

Análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa

Probabilistic seismic hazard analysis for the State of Sinaloa

Robespierre Chavez Lopez^{1*}, Edén Bojórquez Mora¹

RESUMEN

La evidencia existente muestra que los terremotos han afectado a la humanidad por siglos, por lo tanto, es necesario efectuar estudios que permitan conocer el comportamiento de este fenómeno para poder planificar y mitigar los grandes efectos producidos en todas las zonas con actividad sísmica presente. Una forma de conocer el comportamiento sísmico en un sitio es mediante el análisis de peligro sísmico probabilístico (APSP). En este estudio se evalúa el peligro sísmico para el Estado de Sinaloa, que es considerado como una región de sismicidad de moderada a alta; a pesar de ello, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de este tipo para esta región. Finalmente, los resultados del análisis de peligro sísmico para Sinaloa se expresan en curvas de peligro sísmico para algunas de las ciudades más importantes del Estado para un periodo estructural de un segundo y diferentes tipos de suelo, adicionalmente se trazan mapas de peligro sísmico para Ams (aceleración máxima del suelo) y periodos estructurales de 0.5s y 1s, considerando diferentes tipos de suelo, y para los dos periodos de retorno más utilizados por los códigos de diseño sísmico que son 475 y 2475 años; es decir, 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años respectivamente. Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de conocer las intensidades sísmicas y la distribución geográfica del peligro sísmico en la Región de Sinaloa.

ABSTRACT

The existing evidence shows that earthquakes have affected to the humanity for centuries, therefore, it is necessary to carry out studies that allow to know the behavior of this phenomenon in order to plan and mitigate the great effects produced in all the zones with present seismic activity. One way to know the seismic behavior in a site is through the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). In this study, the seismic hazard for the State of Sinaloa is evaluated, which is considered as a region of moderate to high seismicity; in spite of this, there have been few efforts to carry out studies of this type for this Region. Finally, the results of the seismic hazard analysis for Sinaloa are expressed in seismic hazard curves for some of the most important cities in the State for a structural period of a second and different types of soil, furthermore, seismic hazard maps for PGA (peak ground acceleration) and structural periods of 0.5s and 1s are also drawn, considering different types of soil and for the two return periods most used by seismic design codes that are 475 and 2475 years, that is, 10% and 2% probability of exceedance in 50 years respectively. This study was carried out with the purpose to know the seismic intensities and the geographical distribution of the seismic hazard in the Sinaloa Region.

Recibido: agosto 2017
Aceptado: octubre 2017
Publicado: marzo 2018

Palabras Clave:

Análisis de peligro sísmico probabilístico; mapas de peligro sísmico; aceleración espectral.

Keywords:

probabilistic seismic hazard analysis; seismic hazard maps, spectral acceleration.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del análisis de peligro sísmico probabilístico es cuantificar la frecuencia media anual de exceder una medida de intensidad sísmica [1-2]. Debido a la importancia del análisis de peligro sísmico probabilístico, se han desarrollado varios estudios para evaluar las curvas de peligro sísmico, mapas de

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Robespierre Chavez Lopez, robspierre_chavez@hotmail.com

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México, C.P. 80040

peligro sísmico, espectros de peligro uniforme, etc. En otras palabras, para estimar la probabilidad de exceder un parámetro de movimiento de suelo específico para diferentes sitios alrededor del mundo [3-7]. El uso de conceptos probabilísticos ha permitido considerar explícitamente las incertidumbres en el tamaño, localización y tasa de recurrencia sísmica, así como la variación de las características del movimiento sísmico con el tamaño y la ubicación del terremoto. El análisis de peligro sísmico probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar en una manera racional estas incertidumbres, proporcionando una evaluación más completa del peligro sísmico.

En los códigos de diseño sísmico, o en literatura de ingeniería sísmica y sismología, el cálculo del peligro sísmico probabilístico es expresado en términos de un parámetro que pueda describir la severidad de un movimiento sísmico, que se conoce como medida de intensidad sísmica. Actualmente, las medidas de intensidad sísmica más utilizadas para el análisis de peligro sísmico probabilístico son la aceleración máxima del suelo (A_{ms}) y la aceleración espectral en el primer modo de vibración de la estructura ($Sa(T_1)$). Aunque es importante mencionar que existen varias medidas de intensidad en la actualidad bastante prometedoras [10-18].

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo el análisis de peligro sísmico probabilístico para el Estado de Sinaloa en México, que es considerada como una región de sismicidad moderada a alta; sin embargo, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de este tipo para esta zona de México. Por lo tanto, en este estudio se obtienen curvas y mapas de peligro sísmico con la finalidad de conocer las intensidades sísmicas y la distribución geográfica del peligro sísmico en el Estado de Sinaloa.

2. SISMOLOGÍA EN MÉXICO

La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, enclavada dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico o anillo de fuego donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta (Servicio Geológico Mexicano). Se trata de una especie de anillo, de ahí su nombre, que está ubicado en las costas del océano pacífico y su principal característica es que concentra algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo.

La alta sismicidad en el país, es debido principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe, así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados, aunque estas últimas menos peligrosas. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de sismos (Servicio Geológico Mexicano).

El estudio de la actividad sísmica de México comenzó a principios del siglo XX; sin embargo, los antecedentes históricos de grandes sismos del país fueron registrados en un importante número de documentos. En 1910 se inauguró la red sismológica mexicana y desde esa fecha hasta nuestros días se ha mantenido una observación continua de los temblores cuyos registros se conservan en la Estación Sismológica de Tacubaya y otras instalaciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, encargada de operar el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y su red de estaciones sismológicas. El SSN reporta en el país, en promedio, la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$.

Existe otro grupo de trabajo en el Centro de Investigaciones y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), que enfoca su estudio entre otros aspectos, a la actividad sísmica asociada tanto al Golfo de California como a la falla de San Andrés, al igual que la Red Sismológica del Noroeste (RESNOR).

Por otra parte, en el año 2016 ocurrieron 15460 eventos sísmicos de acuerdo a los reportes emitidos por Servicio Sismológico Nacional. Las magnitudes de estos sismos van de 1.4 a 6.5. La distribución de los epicentros se concentra principalmente en los estados de la costa del Océano Pacífico, en el Istmo de Tehuantepec y en el Golfo de California (Ver Figura 1). También se presentaron algunos sismos en el centro y norte del País. Durante este año acontecieron 6 terremotos dentro del territorio mexicano de magnitud mayor o igual a 6.0, destacando entre estos el registrado el día 21 de enero a las 12:06 hrs, con una magnitud de 6.5 y su epicentro fue localizado en el Océano Pacífico a 277 km al oeste de Cihuatlan, Jalisco.

De acuerdo a la Figura 1 el territorio mexicano es una zona sísmicamente muy activa, uno de los eventos que son difíciles de olvidar para la población mexicana es el sismo ocurrido en septiembre 1985 en la ciudad de México, que causó la muerte de miles de personas y serios daños a la capital del país. Por lo tanto, las pérdidas sufridas por grandes terremotos en México, hacen clara la necesidad de realizar estudios

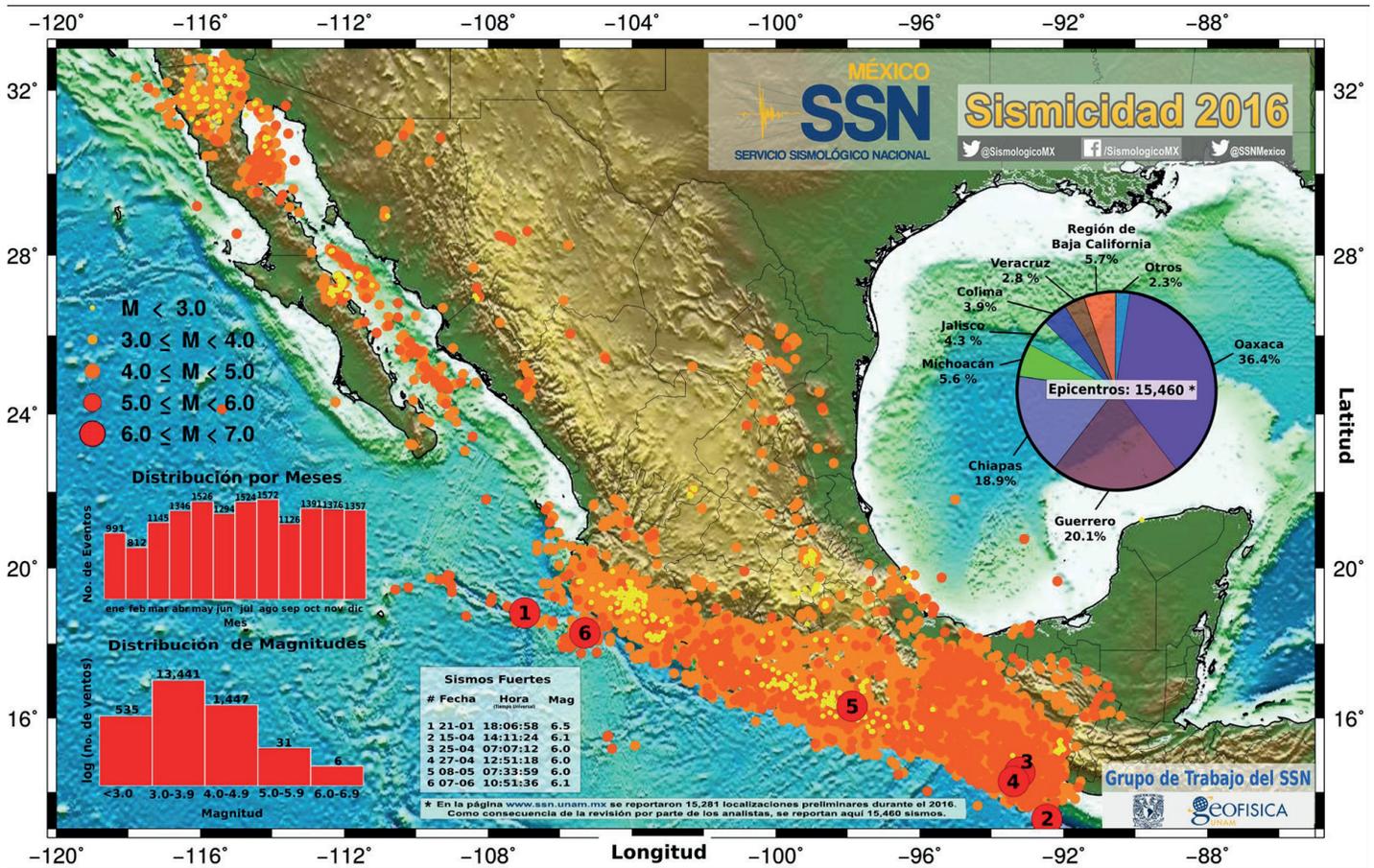


Figura 1. Mapa de sismicidad 2016.

de peligro sísmico en esas regiones que se encuentran expuestas a la actividad sísmica. Como se ilustrará a continuación, en el estado seleccionado de México llamado Sinaloa para calcular el peligro sísmico probabilístico es una región con moderada a alta sismicidad.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona noroeste de México, específicamente el Estado de Sinaloa, es considerada como una región de sismicidad moderada a alta; sin embargo, han sido pocos los esfuerzos en realizar estudios de peligro sísmico para esta área. En los últimos años la actividad sísmica se ha incrementado considerablemente en esta región, de aquí surge la necesidad de realizar estudios de peligro sísmico con la finalidad de estimar el potencial de un movimiento sísmico que pueda ocurrir en esta región, así como para obtener parámetros pre-

liminarios a ser utilizados para el diseño sísmico de estructuras seguras. La ubicación de Sinaloa se muestra en la Figura 2 con respecto al mapa de la República Mexicana.

Se debe tener en cuenta que dentro del área de estudio se seleccionaron 4 de las ciudades más importantes del Estado, que son las ciudades de Culiacán, Guasave, Los Mochis y Mazatlán (ver Figura 3), con el fin de evaluar el peligro sísmico de forma más detallada; es decir, obtener las curvas de peligro sísmico. En cada una de estas ciudades se tomó como sitio de estudio el centro histórico, que es donde se encuentran monumentos históricos y otro tipo edificaciones de gran valor cultural y económico.

4. PELIGRO SÍSMICO

El objetivo del análisis de peligro sísmico probabilístico es determinar el nivel de intensidad que podría

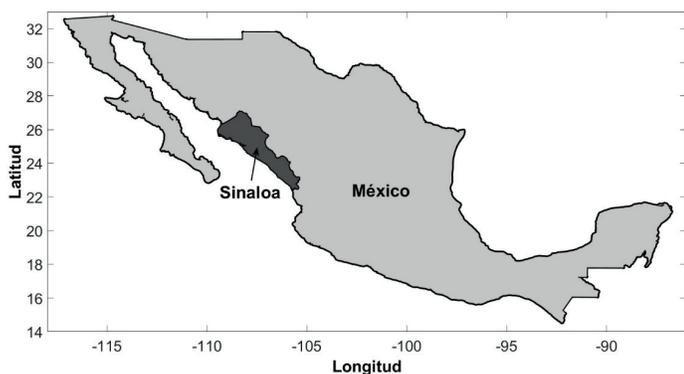


Figura 2. Ubicación del estado de Sinaloa.

ocurrir en diferentes partes de un área específica de estudio, considerando todos los posibles eventos sísmicos, junto con sus probabilidades asociadas de ocurrencia, con el fin de encontrar el nivel de intensidad de movimiento del suelo que sea igual o mayor que cierta tasa de excedencia [19]. El uso de los conceptos probabilísticos ha permitido considerar explícitamente el uso de las incertidumbres en el tamaño, ubicación y tasa de recurrencia de los sismos, así como en la variación de las características del movimiento sísmico con el tamaño y ubicación del terremoto. El análisis de peligro sísmico probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar en una manera racional estas incertidumbres, proporcionando una evaluación más completa de la amenaza sísmica.

El análisis de peligro sísmico probabilístico también puede ser descrito como un proceso de cuatro pasos [19]:

El primer paso, consiste en la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas. En la mayoría de los casos, a cada fuente se le asigna una distribución uniforme de probabilidades, lo cual implica que el terremoto tiene igual probabilidad de ocurrir en cualquier punto dentro de la fuente. Estas distribuciones se combinan luego con la geometría de la fuente para obtener las correspondientes distribuciones de probabilidad de la distancia de la fuente al sitio.

Enseguida, se debe caracterizar la sismicidad o distribución temporal de la recurrencia sísmica. Esto se realiza usando una relación de recurrencia que especifica la razón promedio en que un sismo de determinado tamaño será excedido. La relación de recurrencia permite considerar un tamaño máximo de terremoto, pero no se limita a considerar sólo ese terremoto.

Mediante el uso de relaciones de predicción (leyes de atenuación) se debe determinar el movimiento sísmico que puede ser producido en el sitio por te-

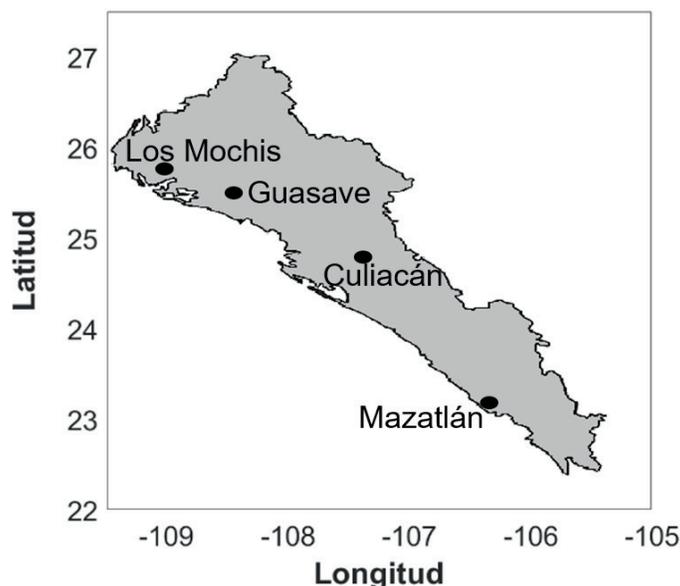


Figura 3. Sitios bajo estudio.

rrerotos de cualquier tamaño posible que ocurran en cualquier punto de la fuente. El método probabilístico permite considerar las incertidumbres inherentes a las relaciones de predicción o leyes de atenuación.

Finalmente, se combinan las incertidumbres en la ubicación, tamaño y en los parámetros de predicción del movimiento sísmico para obtener la probabilidad de que el parámetro del movimiento sísmico sea excedido durante un periodo particular.

El resultado final son curvas de peligro sísmico, donde un parámetro de movimiento de suelo tal como la aceleración máxima del suelo y la probabilidad media anual de excedencia de este parámetro son relacionados. Estas curvas son útiles porque a través de ellas es posible obtener espectros de peligro uniforme y mapas de peligro sísmico, que usualmente son la clave para definir las fuerzas sísmicas de diseño en una edificación provistas por los códigos sísmicos alrededor del mundo.

Las curvas de peligro sísmico pueden ser obtenidas para zonas fuentes individuales y combinadas con el fin de expresar el peligro total en un sitio particular. El concepto básico de los cálculos requeridos para desarrollar curvas de peligro sísmico es bastante simple. La probabilidad de exceder un valor particular, y^* , de un parámetro de movimiento de suelo, Y , es calculado para un posible terremoto en un lugar posible de la fuente y entonces multiplicado por la probabilidad de que un terremoto de magnitud particular pueda ocurrir en esa ubicación. El proceso es entonces repetido

para todas las magnitudes y localizaciones posibles con las probabilidades de cada suma. La formulación básica para el cálculo de las curvas de peligro sísmico se muestra en la Ecuación 1 [20].

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] \quad (1)$$

$$P[M = m_j] P[R = r_k]$$

donde λ_{y^*} es la tasa anual de excedencia, v_i es la tasa media anual de excedencia de una magnitud asociada a una fuente sísmica, $P[Y > y^* | m_j, r_k]$ es la probabilidad que algún parámetro del movimiento del suelo Y estimado para un sismo de una magnitud m_j y una distancia r_k , exceda cierto valor y^* , $P[M = m_j]$ es la probabilidad que una magnitud M sea igual a una magnitud m_j y $P[R = r_k]$ es la probabilidad que una distancia R sea igual a una distancia r_k . Las curvas de peligro sísmico pueden ser fácilmente combinadas con el modelo de Poisson para estimar probabilidades de excedencia en intervalos de tiempo finito. La probabilidad de excedencia de y^* en un periodo de tiempo T es dado por la Ecuación 2:

$$P[Y_T > y^*] = 1 - e^{-\lambda_{y^*} T} \quad (2)$$

5. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO: RESULTADOS NUMÉRICOS

En la actualidad existe una diversidad de programas computacionales para la estimación del peligro sísmico; sin embargo, en esta sección con la finalidad de evaluar el peligro sísmico de una manera más confiable se desarrolló un programa de computadora basado en parámetros de sismicidad actualizados. En la modelación de fuentes sísmicas se utilizó la división del territorio de la República Mexicana en unidades o zonas sismotectónicas dada por Zúñiga *et al.* (1997) [21] (Figura 4) y los parámetros de sismicidad para estas zonas fueron obtenidos por Mendoza (2012) [22]; además, la incertidumbre en la distribución de distancias de la fuente sísmica al sitio se tiene en cuenta mediante el uso de histogramas. Para ello se divide la zona fuente en una fina malla de 0.1 grados de separación entre puntos coordenados, el intervalo total de distancia es agrupado en varios intervalos; es decir, para caracterizar la distribución de distancias de la fuente al sitio, se determina que tantos segmentos forman parte de cada intervalo de distancias. Las ordenadas del histograma normalizado representan la frecuencia relativa que deberá ser igual a la probabilidad si un infinito número de segmentos se utiliza, pero que es una aproximación a la probabilidad en este caso. Similarmente, esto fue llevado a cabo para cada fuente sismotectónica. Por otra parte, para determinar el movimiento sísmico en un sitio se utilizó una ley

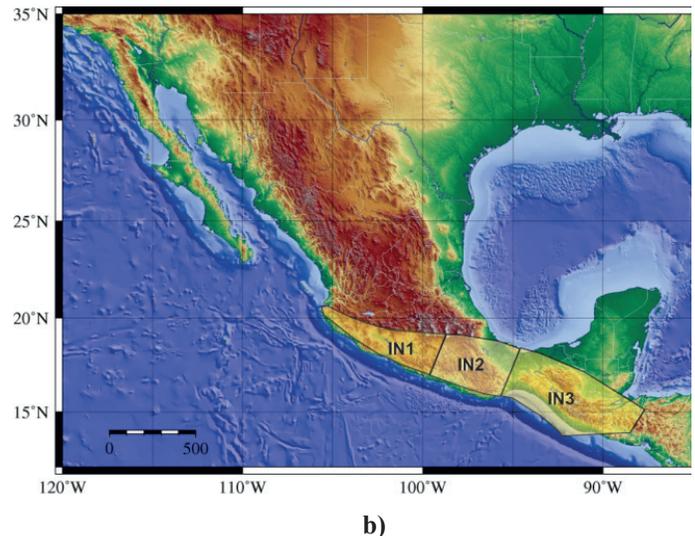
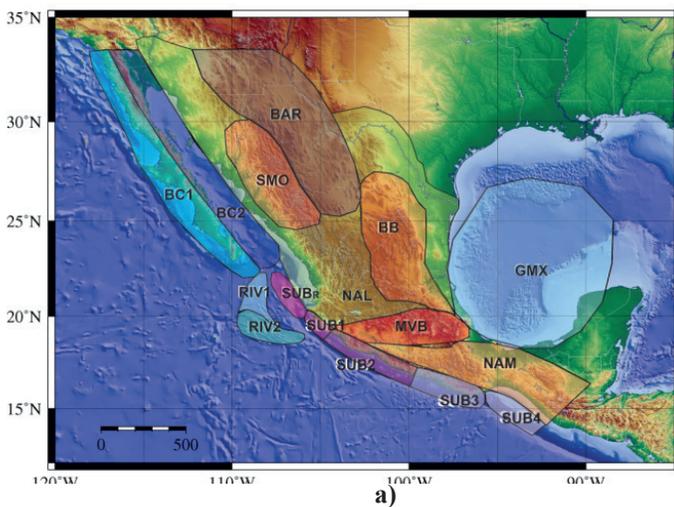


Figura 4. Zonas sismotectónicas de México: a) Regiones correspondientes a sismos de profundidad somera y b) Regiones de sismos de profundidad intermedia (Zúñiga *et al.*, 1997)

de atenuación obtenida para un sitio con características sismotectónicas similares a las del estado de Sinaloa, como lo es la relación de atenuación de Boore y Atkinson (2007)[23], que se define en la siguiente expresión:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T \quad (3)$$

En la Ecuación 1, F_M , F_D y F_S representan el escalamiento de la magnitud, función de distancia y amplificación del sitio, respectivamente. M es la magnitud momento, R_{JB} es la distancia de Joyner-Boore (definida como la distancia más cercana a la superficie de proyección de la falla, que es aproximadamente igual a la distancia epicentral para eventos de $M \leq 6$), y V_{S30} es la velocidad promedio de las ondas de cortante en los primeros 30 metros de profundidad en el sitio. ε es el número fraccional de desviaciones estándar de un solo valor predicho de $\ln Y$ lejos del valor medio de $\ln Y$ (e. g., $\varepsilon = -1.5$, sería 1.5 desviaciones estándar menor que el valor medio). Todos los términos, incluyendo el coeficiente σ_T , son periodo dependientes.

La metodología mostrada anteriormente para el análisis de peligro sísmico fue aplicada al Estado de Sinaloa, localizado en la región noroeste de México, en las costas del golfo de California. Debido a la insuficiencia de datos geológicos que nos permitan conocer los tipos de suelo a través de toda la región, en este trabajo se evaluó el peligro sísmico de acuerdo a la velocidad promedio de las ondas de cortante a 30 m de profundidad, que es un indicador del tipo de suelo en un sitio. La Tabla 1 muestra la relación entre la velocidad de ondas de cortante y el tipo de suelo de acuerdo a la clasificación de suelos NEHRP [24]

Generalmente diferentes niveles de peligro son tomados en cuenta en el análisis de peligro sísmico probabilístico. Los dos niveles de peligro considerados en este estudio son: 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años. El primer nivel de peligro basado en un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años es equivalente a un periodo de retorno de 475 años; este nivel de peligro se conoce como terremoto frecuente o diseño básico. El segundo nivel de peligro basado en un 2% de probabilidad de excedencia en 50 años es equivalente a un periodo de retorno de 2475 años; este nivel de peligro se conoce como terremoto de ocurrencia excepcional o máximo probable.

Tabla 1. Clasificación de suelos NEHRP

Tipo de suelo	Descripción	Velocidad promedio de las ondas de cortante (V_{S30}) (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca	760 - 1500
C	Roca blanda	360 - 760
D	Suelo rígido	180 - 360
E	Suelo blando	< 180

5.1 Curvas de Peligro Sísmico

Una forma de expresar el resultado final del análisis de peligro sísmico es a través de las curvas de peligro sísmico, que son de gran ayuda a la hora de evaluar la intensidad provocada por un terremoto en un sitio, donde el objetivo primordial consiste en determinar la tasa media anual de excedencia que supere un cierto nivel de movimiento sísmico en un sitio, para un intervalo de niveles de intensidad. Esta información puede resumirse como se muestra en la Figura 5, donde se observa que los niveles bajos de intensidad se superan con relativa frecuencia, mientras que las intensidades altas son raras. Si se contara con un amplio registro de terremotos en un sitio que abarcara miles de años, sería posible obtener esta curva completa experimentalmente, pero para este caso esto no es posible porque no se cuenta con suficientes datos para extrapolar en las tasas de interés. Además, se tienen que considerar las incertidumbres en el tamaño, la ubicación y la intensidad del movimiento sísmico. Debido a estos desafíos en el enfoque matemático para efectuar el análisis de peligro sísmico probabilístico como se mencionó anteriormente se deben combinar modelos matemáticos para la ubicación y el tamaño de potenciales terremotos para predecir la potencial intensidad causada por estos futuros terremotos [25].

La ventaja de los resultados obtenidos en este estudio es que las curvas están asociadas a distintos valores de la velocidad de ondas de cortante, por lo tanto, bastará con seleccionar la curva adecuada al tipo del suelo del sitio. En la Figura 5 se muestran las curvas de peligro sísmico para los cuatro sitios en estudio para un periodo estructural de un segundo y distintas velocidades promedio de ondas de cortante. Se observa como a medida que la velocidad promedio de ondas de cortante disminuye, se incrementa $Sa(T_y)$ para una tasa de excedencia en particular. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 475 años, la Tabla 2 indica los

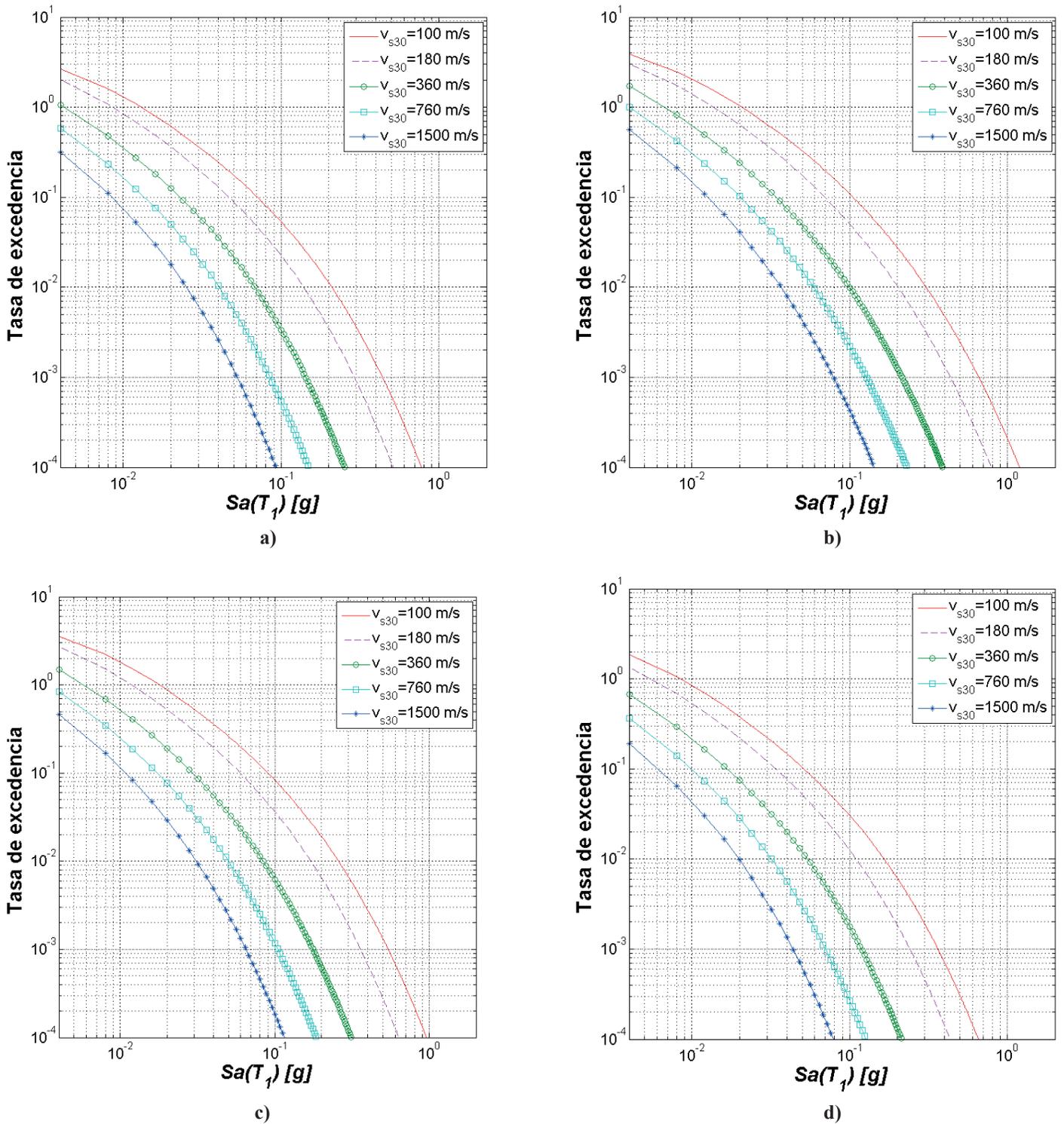


Figura 5. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para los sitios: a) Culiacán, b) Los Mochis, c) Guasave y d) Mazatlán

valores de $Sa(T_p)$ para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio Culiacán.

Tabla 2. Valores de la intensidad en términos de Sa para el sitio Culiacán y periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante con periodo de retorno de 475 años

Velocidad de ondas de cortante (V_{s30})	Sa [g]
100	0.37
180	0.25
360	0.12
760	0.07
1500	0.044

5.2 Mapas de peligro sísmico

Otra forma de expresar el resultado final del análisis de peligro sísmico es mediante mapas de peligro sísmico que se pueden obtener para cualquier región que cuente con los elementos necesarios para el cálculo de estos. Los mapas de peligro sísmico presentados en esta sección muestran la aceleración espectral máxima horizontal con 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años para diferentes tipos de suelo y considerando diferentes periodos estructurales. Algunos mapas de peligro sísmico son presentados en las Figuras 6 a 8. En estas figuras se puede observar la distribución del peligro sísmico. Aunque la distribución de las intensidades en términos de Sa en unidades de gravedad (g) para cada mapa es similar, note que el valor de la intensidad depende del tipo de suelo, probabilidad de excedencia y periodo estructural; por lo tanto, el intervalo de valores de intensidad para cada mapa de peligro sísmico es dado por la barra de color localizada en la parte derecha de cada figura, donde las intensidades más pequeñas son mostradas en azul y las intensidades más grandes en rojo.

Los mapas de peligro sísmico en las Figuras 6 a 8 muestran que la parte noroeste de la región de Sinaloa es la que se encuentra expuesta a un mayor peligro sísmico. Para el centro el peligro sísmico es menor que para la zona noroeste, y conforme se avanza a la parte sureste de la región de Sinaloa el peligro tiende a disminuir. Sin embargo, es importante resaltar que el peligro sísmico está presente en toda la región. La distribución del peligro sísmico observada se debe a la cercana distancia entre la región de Sinaloa y la

región sismotectónica BC2 (ver Figura 4), porque la actividad sísmica de dicha región es mayor en comparación con el resto de las otras fuentes que afectan al Estado. La Figura 6 ilustra la variación de las intensidades considerando un periodo estructural de 0.5 segundos y diferentes tipos de suelo, en este estudio representado por la velocidad promedio de las ondas de cortante. En el caso de un suelo blando con una velocidad promedio de las ondas de cortante de 100 m/s la intensidad alcanza 3.0g en términos de Sa (Figura 6a), para el caso de suelo rígido con velocidad promedio de las ondas de cortante de 180 m/s (Figura 6b) y roca blanda con velocidad promedio de las ondas de cortante de 360 m/s (Figura 6c) se obtienen valores de Sa iguales a 2.0 y 1.0g. Por otra parte, cuando el tipo de suelo es considerado como roca se aprecian intensidades de 0.7g (Figura 6d). Las intensidades para un suelo blando son de alrededor de un 50% más grandes que las obtenidas para un suelo rígido, mientras que para un suelo rígido son aproximadamente 100% más grande que para roca blanda. Esto indica que conforme el suelo incrementa su rigidez, la intensidad tiende a reducirse considerablemente.

Los mapas de peligro sísmico en las Figuras 7 y 8 son comparados para periodos de retorno de 475 y 2475 años considerando el mismo tipo de suelo mediante un valor similar de velocidad de ondas de cortante para aceleración máxima del suelo (A_{ms}) y un periodo estructural de un segundo. En general, se puede observar que los valores de intensidad en términos de Sa son alrededor de un 60% más grandes para el caso de un periodo de retorno igual a 2475 años sin importar el periodo estructural bajo consideración. Finalmente, el trabajo aquí presentado solamente se llevó a cabo para una región específica de México; sin embargo, el procedimiento es aplicable a otras regiones.

6. CONCLUSIONES

Se estimó el peligro sísmico para el Estado de Sinaloa. Los resultados obtenidos sugieren la importancia de la velocidad de ondas de cortante en la estimación de los mapas de peligro sísmico; en particular, cuando la velocidad de las ondas de cortante tiende a incrementar, los valores de intensidad de terremoto presentados en los mapas de peligro sísmico en términos de Sa para un sitio específico disminuyen. Por lo tanto, la tasa anual de excedencia de Sa es mayor para los suelos blandos.

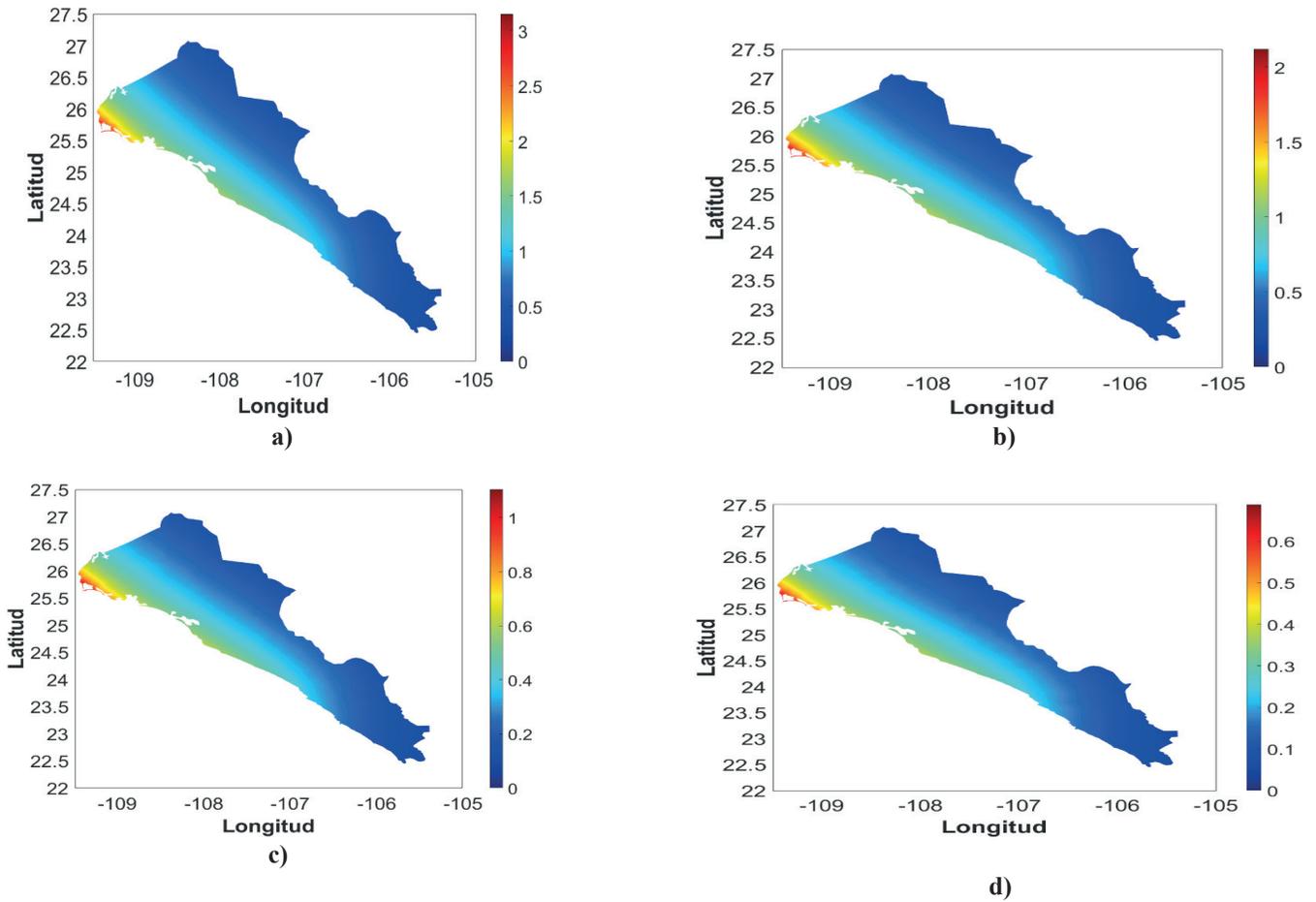


Figura 6. Mapas de peligro sísmico asociados a un periodo de retorno de 475 años y un periodo estructural de 0.5 segundos en términos de S_a (g) para velocidades de ondas de cortante de: a) 100 m/s, b) 180 m/s, c) 360 m/s y c) 760 m/s

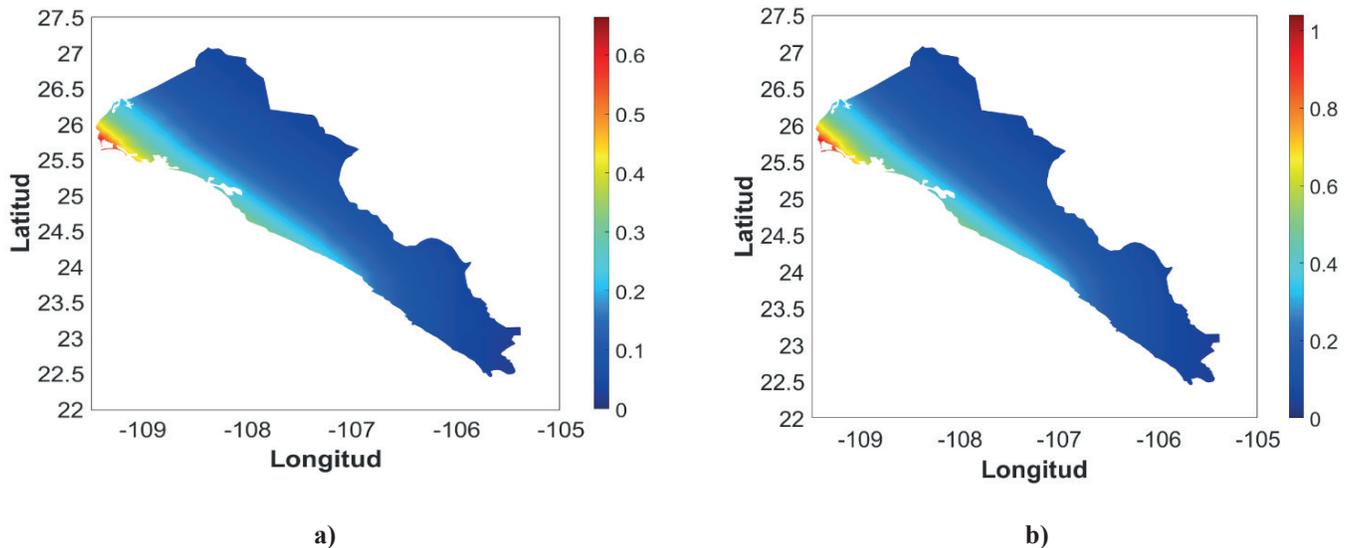


Figura 7. Mapas de peligro sísmico para A_{ms} con una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s en términos de S_a (g) asociados a periodos de retorno de: a) 475 años y b) 2475 años

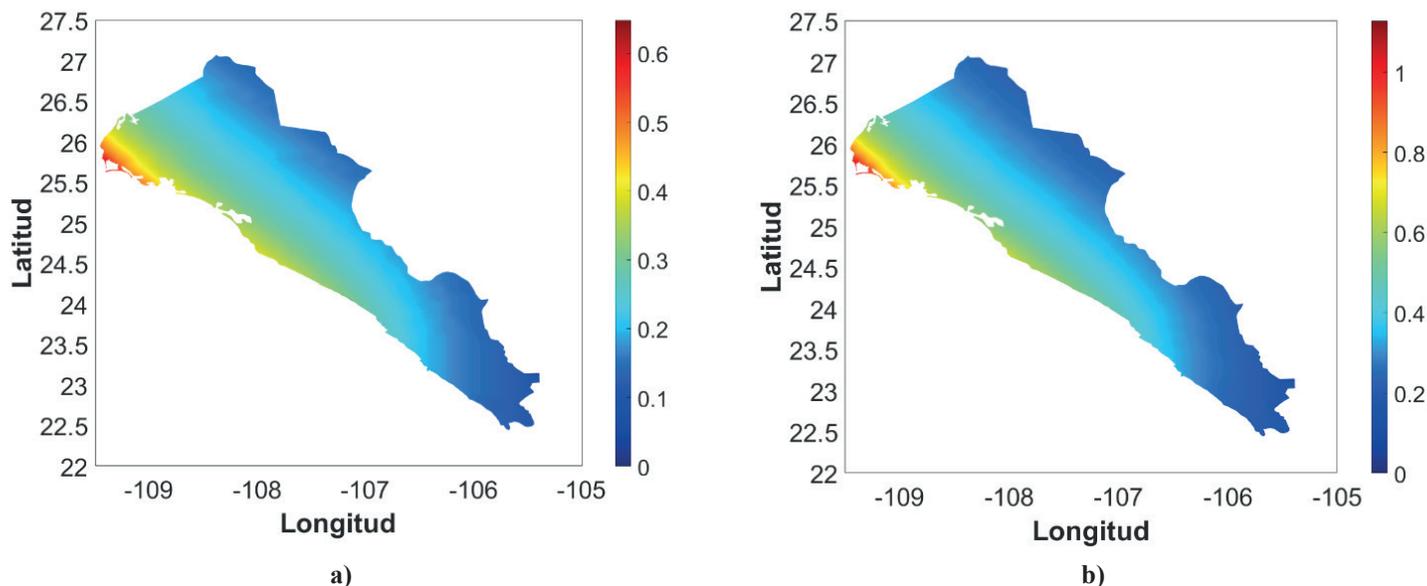


Figura 8. Mapas de peligro sísmico para una velocidad de ondas de cortantes de 360 m/s y un periodo estructural de un segundo en términos de S_a (g) asociados a periodos de retorno de: a) 475 años y b) 2475 años

Finalmente, con el análisis de peligro sísmico probabilístico desarrollado y la distribución geográfica de la región se concluye que la parte noroeste de la región de Sinaloa es la que se encuentra expuesta a un mayor peligro sísmico; en particular cerca de las Ciudades de Los Mochis y Guasave. Esto indica que las ordenadas espectrales de diseño (coeficiente sísmico requerido) son mayores para estos sitios. Para el centro de Sinaloa, donde está localizada la Ciudad de Culiacán Capital del Estado, el peligro sísmico es menor que para la zona noroeste, y conforme se avanza a la parte sureste de la región de Sinaloa el peligro tiende a disminuir. Sin embargo, es importante resaltar que en toda la región el peligro sísmico está presente, por lo tanto, las edificaciones deben diseñarse tomando en cuenta el efecto de los sismos en todo el Estado de Sinaloa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el apoyo económico brindado por El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto CB-01-167419 y la Beca otorgada al primer autor. Se agradece el apoyo de la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PROFAPI 2015.

REFERENCIAS

- [1] Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- [2] Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606.
- [3] Romeo, R., Paciello, A. y Rinaldis, D. (2000). Seismic hazard maps of Italy including site effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20, 85-92. DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00040-3
- [4] Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties. *Journal of Seismology* 8, 25-40. DOI: 10.1023/B:JOSE.0000009516.91044.51
- [5] Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G. y Boschi, E. (2008). A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics* 450, 85-108. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.01.003

[6] Leyton, F., Ruiz, S. y Sepulveda, S.A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology* 37:2, 455-472.

[7] Razeghi, H.R., Ghodrati, G., Razavian, S.A. y Rahimi, M.A. (2016). Probabilistic Seismic Hazard Analyses and Obtaining Uniform Hazard Spectra of Tabriz, Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20:5, 1813-1823. DOI: 10.1007/s12205-015-0175-9

[8] Housner, G.W. (1952). Spectrum intensities of strong motion earthquakes, Proceedings. Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute.

[9] Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants, edited by R. J. Hansen, MIT Press, Cambridge, MA, 438-483.

[10] Von-Thun, J.L., Rochin, L.H., Scott, G.A. y Wilson, J.A. (1988). Earthquake ground motions for design and analysis of dams. In: Earthquake engineering and soil dynamics: II. Recent advance in ground-motion evaluation. Geotechnical Special Publication 20, ASCE. New York, 463-81.

[11] Shome, N. y Cornell, C.A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Reliability of Marine Structures Program, Report No. RMS-35, Department of Civil Engineering, Stanford University.

[12] Córdova, P.P., Dierlein, G.G., Mehanny, S.S.F. y Cornell C.A. (2001). Development of a two parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. The second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforce Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, 187-206.

[13] Riddell, R. y Newmark, N.M. (1979). Force-deformation models for nonlinear analysis. *J. Struct. Div.* 105:12, 2773-2778.

[14] Baker, J.W. y Cornell, C.A. (2005). A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 34, 1193-1217. DOI: 10.1002/eqe.474

[15] Bojórquez, E. y Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 996-1008. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006

[16] Buratti, N. (2012). A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures. The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 September.

[17] Modica, A. y Stafford, P. (2014). Vector fragility surfaces for reinforced concrete frames in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering* 12:4, 1725-1753. DOI: 10.1007/s10518-013-9571-z

[18] Bojórquez, E. y Iervolino, I. (2011). Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 996-1008. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006

[19] Bojórquez, E., Baca, V., Bojórquez, J., Reyes-Salazar, A., Chávez, R., & Barraza, M. (2017). A simplified procedure to estimate peak drift demands for mid-rise steel and R/C frames under narrow-band motions in terms of the spectral-shape-based intensity measure INp. *Engineering Structures*, 150, 334-345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.046>

[20] Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis - issues and insights, Columbia University Press, New York. 254 p.

[21] Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.

[22] Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V. (1997). Proyecto: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190.

[23] Mendoza, A. (2012). Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. Tesis de Maestría, UNAM.

[24] Boore, D.M. y Atkinson, G.M. (2007). Boore-Atkinson NGA ground motion relations for geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. PEER 2007/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

[25] Building Seismic Safety Council National Institute. (2003). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450).

[26] Baker, J.W. (2008). An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). White Paper, Version 1.3, 72pp.

[27] Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/riesgos/sismos/sismologia-de-mexico>.

Semblanzas

Robespierre Chavez Lopez



Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería impartido por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en el año 2017 con mención honorífica, en 2012 adquirió el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS, y es egresado de la carrera de licenciado en ingeniería civil de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS, generación 2005-2010. Ganó el Premio a la Mejor Tesis de Posgrado 2013 a nivel Estatal otorgado por el Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación del Estado de Sinaloa (INAPI). Ha contribuido en la elaboración de 15 artículos científicos para revistas indizadas y congresos. Realizó varias estancias de investigación en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y una estancia de investigación internacional en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actualmente se encuentra incorporado a la Facultad de Ingeniería Culiacán donde desarrolla líneas de investigación sobre temas de ingeniería sísmica e ingeniería estructural. Entre sus aportaciones científicas, destaca la elaboración de mapas de peligro sísmico para el estado de Sinaloa utilizando medidas de intensidad sísmica más eficientes.

Edén Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la FIC de la UAS con mención honorífica. Estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, grado con mención honorífica. **PREMIO** a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. **PREMIO** por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por la SMIS. **PREMIO** por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014 y las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la SMIE 2016. Estancia Posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II, Italia. Profesor-Investigador Repatriado por CONACYT a la Facultad de Ingeniería, UAS (2008-2009). **Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores**, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del **Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica**. Autor de casi 200 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Director de casi 50 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo de estudiantes de la UNAM, y ha supervisado a más de 20 estudiantes durante veranos de la investigación científica. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras y sísmica de mayor prestigio en el mundo. Ha impartido conferencias magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (Dubai). **Actualmente, Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas**. Es **Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español. En 2016 fue Galardonado con el Premio **Ingeniero Civil del Año** otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016-2017, y fue **VICEPRESIDENTE** de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica 2016-2017. Entre sus aportaciones científicas destaca la *creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto*, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavía y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa.

