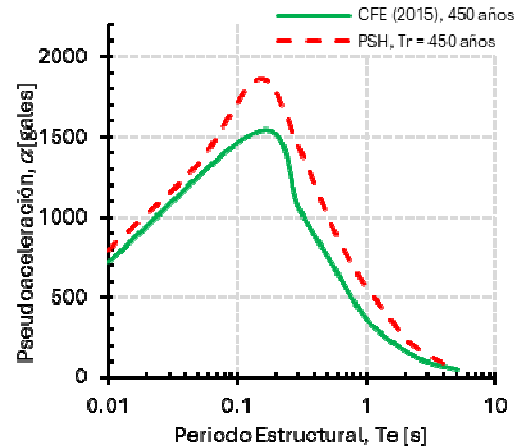


Fig. 13 Comparativa de los Espectros de Peligro Uniforme en Roca para la ciudad de Manzanillo obtenidos con el análisis de peligro sísmico probabilista y el MDOC-Sismo-CFE, Ref. [18], para un periodo de retorno de 450 años.

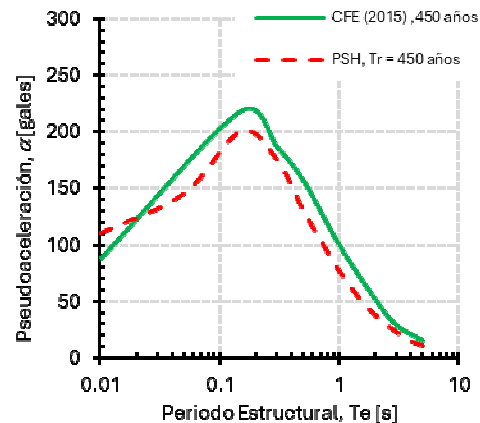


Fig. 14 Comparativa de los Espectros de Peligro Uniforme en Roca para la ciudad de Guadalajara obtenidos con el análisis de peligro sísmico probabilista y la Ref. [18], para un periodo de retorno de 450 años.

Las Figuras 15 y 16 presentan los mapas de peligro sísmico uniforme obtenidos para los estados de Colima, Jalisco y Michoacán; en particular, se ha graficado la Aceleración Pico del Terreno para dos períodos de retorno de 150 y 450 años. Los mayores valores de PGA se calcularon para el estado de Michoacán, en donde, para un $T_r = 475$ años se alcanza una PGA del orden de 950 gales. Se aprecia también una tendencia de atenuación de la intensidad sísmica en dirección NE.

De manera particular, los mapas de peligro uniforme obtenidos para el estado de Colima se presentan en las Figs. 17 y 18 para los períodos de retorno de 150 y 450 años, respectivamente. Se aprecia que los valores máximos de PGA se esperan en el municipio de Tecomán, en la colindancia con el estado de Michoacán, en donde, para un $T_r = 475$ años se estima una PGA del orden de 850 gales; en contraste, Cuauhtémoc es el municipio en donde se esperan los menores niveles de PGA, pues para el mismo período de retorno se esperan valores cercanos a los 450 gales, 53% menores a los máximos esperados en la entidad. En el importante municipio de Manzanillo los valores de PGA esperados son de 411 y 786 gales, para períodos de retorno de 150 y 475 años, respectivamente. En este sentido, se hace notar que en el análisis de peligro sísmico presentado en la Ref. [14], para el municipio de Manzanillo se estimó una PGA de 697 gales, del orden de 10% menor a la estimada en el presente estudio.

Es importante mencionar que, en el Atlas de Riesgo del estado de Colima, Ref. [19], para los períodos de retorno de 100 y 500 años, se reportan valores de aceleraciones máximas del terreno de 244 y 568 gales, respectivamente. Estos valores son 50% menores a los estimados a través del análisis de peligro sísmico probabilista que se presenta en este trabajo, sugiriendo la necesidad de revisitar y actualizar el peligro sísmico del estado de Colima con el objetivo de salvaguardar la seguridad estructural de las principales obras de infraestructura.

Finalmente, como referencia, en la Fig. 19 se presentan los mapas de calor asociados con la desagregación del peligro sísmico del municipio de Manzanillo para un período de retorno de 150 años. Es importante hacer notar que, dado que se empleó un árbol lógico en la implementación del peligro sísmico en R-CRISIS, estos mapas de desagregación deberán tomarse únicamente como referencia. En este sentido, se aprecia que los sismos de mayor contribución al peligro sísmico en este municipio son aquellos que se encuentran en el rango de magnitud de 7.5 y 8.2; y, que a su vez se presentan a distancias epicentrales que van de los 20 a los 70 km; esta condición prevalece para los dos periodos de retorno analizados, indicando que la principal contribución al peligro sísmico del estado de Colima son los sismos producidos por el fenómeno de subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana.

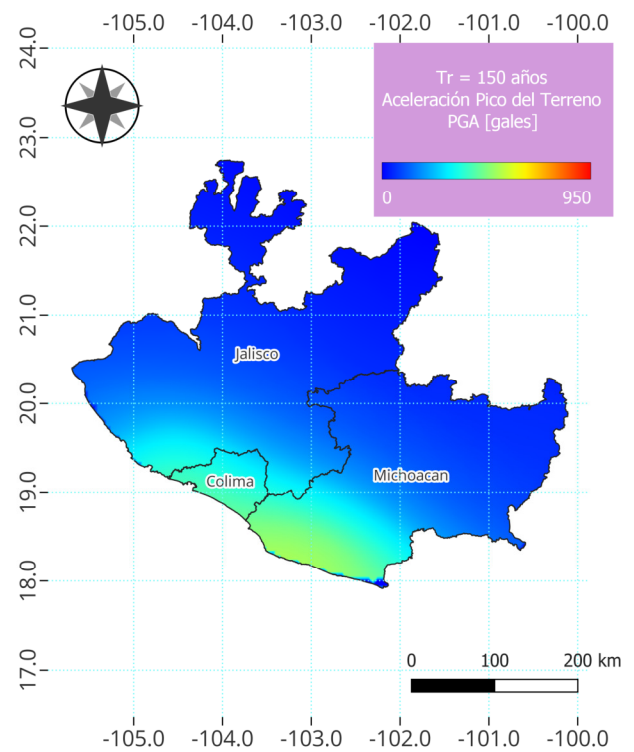


Fig. 15 Mapa de Peligro Uniforme, Aceleración Pico del Terreno (PGA) estimada para un período de retorno de 150 años.

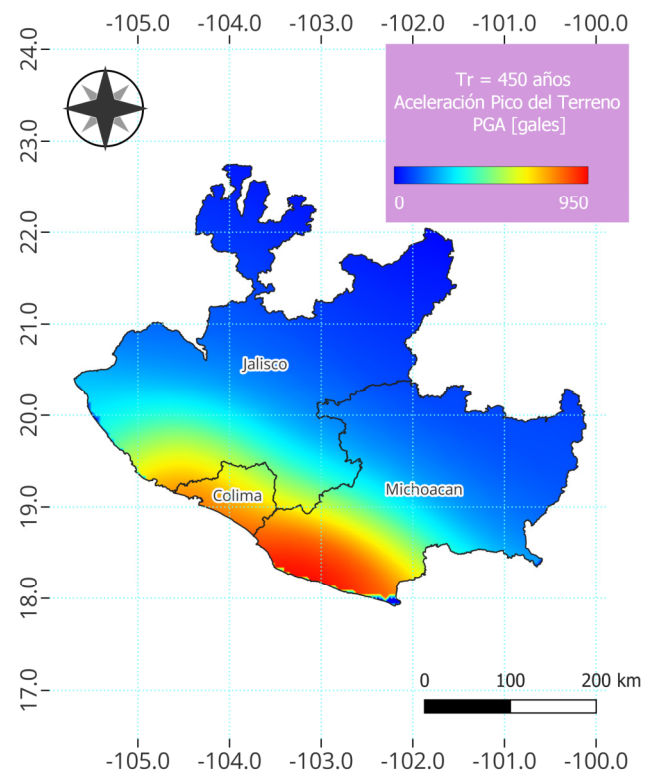


Fig. 16 Mapa de Peligro Uniforme, Aceleración Pico del Terreno (PGA) estimada para un período de retorno de 450 años.

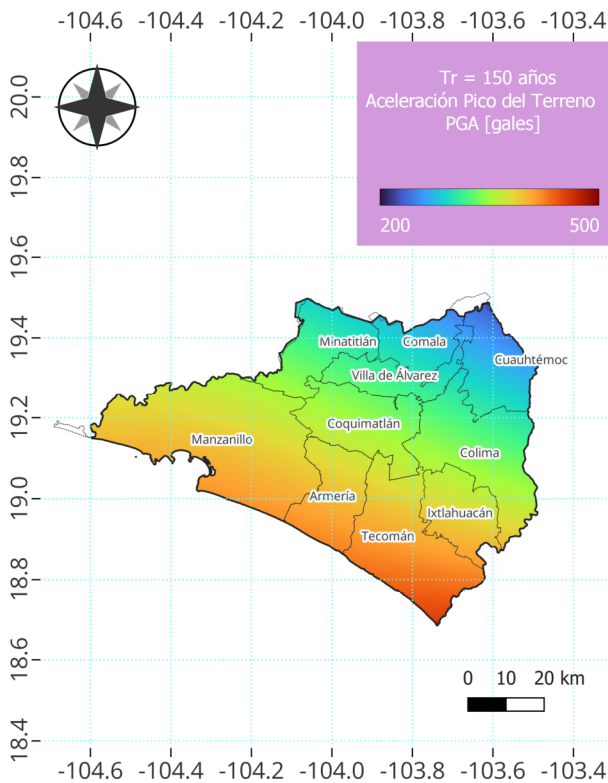


Fig. 17 Mapa de Peligro Uniforme del estado de Colima, Acceleración Pico del Terreno (PGA) estimada para un periodo de retorno de 150 años.

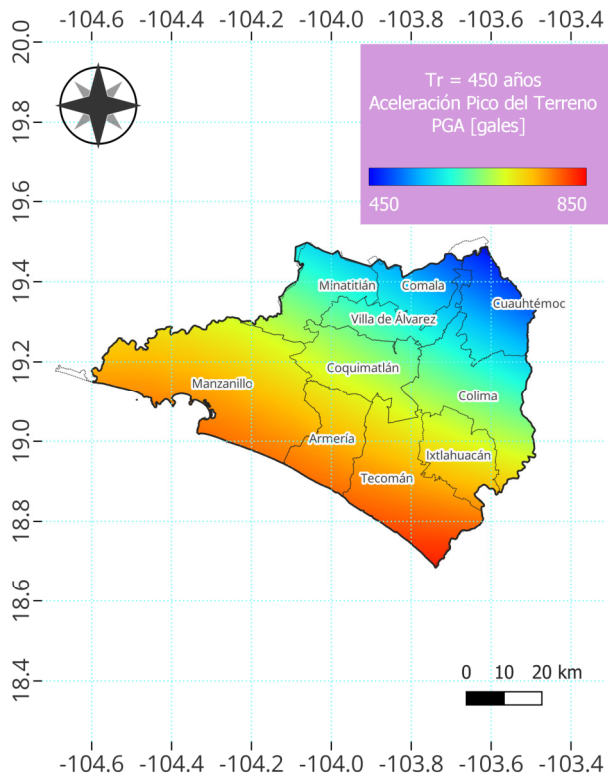


Fig. 18 Mapa de Peligro Uniforme para el estado de Colima, Acceleración Pico del Terreno (PGA) estimada para un periodo de retorno de 450 años.

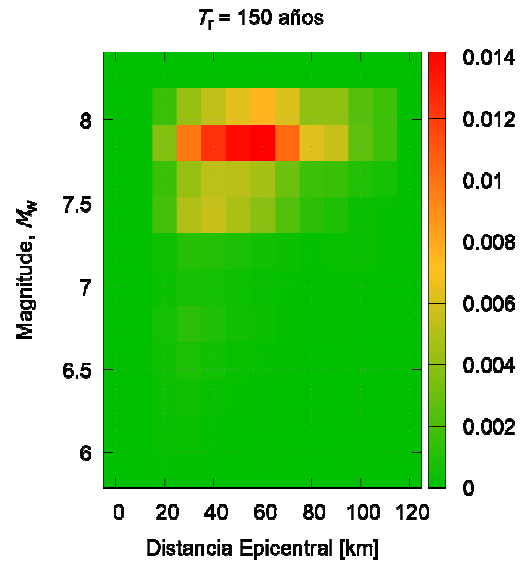


Fig. 19 Mapa de calor de la desagregación del peligro sísmico para el municipio de Manzanillo, asociado a un periodo de retorno de 150 años.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio presentó una revisión exhaustiva del peligro sísmico en el estado de Colima, México, mediante un enfoque probabilista (PSHA). Para ello se propuso una nueva regionalización sismogénica basada en un catálogo de sismos actualizado y depurado; en específico, el conjunto de datos considerado para el análisis de sismicidad de la zona en estudio consistió en 842 registros sísmicos que se ubican entre 1806 y 2018. Asimismo, se analizó la distribución espacial, temporal y de magnitud de los eventos registrados dentro de la zona de estudio, estimándose, a través del método de regresión por mínimos cuadrados, los parámetros de sismicidad de los modelos de recurrencia Truncado de Gutenberg-Richter y de Sismo Característico. El cálculo del PSHA se realizó empleando el software R-CRISIS y a través de los resultados obtenidos se generaron las conclusiones siguientes:

- Las curvas de peligro sísmico obtenidas indican que conforme nos alejamos de la línea de costa, las aceleraciones pico del terreno tienden a disminuir significativamente, por el efecto de la lejanía de las fuentes de subducción. Por ejemplo, para un periodo de retorno $T_r = 475$ años, en la ciudad de Manzanillo se espera una Aceleración Pico del Terreno en Roca de 818 gales, mientras que en ciudad Cuauhtémoc es del orden de 530 gales y en la ciudad de Guadalajara de tan solo 120 gales, siendo casi siete veces menor a la esperada en la ciudad de Manzanillo.
- Los valores máximos de PGA se esperan en el municipio de Tecomán, en la colindancia con el estado de Michoacán, en donde, para un $T_r = 475$ años se estima una PGA del orden de 850 gales; en contraste, Cuauhtémoc es el municipio en donde se esperan los menores niveles de PGA, pues para el

mismo período de retorno se esperan valores cercanos a los 450 gales, 53% menores a los máximos esperados en la entidad. Por su parte, en el importante municipio de Manzanillo los valores de PGA esperados son de 411 y 786 gales, para períodos de retorno de 150 y 475 años, respectivamente.

- En el Atlas de Riesgo del estado de Colima, Ref. [21], para los períodos de retorno de 100 y 500 años, se reportan valores de aceleraciones máximas del terreno de 244 y 568 gales, respectivamente. Estos valores son 50% menores a los estimados a través del análisis de peligro sísmico probabilista que se presenta en este trabajo, sugiriendo la necesidad de visitar y actualizar el peligro sísmico del estado de Colima con el objetivo de salvaguardar la seguridad estructural de las principales obras de infraestructura.
- La comparación de los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en Roca determinados para la ciudad de Manzanillo a través del PSHA aquí presentado y el Manual de Obras Civiles para Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad, indica que, si bien el peligro sísmico estimado para periodos de retorno bajos es del mismo orden de magnitud, para periodos de retorno altos (475 años) las aceleraciones obtenidas superan hasta en un 20% a las recomendadas por dicho manual de diseño.

Adicionalmente, es importante mencionar que los resultados obtenidos corresponden a la respuesta en roca y no se han tomado en cuenta explícitamente los efectos de amplificación dinámica del suelo; sin embargo, los resultados generados serían de utilidad para realizar análisis de propagación de ondas y con ello estimar los niveles de amplificación dinámica que podrían presentarse en suelos blandos o de compacidad baja, esta condición estratigráfica es frecuente en las zonas costeras del estado de Colima.

Finalmente, la revisión del peligro sísmico aquí presentada sugiere la necesidad de visitar y actualizar los espectros de diseño sísmico y los mapas de peligro uniforme de aceleración pico del terreno (PGA) que se incluyen en la normatividad vigente, esto con el objetivo de salvaguardar la seguridad estructural y contribuir a una mejor planificación territorial, especialmente en ciudades con alta exposición sísmica y con infraestructura estratégica asociada a las industrias portuaria y minera, la cual requiere estándares de diseño asociados con mayores niveles de seguridad.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo técnico y financiero del Fondo de Apoyo a Publicaciones (FAP) del Tecnológico de Monterrey, Mexico, en la producción de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] V. M. Zobin and J. F. Ventura-Ramírez, "Vulnerabilidad sísmica de edificios residenciales y pronóstico de daños en caso de sismos fuertes en

- la ciudad de Colima," Sep. 01, 1999. <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/201>
- [2] R. Castillo-Aja and M. T. Ramírez-Herrera, "Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives," *Seismological Research Letters*, vol. 88, no. 1, pp. 144–158, Dec. 2016, doi: 10.1785/0220160133.
- [3] R. Guevara, V. Yutsis, N. Varley, J. Almaguer, A. Calderón-Moctezuma, and O. Guevara-Mansilla, "Geophysical determination of the Jalisco and Michoacán blocks boundaries along the Colima Graben," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 109, p. 103208, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jsames.2021.103208.
- [4] H. Ghofrani and G. M. Atkinson, "Forearc versus Backarc Attenuation of Earthquake Ground Motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, no. 6, pp. 3032–3045, Dec. 2011, doi: 10.1785/0120110067.
- [5] J. Dañobeitia *et al.*, "Crustal architecture at the collision zone between Rivera and North American Plates at the Jalisco Block: TSuJal Project," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 173, no. 10–11, pp. 3553–3573, Sep. 2016, doi: 10.1007/s00024-016-1388-7.
- [6] R. D. Müller, M. Sdrolias, C. Gaina, and W. R. Roest, "Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust," *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 9, no. 4, Apr. 2008, doi: 10.1029/2007gc001743.
- [7] C. DeMets and S. Traylen, "Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle," *Tectonophysics*, vol. 318, no. 1–4, pp. 119–159, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00309-1.
- [8] A. Cortés-Cortés, R. Saucedo-Girón, R. M. Uribe-Cifuentes, V. H. Garduño-Monroy, Z. Jiménez, and J. C. Gavilanes-Ruiz, "La falla Tamazula-límite suroriental del bloque Jalisco y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima, México," *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 15, no. 2, pp. 132–144, 1998.
- [9] R. Sawires, M. A. Santoyo, J. A. Peláez, and R. D. C. Fernández, "An updated and unified earthquake catalog from 1787 to 2018 for seismic hazard assessment studies in Mexico," *Scientific Data*, vol. 6, no. 1, p. 241, Oct. 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0234-z.
- [10] L. Esteva, and M. Ordaz, "Regionalización sísmica de la República Mexicana," *Revista Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica* 1.1 (1963): 31–35.
- [11] C. A. Cornell, "Engineering seismic risk analysis," *Bulletin of the seismological society of America* 58.5 (1968): 1583–1606.
- [12] S. L. Kramer, *GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING*. NePearson, (1996).
- [13] R. Youngs, and K. J. Coppersmith, "Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates" *Bulletin of the Seismological society of America* 75.4 (1985): 939–964.
- [14] R. Sawires, M. A. Santoyo, J. A. Peláez, and J. Henares, "Western Mexico seismic source model for the seismic hazard assessment of the Jalisco-Colima-Michoacán region," *Natural Hazards*, vol. 105, no. 3, pp. 2819–2867, Nov. 2020, doi: 10.1007/s11069-020-04426-6.
- [15] G. A. Parker, and J. P. Stewart, "NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors," *Earthquake Spectra* 38.1 (2022): 456–493.
- [16] N. Abrahamson, N. Gregor, and K. Addo, "BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes," *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 1, pp. 23–44, Feb. 2015, doi: 10.1193/051712eqs188mr.
- [17] N. A. Abrahamson, W. J. Silva, and R. Kamai, "Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions," *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1025–1055, Feb. 2014, doi: 10.1193/070913eqs198m.
- [18] CFE, "Manual de diseño de obras civiles-Diseño por sismo", Comisión Federal de Electricidad, México, C.1.3 2015.
- [19] CENAPRED. (2026) Atlas de Riesgos del Estado de Colima [Online]. Available: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=Colima&CVE_ENT=06
- [20] M. Ordaz, M. A. Salgado-Gálvez, and S. Giraldo, "R-CRISIS: 35 years of continuous developments and improvements for probabilistic seismic hazard analysis," *Bulletin of Earthquake Engineering* 19.7 (2021): 2797–2816.