

Marco Antonio Arciniega Galaviz

Peligro sísmico en zonas urbanas.

Evaluación probabilística
del Noroeste de México

Jose Rubén Melchor Meza
Francisco Antonio Valle Campos
Luis Angel Ahumada Aguilar



**Peligro sísmico en zonas urbanas.
Evaluación probabilística del Noroeste
de México**



astra
editorial

Peligro sísmico en zonas urbanas. Evaluación probabilística del Noroeste de México

Jose Rubén Melchor Meza
Francisco Antonio Valle Campos
Luis Angel Ahumada Aguilar



Peligro sísmico en zonas urbanas. Evaluación probabilística del Noroeste de México. Autor: Jose Rubén Melchor Meza, Francisco Antonio Valle Campos y Luis Angel Ahumada Aguilar — Sinaloa, México. 2024.

Publicación electrónica digital: descarga y online; detalle de formato: EPUB.

Primera edición

D. R. © copyright 2024. Jose Rubén Melchor Meza, Francisco Antonio Valle Campos y Luis Angel Ahumada Aguilar.

ISBN: **979-13-87631-38-3**

DOI: **<https://doi.org/10.61728/AE24004695>**



Edición y corrección: **Astra ediciones**

Se prohíbe la reproducción, el registro o la transmisión parcial o total de esta obra por cualquier sistema de recuperación de información, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, por fotocopia, cualquier otro existente o por existir; sin el permiso previo, por escrito, del titular de los derechos.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

Contenido

Resumen	9
Introducción	10
Antecedentes.....	11

Capítulo 1

Desafíos del análisis del peligro sísmico en zonas urbanas	15
--	----

Capítulo 2

Medidas de intensidad sísmica y peligro sísmico	19
2.1. Medidas de intensidad sísmica.....	21
2.1.1. Medida de intensidad Sísmica $S_a(T_1)$	21
2.2. Peligro sísmico	21
2.2.1. Análisis de peligro sísmico probabilístico	22
2.2.1.1. Identificación y evaluación de las fuentes sísmicas.....	24
2.2.1.1.1 Evidencia geológica	24
2.2.1.1.2 Evidencia tectónica.....	26
2.2.1.2. Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter.....	26
2.2.1.3. Zonas Sismotectónicas.....	28
2.2.1.3.1. Características de las zonas.....	29
2.2.1.3.1.1. Zonas de subducción	29
2.2.1.3.1.2. Zona SUB1	30
2.2.1.3.1.3. Zona SUB2	31
2.2.1.3.1.4. Zona MVB.....	31
2.2.1.3.1.5. Zona RIV1	32
2.2.1.3.1.6. Zona RIV2.....	32
2.2.1.3.1.7. Zona BC1.....	32
2.2.1.3.1.8. Zona BC2.....	33
2.2.1.3.1.9. Zona SMO	33
2.2.1.3.1.10. Zona BAR.....	33
2.2.1.3.2. Geometría de la fuente.....	34

2.2.1.4. Selección de la fuente de atenuación.....	36
2.2.2. Riesgo sísmico	43

Capítulo 3

Análisis del peligro sísmico probabilístico en el Noroeste de México.....	45
3.1. APSP Tijuana	46
3.1.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Tijuana	47
3.1.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Tijuana	48
3.1.3. Curvas de peligro sísmico para Tijuana	49
3.2. APSP Mexicali.....	52
3.2.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Mexicali	53
3.2.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Mexicali.....	55
3.2.3. Curvas de peligro sísmico para Mexicali	56
3.3. APSP Hermosillo	58
3.3.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Hermosillo..	59
3.4. APSP La Paz.....	64
3.4.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para La Paz	65
3.4.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para La Paz.....	66
3.4.3. Curvas de peligro sísmico para La Paz	68
3.5. APSP Culiacán	70
3.5.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Culiacán.....	70
3.5.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Culiacán	72
Conclusiones.....	77
Referencias	79
Lista de figuras.....	83
Lista de tablas	88

Resumen

A lo largo de la historia, los sismos han sido una amenaza constante para nuestro planeta. México, ubicado en una de las regiones con mayor actividad sísmica a nivel mundial, enfrenta la necesidad imperante de comprender estos fenómenos para anticipar y mitigar los daños en áreas propensas a terremotos. En este estudio de investigación, se aborda la evaluación del peligro sísmico en la zona noroeste de México mediante un análisis de peligro sísmico probabilístico (APSP). A pesar de su categorización como una zona sísmica de moderada a alta en el contexto nacional, la investigación en esta área ha sido limitada.

El resultado del análisis de peligro sísmico, para las zonas urbanas del noroeste de México, específicamente para los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, será expresado en curvas de peligro sísmico. Este estudio se realiza para las ciudades de mayor importancia de los estados mencionados previamente, considerando diferentes tipos de suelo y un periodo estructural de un segundo.

Desde los inicios de la ingeniería sísmica, se han investigado los movimientos sísmicos con el objetivo de determinar un parámetro que pueda describir la severidad de un terremoto. De tal manera, una medida de intensidad sísmica puede ser considerada como un parámetro que está relacionado con la demanda sísmica, lo cual permite disminuir la incertidumbre en la estimación de la respuesta estructural de edificios. Una de las medidas de intensidad sísmica más utilizadas a lo largo de los años fue la Aceleración Máxima de Suelo (A_{sm}). En la actualidad la pseudoaceleración espectral es la medida de intensidad sísmica más utilizada para el análisis de las estructuras, esta es medida en el periodo fundamental de vibración de la estructura de interés y se representa por $Sa(T_1)$.

De hecho, casi todos los códigos de diseño sísmico del mundo utilizan la $Sa(T_1)$ para realizar análisis de peligro y riesgo sísmico, y en general

para estimar la resistencia lateral requerida en un edificio partir de espectros de diseño sísmico; es decir, los espectros de diseño sísmico del mundo se basan en la $Sa(T_p)$.

Introducción

El objetivo principal de un análisis de peligro sísmico es determinar, de la forma más detallada, los niveles de movimiento del terreno que deberá resistir una estructura en específico. El nivel de desempeño, previamente determinado de cierta estructura, debe estar asociado al nivel de demanda sísmica, de tal manera los daños ocasionados por el evento sísmico puedan ser controlados. Por lo tanto, el desafío recae en manejar las diferentes incertidumbres que se presentan en un fenómeno sísmico, como son, la distancia al sitio, magnitud e intensidad de algún evento telúrico futuro avalado como sismo de diseño. Sin embargo, dada la falta de certeza en la predicción de sismos futuros se utiliza un análisis probabilístico de la amenaza sísmica con la finalidad de predecir con la menor incertidumbre posible las intensidades sísmicas en una región de interés. De modo que, los esfuerzos se deben enfocar en determinar la probabilidad de que la intensidad sísmica producida por un evento dado exceda una intensidad objetivo, que estaría asociado con el nivel de desempeño estructural deseado.

El análisis de peligro sísmico probabilístico se define como un procedimiento para evaluar la probabilidad de que un determinado grado de intensidad sísmica sea superado en un sitio y durante un tiempo determinado. Debido a la importancia de realizar un análisis de peligro sísmico probabilístico, muchos estudios de este tipo han sido elaborados para diferentes sitios alrededor del mundo [1-5]. Hacer uso de términos probabilísticos ha permitido estudiar explícitamente las incertidumbres en el tamaño, ubicación y tasa de recurrencia sísmica, así como el cambio en las características del movimiento sísmico referente al tamaño y la ubicación del terremoto. Con un análisis de peligro sísmico probabilístico es posible identificar, cuantificar y combinar en una manera razonable estas incertidumbres, proporcionando una valoración más completa del peligro sísmico. Comúnmente, al considerar los códigos de diseño

sísmico, el movimiento sísmico es referido en términos de una medida de la intensidad. En la actualidad, algunas de las medidas de intensidad sísmica más usadas para el análisis de peligro sísmico probabilístico es la aceleración máxima del suelo (A_{ms}) y la pseudo-aceleración espectral en el primer modo de vibración ($Sa(T_p)$).

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo el análisis de peligro sísmico probabilístico para la zona noroeste de México, comprendiendo los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, que es considerada como una zona de sismicidad moderada a alta; sin embargo, han sido pocos los esfuerzos para realizar estudios de este tipo para esta zona de México. Por lo tanto, en este estudio se obtienen curvas peligro sísmico y espectros de peligro uniforme con la finalidad de comprender las intensidades sísmicas y la asignación geográfica del peligro sísmico en estos estados.

Antecedentes

La zona noroeste de México, en específico los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, es considerada como una región de sismicidad moderada a alta. En los últimos años la actividad sísmica ha golpeado considerablemente en esta región, por tal motivo 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 preliminares a ser utilizados para el diseño sísmico de estructuras seguras. La ubicación de estos estados se muestra en el mapa de la República Mexicana, en la Fig. 2.1, además, en las Tablas 2.1 y 2.2 se ilustran las características de los sismos más importantes que han afectado estos estados.



Figura 2.1. Ubicación geográfica de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa.

Tabla 2.1. Eventos de mayor magnitud ocurridos en cada Estado, desde el año de 1900 a la fecha en base al registro del Servicio Sismológico Nacional. [6]

No	Estado	Magnitud	Fecha	Descripción
1	Baja California	7.2	04/04/2010	Causó daños en la infraestructura eléctrica lo que provocó la interrupción del suministro eléctrico en la ciudad de Mexicali y sus alrededores. Hubo afectaciones en las carreteras Tijuana-Mexicali, se reportaron algunas ventanas rotas en Tijuana y Ensenada, así como la caída de diversos postes de electricidad y teléfono. Dejo 4 muertos y 1218 lesionados entre los cuales muchos perdieron sus viviendas, se reportaron daños en sistema de canales de riego dejando alrededor de 60 000 hectáreas afectadas. A las horas posteriores, así como a días siguientes continuaron las réplicas, reportando la máxima de 5.7.
2	Baja California Sur	7.1	12/12/1902	No se encontró registro.
3	Sinaloa	7	08/12/1901	No se encontró registro.
4	Sonora	6.8	23/05/1918	No se encontró registro.

Tabla 2.2. Eventos de mayor magnitud ocurridos en cada Estado, de los últimos 20 años en base al registro del Servicio Sismológico Nacional. [6]

No	Estado	Magnitud	Fecha	Descripción
1	Baja California	7.2	04/04/2010	Causó daños en la infraestructura eléctrica lo que provocó la interrupción del suministro eléctrico en la ciudad de Mexicali y sus alrededores. Hubo afectaciones en las carreteras Tijuana-Mexicali, se reportaron algunas ventanas rotas en Tijuana y Ensenada, así como la caída de diversos postes de electricidad y teléfono. Dejo 4 muertos y 1218 lesionados entre los cuales muchos perdieron sus viviendas, se reportaron daños en sistema de canales de riego dejando alrededor de 60 000 hectáreas afectadas. A las horas posteriores, así como a días siguientes continuaron las réplicas, reportando la máxima de 5.7.
2	Baja California Sur	6.8	12/04/2012	Se registraron algunas cuarteaduras en viviendas. No hubo daños mayores.
3	Sinaloa	6.6	13/09/2015	No se reportaron daños.
4	Sonora	6.6	04/01/2006	No se reportaron daños.

Capítulo 1

Desafíos del análisis del peligro sísmico en zonas urbanas

La República mexicana está ubicada en una de las zonas sísmicamente más activas del mundo, la zona noroeste de México está localizada dentro del área llamada como el Cinturón Circumpacífico, esta zona es conocida por ser donde se concentra la mayor actividad sísmica de nuestro planeta [6].

Esta nación está rodeada de diferentes placas tectónicas, como lo son la placa del Pacífico, placa Norteamericana, placa de Rivera, placa de Cocos y la placa del Caribe, esto provoca que este país se encuentre expuesto a una alta sismicidad por la interacción de estas placas, además de algunas fallas locales existentes, aunque estas se consideran menos peligrosas. La Placa del Pacífico trata de alejarse de la placa Norteamericana, en otra región roza con la del Caribe y choca con las placas de Rivera y Cocos, lo que hace que se ocasione la incidencia de sismos [7].

Por otra parte, en el año 2021 ocurrieron 28 914 eventos sísmicos de acuerdo con los reportes emitidos por Servicio Sismológico Nacional. Las magnitudes de estos sismos van de 0.6 a 7.1. La distribución de los epicentros se concentra principalmente en los estados la costa del océano Pacífico, en el istmo de Tehuantepec y en el golfo de California (Ver Fig. 3.1). También se presentaron algunos sismos en el centro y norte del País. Durante ese año acontecieron dos terremotos dentro del territorio mexicano de magnitud mayor o igual a 6.0, destacando entre estos el registrado el día 7 de septiembre, a las 20:47 horas, con una magnitud de 7.1 y su epicentro localizado a 14 km al suroeste de Acapulco, Guerrero. De acuerdo con la Figura 3.1 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 de 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 de peligro sísmico en esas regiones que se encuentran expuestas a la actividad sísmica.

La ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud que generan intensidades elevadas de movimiento de suelo en un determinado sitio puede provocar daños significativos o el colapso (total o parcial) de estructuras desplantadas cercanas o directamente en el epicentro. Como

la incertidumbre para pronosticar la ocurrencia de un evento sísmico puede ser elevada, así como las demandas sísmicas que este induce a una estructura; se hace uso del análisis de peligro sísmico probabilístico para considerar dichas incertidumbres. Estas incertidumbres se toman en cuenta empleando modelos probabilísticos que consideran la actividad sísmica de la fuente y utilizando leyes de atenuación capaces de determinar la intensidad de un evento sismo en una determinada ubicación, en función de su magnitud en la fuente que lo provocó y la distancia entre la fuente y el sitio de interés.

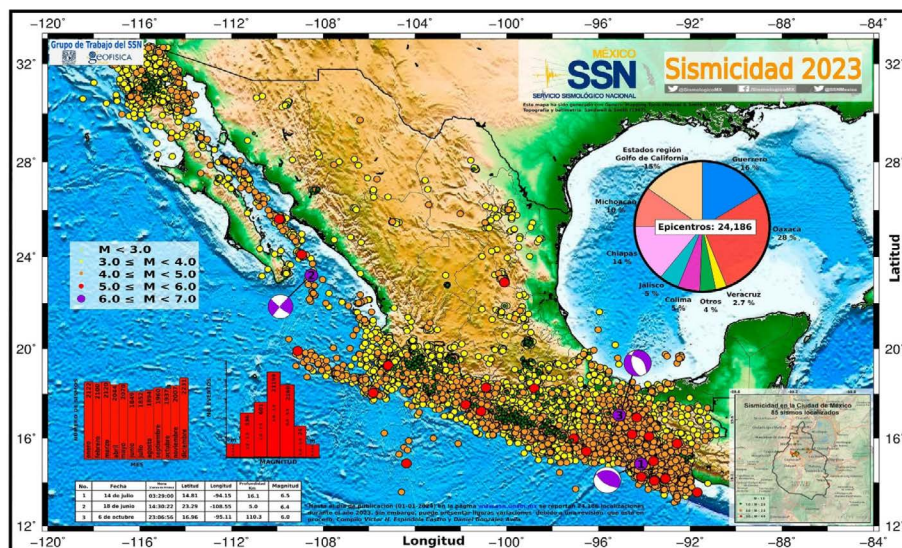


Figura 3.1. Mapa de Sismicidad 2023.

Los resultados del análisis de peligro sísmico permiten presentar los efectos que generan los sismos sobre un sitio en parámetros útiles para ingenieros, tales como, la aceleración máxima del suelo o las ordenas del espectro de respuesta de un oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento crítico del 5 %. Dichos resultados pueden ser presentados a través curvas de tasas de excedencia (CTE) y espectros de peligro uniforme (EPU), siendo este último el más útil para poder estimar la demanda sísmica a la cual puede estar sometida una estructura durante su vida útil, debido a la ocurrencia de un sismo.

Una aplicación lógica de los resultados del análisis de peligro sísmico probabilístico (APSP) es determinar los espectros de diseño sísmicos para los códigos de construcción o la planeación de acciones de emergencia ante posibles eventos extremos, las cuales se formulan con base en los valores de las intensidades medias del nivel de movimiento del suelo, considerando un periodo de retorno específico (T_r) o con una probabilidad de excedencia fija [8]. En México, el primer mapa de peligro sísmico que incluyó las intensidades del movimiento del suelo asociadas a un periodo de retorno específico fue publicado por Esteva [9], quien calculó mapas de aceleración y velocidad máxima del suelo de toda la República Mexicana, para 50, 100 y 500 años de T_r , estableciendo así, el primer mapa nacional de peligro sísmico en el mundo [10].

Debido a la frecuente y variada actividad sísmica durante los últimos años en el noroeste de México, ha surgido el interés y preocupación por realizar diseños estructurales de edificaciones adecuados a las condiciones de la región, ya que, debido a esta situación, y a la mayor información estadística disponible ciertos parámetros han cambiado como el periodo de retorno, magnitud máxima del sismo, entre otros. Por otro lado, uno de los requisitos de interés es aplicar los niveles de confiabilidad estructural necesarios, lo cual se puede lograr mediante el uso de espectros de tasa anual de falla uniforme, que se pueden obtener para cada uno de los sitios de interés de estos estados. Por ello, ante la falta de ellos en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, es importante la generación de estos, al menos para las ciudades de mayor importancia [11].

Capítulo 2

Medidas de intensidad sísmica y peligro sísmico

En este capítulo se describirá la información necesaria para llevar a cabo la evaluación del análisis de peligro sísmico probabilístico en un sitio o región. Esto con el fin de representar los efectos que generan los sismos en parámetros útiles para arquitectos, ingenieros, urbanistas, o cualquier persona interesada, como, por ejemplo: curvas de tasas de excedencia o espectros de peligro uniforme que permitan estimar la demanda sísmica a la cual puede estar sometida una determina estructura.

En los distintos países del mundo en donde su población se ve amenazada por la actividad sísmica es necesario poner mayor énfasis y cuidado en el diseño estructural de distintos tipos de obras civiles, esto con el fin de evitar en la medida de lo posible, pérdidas de vidas humanas y materiales ante la ocurrencia de un evento sísmico. Debido a que las incertidumbres para predecir la ocurrencia de un sismo son muy elevadas, así como las demandas sísmicas que este induce a una estructura; se hace uso del análisis de peligro sísmico probabilístico (de ahora en adelante se abreviara como APSP) para poder considerar estas incertidumbres, por medio de modelos probabilísticos con base en la actividad sísmica de la fuente y de modelos de atenuación capaces de determinar la intensidad de un sismo para una ubicación en específico, a partir de su magnitud en la fuente que lo género y la distancia entre la fuente y el sitio de interés.

La metodología del APSP fue desarrollado a mediados de los años sesenta, como resultado de la interacción entre dos investigadores Luis Esteva y C. Allin Cornell, cuyos trabajos sentaron la base de este tipo de análisis. Evaluar las frecuencias anuales de excedencia es el objetivo principal del APSP, considerando las intensidades medias del nivel de movimiento del suelo, en una ubicación en específico. Los resultados del APSP generalmente se expresan a través de una curva de peligro sísmico (frecuencia anual de excedencia vs. intensidad media del movimiento del suelo), también pueden ser expresados con un espectro de peligro uniforme (intensidad espectral vs. periodo estructural) considerando un periodo de retorno fijo o una tasa anual de excedencia.

2.1. Medidas de intensidad sísmica

Una medida de intensidad sísmica es la cuantificación de las características de un movimiento sísmico los cuales son importantes ya que nos permiten describir su potencial destructivo, así como también su capacidad para pronosticar la respuesta estructural (por ejemplo, duración del movimiento, frecuencia, amplitud, entre otros) [12].

2.1.1. Medida de intensidad Sísmica $Sa(T_1)$

La medida de intensidad sísmica pseudoaceleración espectral en el periodo fundamental de vibración, es la medida de intensidad sísmica más usada por códigos de diseño, estructuristas e ingenieros. Este parámetro es muy útil debido a que es el perfecto predictor de la respuesta sísmica de sistemas elásticos de un solo grado de libertad, al mismo tiempo, es una buena opción para predecir la respuesta de estructuras elásticas de múltiples grados de libertad dominadas por el primer modo de vibrar. Además, en algunos estudios se ha demostrado la suficiencia de $Sa(T_1)$ respecto a la magnitud y distancia [13].

2.2. Peligro sísmico

En el noroeste del país, así como en muchas áreas del mundo, la vida de las personas y sus actividades cotidianas se ven afectadas por los sismos, debido a esto es de vital importancia considerar el diseño de estructuras resistentes a sismos. El objetivo de un diseño sismo resistente es producir una estructura que pueda resistir una cierta demanda sísmica sin presentar un excesivo daño estructural o llegar al colapso. La especificación de la demanda sísmica o un parámetro de diseño sísmico para garantizar la seguridad de una edificación es uno de los problemas más difíciles e importantes para la ingeniería sísmica. Esto implica que es necesario realizar estudios e investigaciones que permitan conocer el nivel de demanda sísmica más probable que será de gran utilidad para poder planificar y mitigar los grandes efectos de los sismos. Una forma de conocer el posible grado de exposición sísmica de un lugar es mediante

la evaluación o Análisis de Peligro Sísmico, el cual permite predecir las posibles aceleraciones o intensidades sísmicas que podrían ocurrir en un sitio determinado.

El Análisis de Peligro Sísmico involucra la evaluación cuantitativa de la amenaza sísmica en un sitio específico. El peligro sísmico puede ser considerado de manera determinística, asumiendo un determinado terremoto escenario; o de forma probabilística, es decir, considerando explícitamente las incertidumbres en el tamaño, ubicación y tiempo de ocurrencia de los terremotos.

La ocurrencia de terremotos desastrosos nos reafirma la importancia del Análisis de Peligro Sísmico el cual nos permite estimar las consecuencias de estos eventos. Aun cuando se han logrado grandes avances en la predicción de la respuesta sísmica; el tiempo de ocurrencia, la magnitud o la ubicación de un terremoto no se pueden predecir aún con certeza. Por lo tanto, un adecuado Análisis de Peligro Sísmico, si bien no podrá eliminar en su totalidad el daño potencial, ayudará a reducir sus efectos considerablemente. [14-16].

Las curvas de peligro sísmico son utilizadas con la finalidad de determinar la probabilidad de excedencia para un parámetro de movimiento sísmico seleccionado considerando un periodo específico de tiempo. Las curvas de peligro sísmico relacionan una medida de intensidad y la probabilidad media anual de excedencia, a través de estas curvas es posible obtener espectros de peligro uniforme y estudios de peligro sísmico.

Para alcanzar los objetivos del presente trabajo, se seleccionaron las principales ciudades de cada estado del noroeste de México, como los sitios bajo estudio dentro de dicha región del país para realizar los Análisis de Peligro Sísmico en términos de $Sa(T_p)$ y con ello poder conocer de manera preliminar la forma en que se presenta la variación del peligro sísmico dentro la región.

2.2.1. Análisis de peligro sísmico probabilístico

Para llevar a cabo el APSP se requiere contar con información de todas las fuentes sísmicas que contribuyen al peligro sísmico del sitio en estudio, en términos de su geometría, sismicidad y de sus modelos de atenuación,

mediante los cuales es posible estimar el nivel de movimiento del suelo, ante la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud M , a una distancia R entre la fuente que lo originó y el sitio en estudio.

El análisis de peligro sísmico probabilístico también puede ser descrito como un proceso de cuatro pasos [17], los cuales son los siguientes:

1. Caracterización de las fuentes generadoras de sismos con influencia en el área del sitio en estudio, en términos de su geometría y de la distribución de probabilidad de los puntos de inicio de la ruptura en el área de falla definida. Usualmente se asume una distribución de probabilidad uniforme, lo cual implica que la ocurrencia de sismos se espera con igual probabilidad en cualquier lugar de la geometría de fuente definida.
2. Determinación de la sismicidad de las fuentes sísmicas consideradas, a través de registros históricos (catálogo sísmico) de eventos ocurridos sobre la geometría de las fuentes antes definidas, y de información de estudios de neotectónica y paleosismología para la fuente. La sismicidad se establece por medio de una curva de recurrencia de magnitudes, la cual es una relación específica para cada fuente que indica cual es la tasa de excedencia de una magnitud sísmica particular.
3. Selección de los modelos de atenuación (aceleración, velocidad o alguna otra que se requiera) más apropiados para el sitio en estudio que permitan estimar la intensidad del movimiento de suelo que genera un evento sísmico en un sitio en específico, partiendo de la magnitud del evento y de la distancia de la fuente al sitio de interés [17].
4. Finalmente, se combinan las incertidumbres asociadas a la localización, magnitud y atenuación obteniendo una curva de peligro, la cual indica la probabilidad de que una intensidad media esperada en un sitio, sea igualada o excedida en un periodo de tiempo determinado [18].

Para este estudio se consideran los sitios previamente definidos en los cuales, se desea realizar los análisis de peligro sísmico probabilístico, los sitios de interés se encuentran ubicados en cada estado de la región del noroeste de México con sismicidad moderada a alta.

2.2.1.1. Identificación y evaluación de las fuentes sísmicas

Para evaluar el peligro sísmico para un sitio particular o región, deben ser identificadas todas y cada una de las posibles fuentes de actividad sísmica al igual que su potencial para generar futuros sismos. La identificación de las fuentes sísmicas requiere de algún trabajo de investigación; sobre pistas que la naturaleza nos ha dejado, algunas que son obvias y otras que no son lo bastante claras, deben ser observadas e interpretadas.

La disponibilidad de sismógrafos modernos y redes sismográficas han hecho observación e interpretación de sismos de forma conveniente. La ocurrencia de grandes terremotos es actualmente registrada por una gran cantidad de redes de sismógrafos alrededor del mundo. Dentro de pocas horas de haber ocurrido un terremoto, los sismólogos son capaces de determinar su magnitud, localización, e incluso evaluar parámetros de la fuente. En 1990, eso era virtualmente imposible para un terremoto de magnitud significativa en cualquier parte del mundo.

La presente capacidad de identificar y localizar todas las fuentes sísmicas es un desarrollo relativamente reciente, particularmente comparado con las escalas de tiempo sobre la cual ocurren usualmente grandes terremotos. En realidad, si no han sido registrados instrumentalmente fuertes terremotos en un área particular, eso no garantiza que no hayan ocurrido en el pasado o que ellos no ocurrirán en el futuro. En la ausencia de registros instrumentales de sismos, otras pistas de actividad sísmica deben ser descubiertas. Estas deben tomar tanto la forma de evidencia geológica, así como también evidencia tectónica, o sismicidad histórica (preinstrumental).

2.2.1.1.1 Evidencia geológica

En la teoría de las placas tectónicas se asegura que la ocurrencia de sismos está guardada en los registros geológicos, primariamente en forma de desplazamientos, o desplazamientos relativos, de varios estratos. El estudio de los registros geológicos de la actividad de terremotos pasados se denomina paleosismología [19]. En algunas partes del mundo, estos

registros geológicos son fácilmente accesibles y relativamente fáciles de interpretar por un entrenado geólogo sísmico. En otras localizaciones los registros geológicos pueden ser muy complejos o pueden estar ocultos por capas de espesor de sedimentos recientes los cuales, no han sido desplazados por actividad sísmica. Es de vital importancia considerar la identificación de las fuentes sísmicas para la evidencia geológica, aunque a menudo parte difícil de un Análisis de Peligro Sísmico.

La búsqueda de evidencia geológica de fuentes sísmicas se centra en la identificación de las fallas. Una variedad de herramientas y técnicas están disponibles para los geólogos, incluyendo la revisión de literatura publicada; interpretación de fotografías aéreas y detección remota de imágenes (por ejemplo, fotografía infrarroja); reconocimiento de campo incluyendo el registro de trincheras; prueba de pozos y perforaciones; y técnicas geofísicas.

Algunos criterios para identificación de fallas se describen en numerosos libros de texto sobre geología estructural, campos de geología y geomorfología [20]. La siguiente lista de características que sugiere fallas es la de Reiter [17].

1. Fractura de superficie directamente observable e indicador de fractura. Estas incluyen ruptura de la superficie del suelo y evidencia del movimiento y afilado de los dos lados de la falla.
2. Indicadores geológicamente asignables. Estos incluyen la yuxtaposición de estratos de distintos materiales, ausentes o repetidos y el truncamiento de los estratos o estructuras.
3. Indicadores topográficos y geomorfológicos (superficies de relieve). Estos incluyen escarpes topográficos o facetas triangulares sobre crestas, desplazamiento de corrientes o drenaje, inclinación o cambios en elevación de terrazas o las costas, hundimiento de estanque (agua estancada por depresiones cerca de fallas de desgarre) y gradientes de corriente anormal.
4. Características geológicas secundarias. Estas incluyen cambios abruptos en los niveles de aguas subterráneas, gradientes, y composición química, alineación de manantiales o respiraderos volcánicos y la presencia de aguas termales.
5. Lineamientos sobre las imágenes teledetección. Estas pueden ser

- causadas por topografía, vegetación, o contrastes tonales.
6. Indicadores geofísicos de falla de subsuperficie. Estos incluyen la gravedad lineal fuerte o gradientes magnéticos, diferencias en velocidad de ondas sísmicas, y desplazamientos de reflexión horizontal sísmica.
 7. Indicadores geodésicos. Estos incluyen movimientos de fallas que aparecen en levantamientos geodésicos como inclinación y cambios en la distancia entre puntos fijos.

2.2.1.1.2 Evidencia tectónica

Las placas tectónicas y la teoría del rebote elástico nos dicen que los terremotos ocurren para disminuir la energía de tensión que se acumula como el movimiento relativo de las placas entre sí. La razón de movimiento debe ser relacionado a la razón de energía de tensión acumulada y también a la razón de energía de tensión liberada [21-23]. Para la mayoría de las zonas de subducción, L. Ruff y H. Kanamori [24] relacionaron la magnitud máxima con la razón de convergencia y la razón de la edad de la placa subducida de acuerdo con la ecuación (4.1). M_w

$$M_w = -0.0089T + 0.134V + 7.96 \quad (4.1)$$

Donde T es la edad en millones de años y V es la razón de convergencia en cm/año. T. H. Heaton y H. Kanamori [25] usaron esta expresión para indicar que la región de subducción Cascadia de las costas de Oregón, Washington y British Columbia podría ser capaz de generar grandes terremotos de magnitud mayor a 8. Subsecuentemente, se descubrió evidencia geológica de grandes terremotos históricos [26] a lo largo de la costa de Washington y Oregón.

2.2.1.2. Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter

Gutenberg y Richter [27] reunieron datos de terremotos del sur de California durante un extenso periodo de años y organizaron los datos conforme al número de terremotos que excedían diferentes magnitudes durante ese periodo de tiempo. Ellos dividieron el número de excedencia de

cada magnitud por la longitud del periodo de tiempo que define una tasa media anual de excedencia, λ_m , de un terremoto de magnitud m . Como se esperaba, la tasa media anual de excedencia de pequeños terremotos es mayor entonces que la de fuertes terremotos. El recíproco de la tasa anual de excedencia para una magnitud particular se refiere comúnmente como el periodo de retorno de terremotos que excedan esa magnitud. Cuando el logaritmo de la tasa anual de excedencia de terremotos del sur de California fue trazado contra la magnitud de los terremotos, se observó una relación lineal. La resultante ley de Gutenberg-Richter para recurrencia de terremotos fue expresada mediante la ecuación (4.2).

$$\log \lambda_m = a - bm \quad (4.2)$$

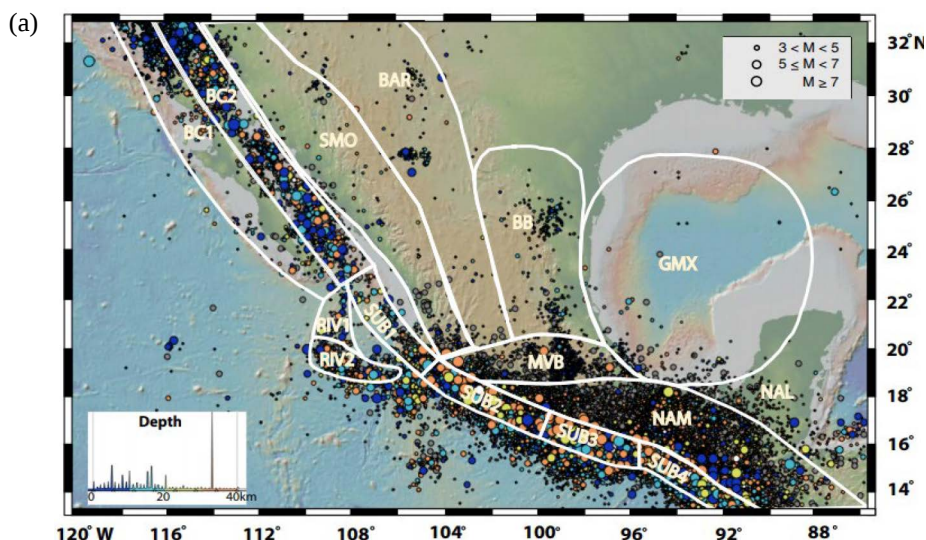
Donde λ_m es la tasa media anual de excedencia de magnitud m , 10^a es el número medio anual de terremotos de magnitud mayor o igual a cero, y b (el valor b) describe la probabilidad relativa de grandes y pequeños terremotos. Conforme el valor b aumenta, el número de terremotos de magnitud grande disminuye. La ley de Gutenberg-Richter no es restringida al uso de magnitud como un descriptor del tamaño del terremoto; la intensidad epicentral también ha sido utilizada.

Los parámetros a y b son generalmente obtenidos por regresión de una base de datos de la sismicidad de la zona fuente de interés. A menos que la zona fuente sea extremadamente activa, la base de datos es probable a ser relativamente escasa. Desde el uso de la sismicidad histórica e instrumental eventos son usualmente requeridos, la base de datos puede contener ambas magnitudes (posiblemente basadas en diferentes escalas) y datos de intensidad, necesitando la conversión de una medida de tamaño a la otra. En algunas áreas, los registros de sismicidad pueden ser distorsionados por la presencia de eventos dependientes tales como réplicas y temblores previos [28]. Aunque tales eventos dependientes pueden causar daño significativo, un APSP pretende evaluar el peligro de forma discreta, eventos independientes de energía sísmica. Por lo tanto, eventos dependientes pueden ser removidos de la base de datos sísmica y sus efectos representados por un análisis separado. La base de datos completa también puede ser utilizada. Los registros históricos

son usualmente más completos para grandes terremotos que para pequeños; terremotos pequeños pueden no ser detectados por una variedad de razones físicas y demográficas. Adecuando una línea recta tal como la implicada por la ley de Gutenberg-Richter a través de recurrencia de datos en que la tasa media de excedencia de pequeños terremotos es subestimada tendera a aplanar la línea. Como resultado, la tasa media real de pequeños terremotos será subestimada y la tasa media de grandes terremotos será sobrestimada. Existen diferentes métodos en la literatura [29-31] para corregir registros incompletos.

2.2.1.3. Zonas Sismotectónicas

En un estudio previo, Zúñiga [32] utilizó como base para obtener la división del territorio comprendido por México en unidades o zonas sismotectónicas un amplio conjunto de catálogos instrumentales e históricos. Esta regionalización no es considerada única; sin embargo, proporciona una división razonable y sistematizada que concentra una gran parte de los conocimientos sobre características generales de los terremotos en diferentes partes del país. Asimismo, estima el potencial destructivo de los eventos de mayor importancia que han ocurrido en el pasado.



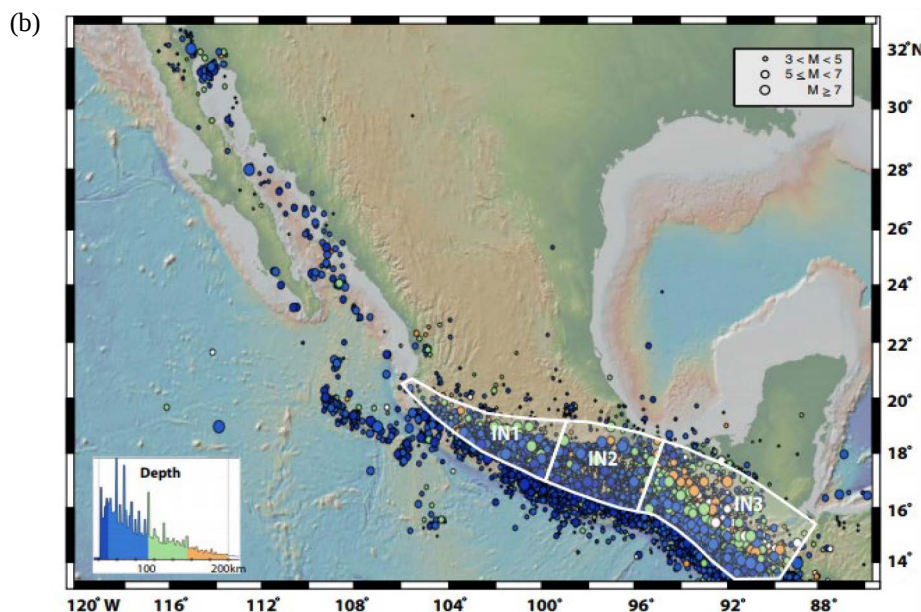


Figura 4.1. a) Regiones de sismicidad poco profundas ($h \leq 40$ km); b) Regiones de sismicidad de profundidad intermedia ($h > 40$ km). El trazado fue hecho para que magnitudes mayores aparezcan en la parte superior.

Esta regionalización se destina a ser utilizada como una herramienta en la definición de una zonificación de primer orden del peligro sísmico de México. En la Figura 3.1 se muestra la división del territorio de México en 18 regiones.

2.2.1.3.1. Características de las zonas

2.2.1.3.1.1. Zonas de subducción

Estas regiones comprenden las zonas de acoplamiento sismogénico de eventos someros (profundidad focal < 40 km), debido a la subducción de las placas de Rivera (RIV) y de Cocos (COC) debajo de las placas de América del Norte (NOAM) y del Caribe (CAR) (Fig. 4.1a). Las zonas de subducción tienen la mayor ocurrencia de eventos dañinos, por lo

tanto, la información sísmica detallada está disponible para estas regiones. Teniendo en cuenta las diferencias encontradas a lo largo de la zona de subducción, se subdividió en cuatro subregiones separadas: SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4. Los límites de estas subregiones se definieron siguiendo el límite de las áreas de réplica de gran subducción de eventos y lo que se sabe sobre la interfaz de la placa [33]. Esta subdivisión está de acuerdo con la segmentación del régimen de subducción en sur de México propuesto por Pardo y Suárez.

Tabla 4.1. Resultados de parámetros esperados para cada región. [32]

Region	Events	Time interval	b^a	a^a annual	M_c	T_{rec} estimated	T_{rec} observed
SUB1	310	2008–2011	0.55 ± 0.0	2.39 ± 0.0	2.8 ± 0.2	54 (≥ 7.5)	37 ± 37 (≥ 7.5) (4 events)
SUB2	7202	2002–2006	0.75 ± 0.01	3.95 ± 0.05	2.6 ± 0.2	47 (≥ 7.5)	12 ± 12 (≥ 7.5)
SUB3	9703	2007–2010	0.77 ± 0.01	4.2 ± 0.04	2.7 ± 0.03	37 (≥ 7.5)	13 ± 11 (≥ 7.5)
SUB4	3633	2005–2011	0.75 ± 0.03	4.07 ± 0.11	3.2 ± 0.02	36 (≥ 7.5)	25 (≥ 7.5) (2 events)
IN1	849	2003–2010	0.80 ± 0.01	3.5 ± 0.03	2.7 ± 0.05	125 (≥ 7.0)	(1 event)
IN2	2005	2003–2008	0.83 ± 0.02	3.77 ± 0.07	2.7 ± 0.02	109 (≥ 7.0)	11 ± 7 (≥ 7.0)
IN3	6510	2005–2010	0.82 ± 0.03	4.35 ± 0.09	3.0 ± 0.09	24 (≥ 7.0)	23 ± 22 (≥ 7.0)
BC1	2932	2005–2010	0.69 ± 0.01	2.92 ± 0.06	1.3 ± 0.01	16 (≥ 6.0)	29 (≥ 6.0) (2 events)
BC2	9737	2000–2010	0.57 ± 0.01	3.27 ± 0.05	1.4 ± 0.00	5 (≥ 7.0)	28 ± 45 (≥ 7.0)
SMO	148	2004–2013	0.65 ± 0.10	2.21 ± 0.37	3.0 ± 0.09	11 (≥ 5.0)	—
MVB	866	2005–2014	0.78 ± 0.04	2.9 ± 0.11	2.09 ± 0.05	60 (≥ 6.0)	8 (≥ 6.0) (2 events)
NAM	773	1998–2010	0.99 ± 0.02	4.15 ± 0.10	3.0 ± 0.04	6 (≥ 5.0)	17 (≥ 5.0) (2 events)
RIV1	26	—	—	—	—	—	—
RIV2	141	2009–2013	0.42 ± 0.0	2.02 ± 0.03	3.6 ± 0.2	5 (≥ 6.5)	33 ± 20 (≥ 6.5) (3 events)
GMX	129	2008–2014	0.77 ± 0.01	2.5 ± 0.06	2.8 ± 0.03	22 (≥ 5.0)	16 ± 20 (≥ 5.0)
BB	321	2004–2010	0.60 ± 0.11	1.88 ± 0.37	3.0 ± 0.04	104 (≥ 6.5)	—
BAR	259	2012–2013	0.68 ± 0.03	1.72 ± 0.11	2.9 ± 0.02	48 (≥ 5.0)	28 ± 19 (≥ 5.0)
NAL	—	—	—	—	—	—	—

2.2.1.3.1.2. Zona SUB1

El mecanismo focal determinado por Jaramillo y Suárez del mayor evento del extremo noroeste de la región SUB1 ($M_w = 6.4$), debajo del Escarpa Tres Marías, muestra fallamiento inverso en un Angulo alto. Aunque los grandes terremotos son poco frecuentes en esta región, algunos han alcanzado magnitudes tan grandes como $M_w = 8.2$. Durante los últimos 100 años, hubo cuatro eventos con magnitud $M_s > 7.5$ en esta región. Él

terremoto del 3 de junio de 1932, es el mayor instrumentalmente evento registrado en México ($M_w = 8.2$). El más reciente gran terremoto tuvo lugar el 9 de octubre de 1995 ($M_w = 8.0$). Otros hechos de importancia ocurrieron el 1 de enero de 1900 ($M_s = 7.4$) y el 30 de noviembre de 1934 ($M_s = 7.0$). El más largo Se considera acontecimiento histórico el 31 de mayo de 1818, con una magnitud estimada $M_w = 8.0$ [32].

2.2.1.3.1.3. Zona SUB2

Región SUB2 parece tener un desplazamiento acumulado más grande que las regiones vecinas, resultando de una mayor frecuencia de ocurrencia de grandes eventos sísmicos ($M_w \geq 7.0$). Sin embargo, su valor b (0.75 ± 0.01 , la Tabla 4.1) no difiere significativamente de la región de subducción adyacente al este (SUB3). El tiempo la variación de las estimaciones de los valores a y b muestra estabilidad desde 2002 hasta 2010. El aumento posterior tanto en valores pueden estar relacionados con recientes cambios en el funcionamiento de la red sísmica nacional. Se han incorporado varias nuevas estaciones sísmicas, y los cálculos de magnitud han experimentado algunos cambios recientes. Los tiempos de recurrencia estimados para los eventos $M_w \geq 7.5$ es algo mayor que la recurrencia derivada de los datos del catálogo, pero dentro de los límites de error. De este modo, los valores a y b observados son representativos de la sismicidad observada en esta región [32].

2.2.1.3.1.4. Zona MVB

Dos grandes terremotos han ocurrido en los pasados 100 años: el 19 de noviembre de 1912 ($M_s = 6.9$) y el 4 enero de 1920 ($M_s = 6.4$). Antes del período instrumental, se produjo el terremoto del 11 de febrero de 1875 ($M_w = 7.2$) cerca de la ciudad de Guadalajara, causando importantes daños en localidades vecinas. Quizás el mayor evento de este tipo sea el terremoto del 27 de diciembre de 1568. Las descripciones de los daños y los informes de fieltro indican que las iglesias recién construidas en esta área al suroeste de Guadalajara fueron destruidas y esa gran superficie se observó deformación en los suelos. Suárez, sugirió que la magnitud

de este evento fue de $M_w = 7.0$. [32].

2.2.1.3.1.5. Zona RIV1

Esta región incluye terremotos que ocurren en el este del Pacífico Oriental, en el límite entre las placas del Pacífico y de Rivera. Los mecanismos observados son en su mayoría son fallas normales. El valor b no pudo ser estimado debido a los datos limitados disponibles. No hay terremotos instrumentales $M_w > 6.0$ registrado en esta región [32].

2.2.1.3.1.6. Zona RIV2

Esta región corresponde a la falla transformada que forma el límite sur de la placa de Rivera. Los eventos en esta región muestran en su mayoría mecanismos de deslizamiento de rumbo. El valor b medio obtenido de 0.42 ± 0.00 es el más bajo estimado para todas las regiones sísmicas. La discrepancia entre lo observado y lo estimado en los tiempos de recurrencia para eventos $M_s \geq 6.5$ son significativos. Esta diferencia puede deberse a la falta de cobertura; el M_c estimado es el más grande de todas las regiones. Durante este siglo, 11 eventos $M_s > 6.0$ se han registrado en esta región. El más grande tuvo lugar el 29 de septiembre de 1950 ($M_s = 7.0$) [32].

2.2.1.3.1.7. Zona BC1

Esta zona incluye actividad sísmica asociada con sismos superficiales intraplaca en Baja California. La mayoría de los eventos ubicados en esta región tienen profundidades menores de 20 km. Estos eventos muestran modos mixtos de fallas resultantes de las tensiones inducidas por la interacción entre las placas del Pacífico y la de Norteamérica. Los eventos más grandes tienen magnitudes de $M_w = 6.0$. El valor b promedio de 0.69 ± 0.01 está entre los más pequeños valores medidos. La estabilidad temporal del valor b de 2005 a 2010 contrasta con una aparente disminución en un valor, aunque M_c permanece casi constante. Recurrencias observadas y estimadas para $M_w \geq 6.0$ no muestra diferencia significativa, aunque hay son solo dos hechos que corroboran este resultado [32].

2.2.1.3.1.8. Zona BC2

Mapas de intensidad para terremotos de magnitud similar sugieren que los choques en el norte de Baja California generan aceleraciones más altas que sus contrapartes en el Valle Imperial. Por ejemplo, el mapa de intensidad para el evento del Álamo de 1956 muestra un área de intensidad VI, que es unas 30 veces más grande que el área para la misma intensidad del terremoto del Valle Imperial de 1979. Esto a su vez se traduce en aceleraciones que son el doble de alto a distancias similares para el evento del Álamo que los del Valle Imperial [33]. El evento más reciente en esta región es el Terremoto de Mexicali del 4 de abril de 2010 con $M_w = 7.2$ [32].

2.2.1.3.1.9. Zona SMO

Esta zona de la Sierra Madre Occidental (SMO) es una región de muy baja actividad sísmica donde la cobertura sísmica ha sido tradicionalmente pobre. Desde 1964, solo cuatro eventos han sido registrados en esta región ($4.5 \leq M_b \leq 5.0$), sugirieron que esta región podría estar relacionada con la extensión de la provincia de estrés Rio Grande Rift hacia el sur. La sismicidad es poco conocida y no se han determinado mecanismos focales debido a la baja magnitud de los eventos ($M_b < 5.0$). La media del valor b estimado a partir de los datos instrumentales es 0.65 ± 0.10 algo similar a la de la región BB, en el noreste de México. Los valores a y b son estables desde alrededor de 2004 hasta 2013 [32].

2.2.1.3.1.10. Zona BAR

Esta región incluye sismos superficiales de la corteza terrestre ($h < 15$ km) en la continuación sur de las provincias de estrés de Cuenca y Cordillera y Rio Grande Rift. La sismicidad en esta región es baja y la cobertura de la red es escasa. Los mapas geológicos indican la presencia de fallas con mecanismos focales extensivos predominantemente horizontales. Este resultado concuerda con las observaciones de elongación del pozo que indican una dirección oeste-este para la tensión principal mínima.

El valor medio de b (0.68 ± 0.03) es similar al determinado para las regiones SMO y BB. La estabilidad temporal de estas estimaciones es incierta debido a escasez de datos, arrojando dudas sobre la fiabilidad de las estimaciones. Sin embargo, hay una pequeña diferencia entre los tiempos de recurrencia observados y estimados para eventos $M_s \geq 5$, sugiriendo que los parámetros son válidos [32].

2.2.1.3.2. Geometría de la fuente

Una clasificación de la geometría de las fuentes fue elaborada por Cornell [21], quien idealizó tres tipos de fuentes sísmicas y las cuales se modelan como:

- Fuentes puntuales: cuando la relación entre la distancia de la fuente al sitio comparada con las dimensiones de la falla es muy grande, o bien cuando se tiene una alta concentración de sismos en un área pequeña.
- Fuentes lineales: cuando la profundidad de un plano de falla es suficientemente pequeña de tal manera que la profundidad a la que ocurren los sismos dentro de la falla tiene poca influencia sobre la distancia hipocentral. En tal caso, el plano de falla puede ser simplificado con una mínima pérdida de precisión en el APSP, mediante la aproximación de la fuente plana como una de fuente lineal [20].
- Fuentes de área: cuando los datos disponibles no permiten determinar con precisión la geometría real de la fuente y además se observa una gran dispersión de epicentros sísmicos (originados con características similares, como mecanismos focales y patrones de fallamiento) en una determinada zona.

Dentro de las fuentes se asume por lo general que los sismos se distribuyen uniformemente, lo cual implica que la ocurrencia de un sismo se espera con igual probabilidad en cualquier punto de la geometría de la fuente definida. Sin embargo, una distribución uniforme dentro de la fuente no significa una distribución uniforme de la distancia de la fuente al sitio en estudio. La incertidumbre de la distancia de la fuente al sitio de interés puede ser descrita mediante una función de densidad de probabilidad la cual depende de la geometría de la fuente, la ubicación del

sitio y la magnitud del sismo considerado, tal y como se muestra en la Figura 4.2. [20].

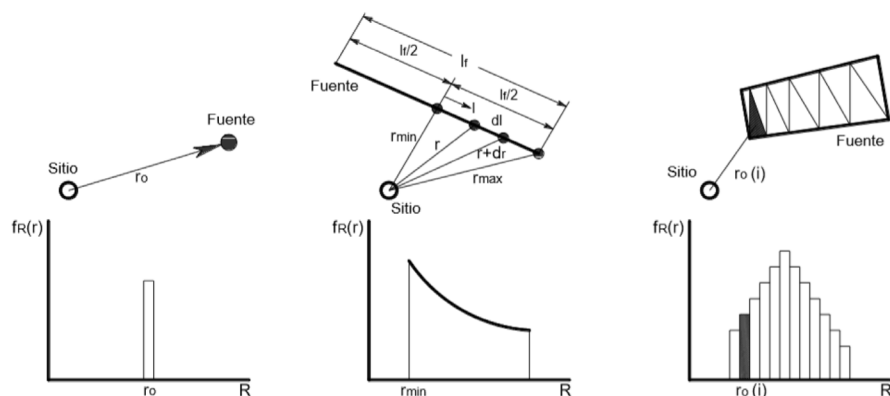


Figura 4.2. Ejemplos de la variación de la distancia de la fuente al sitio para diferentes geometrías de fuentes sísmicas (Adaptado de Kramer, 1996).

Para la geometría de fuente de los primeros dos casos (izquierda y centro) mostrados en la Figura 4.2, se conocen las expresiones analíticas para calcular la función de densidad de probabilidad (de ahora en adelante PDF, por sus siglas en inglés) de distancia; sin embargo, para el tercer caso se tiene que obtener de manera numérica.

Caso 1: Para la fuente puntual (Figura 4.2, izquierda), la distancia r entre la fuente y el sitio en estudio tendrá un único valor que será r_0 , por lo tanto, la probabilidad de que $r = r_0$ siempre será proporcional a 1 y la probabilidad de que $r \neq r_0$ es cero.

$$f_R(r) \propto 1 \quad (3)$$

Caso 2: Para la fuente lineal de longitud l_f (Figura 4.2, centro), cuyos extremos equidistan del sitio de estudio, se supone que, dada la ocurrencia de un evento sísmico en un punto de la falla, este tiene la misma probabilidad de ocurrencia en cualquier sitio a lo largo de la falla.

Si se supone que la variable l se distribuye uniformemente en el intervalo $(0, l_f/2)$. La distribución de probabilidad acumulada, $F_R(r)$ de r , es la siguiente:

$$F_R(r) = \frac{2\sqrt{r^2 - r_{min}^2}}{l_f} ; \quad r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (3.1)$$

Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad (PDF) de la variable es la siguiente:

$$f_R(r) = \frac{dF_R(r)}{dr} = \frac{2r}{l_f \sqrt{r^2 - r_{min}^2}} ; \quad r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (3.2)$$

Caso 3: Para las fuentes sísmicas con geometrías más complejas, es más fácil evaluar la PDF por métodos numéricos que analíticamente. La manera de diseñar esta función es la siguiente: para cada distancia $r_o(i)$ se determina la fracción del área de la fuente $\Delta_r(i)$ que se encuentra a esa distancia del sitio, con respecto al área total de la fuente sísmica. De esta manera, se obtiene un conjunto de pares $(r_o(i), \Delta_r(i))$, que al tabularlos conforman un histograma que se aproxima a la PDF de distancias $f_R(r)$.

2.2.1.4. Selección de la fuente de atenuación

Después de realizar un análisis respecto a las leyes de atenuación, se decidió trabajar con la ley de atenuación de Boore, Stewart, Seyhan and Atkinson (2014) debido a que es una ley reciente y es la que mejor se adapta a nuestro proyecto de investigación.

Utilizamos ecuaciones de predicción de movimiento en el suelo para calcular las intensidades debidas a terremotos en regiones tectónicas activas. Dichas ecuaciones de predicción de movimiento en el suelo (por sus siglas en inglés GMPE) se utilizan en aplicaciones de peligro sísmico para especificar los niveles esperados de intensidades en función de las variables predictoras, como la magnitud del terremoto, la distancia del sitio a la fuente y los parámetros del sitio [34].

Al igual que con Boore buscamos funciones simples para nuestros GMPE, con el menor número de variables predictoras requeridas para proporcionar un ajuste razonable a los datos [35].

$$\ln Y = F_E(\mathbf{M}, mech) + F_P(R_{JB}, \mathbf{M}, region) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, \mathbf{M}, region, Z_1) + \epsilon_n \sigma(\mathbf{M}, R_{JB}, V_{S30}) \quad (4)$$

Donde $\ln Y$ representa el logaritmo natural de una medida de intensidad tal como la Aceleración Máxima del Suelo (A_{ms}), Velocidad Máxima del Suelo (V_{ms}) o pseudoaceleración espectral (Sa); F_E , F_P , y F_S representan funciones para los efectos de fuente, trayectoria y efecto de sitio, respectivamente; ϵ_n es el número fraccionario de desviaciones estándar de un solo valor predicho de $\ln Y$ que se aleja de la media (por ejemplo, $\epsilon_n = -1.5$ es 1.5 desviaciones estándar más pequeñas que la media); y σ es la desviación estándar total del modelo. Las variables predictoras son $\mathbf{M}$, $mech$, R_{JB} (en km) donde $\mathbf{M}$ es la magnitud del momento, R_{JB} es la distancia más cercana a la proyección de la superficie del plano de falla, además de las variables región, V_{S30} (en m/s), y Z_1 (en km), en donde *región* es la zona geográfica en donde ocurre el evento, V_{S30} es la velocidad de onda de corte, y Z_1 es la Profundidad de la cuenca (km); profundidad desde la superficie del suelo hasta el horizonte de ondas de corte de 1 km/s. El Parámetro $mech = 0, 1, 2$ y 3 para U (no especificado), SS, NS y RS, respectivamente, donde U, SS, NS y RS son variables ficticias, con un valor de 1 para indicar el tipo de falla no específico, desgarre, deslizamiento normal y deslizamiento inverso, respectivamente, y 0 para el resto de los valores. El parámetro de región es 0 si no se debe realizar una corrección regional (valor predeterminado); 1 para California, Nueva Zelanda y Taiwán (esto tampoco proporciona corrección); 2 para China y Turquía; y 3 para Italia y Japón, donde:

- Las unidades de A_{ms} y Sa son g ; Las unidades de V_{ms} son cm/s.
- La función fuente (evento) está dada por:

$$F_E(\mathbf{M}, mech) = \begin{cases} e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_4 (\mathbf{M} - \mathbf{M}_h) + e_5 (\mathbf{M} - \mathbf{M}_h)^2 & \mathbf{M} \leq \mathbf{M}_h \\ e_0 U + e_1 SS + e_2 NS + e_3 RS + e_6 (\mathbf{M} - \mathbf{M}_h) & \mathbf{M} > \mathbf{M}_h \end{cases} \quad (5)$$

Donde U, SS, NS y RS son variables ficticias, con un valor de 1 para indicar el tipo de falla no específico, desgarre, deslizamiento normal y

deslizamiento inverso, respectivamente, y 0 para el resto de los valores donde:

Tipo de falla = 0 para falla no especificada

Tipo de falla = 1 para falla de desgarre

Tipo de falla = 2 para falla normal

Tipo de falla = 3 para falla inversa.

M_h , e_0 , e_1 , e_2 , e_3 , e_4 , e_5 y e_6 son coeficientes del modelo y dependen del período.

Tabla 4.2. Coeficientes de escala de magnitud

Periodo	e0	e1	e2	e3	e4	e5	e6
PGV	5.03700	5.07800	4.84900	5.03300	1.07300	-0.15360	0.22520
PGA	0.44730	0.48560	0.24590	0.45390	1.43100	0.05053	-0.16620
0.010	0.45340	0.49160	0.25190	0.45990	1.42100	0.04932	-0.16590
0.020	0.48598	0.52359	0.29707	0.48875	1.43310	0.05339	-0.16561
0.030	0.56916	0.60920	0.40391	0.55783	1.42610	0.06144	-0.16690
0.050	0.75436	0.79905	0.60652	0.72726	1.39740	0.06736	-0.18082
0.075	0.96447	1.00770	0.77678	0.95630	1.41740	0.07355	-0.19665
0.100	1.12680	1.16690	0.88710	1.14540	1.42930	0.05523	-0.19838
0.150	1.30950	1.34810	1.06480	1.33240	1.28440	-0.04207	-0.18234
0.200	1.32550	1.35900	1.12200	1.34140	1.13490	-0.11096	-0.15852
0.250	1.27660	1.30170	1.08280	1.30520	1.01660	-0.16213	-0.12784
0.300	1.22170	1.24010	1.02460	1.26530	0.95676	-0.19590	-0.09286
0.400	1.10460	1.12140	0.89765	1.15520	0.96766	-0.22608	-0.02319
0.500	0.96991	0.99106	0.76150	1.01200	1.03840	-0.23522	0.02912
0.750	0.66903	0.69737	0.47523	0.69173	1.28710	-0.21591	0.10829
1.000	0.39320	0.42180	0.20700	0.41240	1.50040	-0.18983	0.17895
1.500	-0.14954	-0.11866	-0.31380	-0.14370	1.76220	-0.14670	0.33896
2.000	-0.58669	-0.55003	-0.71466	-0.60658	1.91520	-0.11237	0.44788
3.000	-1.18980	-1.14200	-1.23000	-1.26640	2.13230	-0.04332	0.62694
4.000	-1.63880	-1.57480	-1.66730	-1.75160	2.20400	-0.01464	0.76303
5.000	-1.96600	-1.88820	-2.02450	-2.09280	2.22990	-0.01486	0.87314
7.500	-2.58650	-2.48740	-2.81760	-2.68540	2.11870	-0.08161	1.01210
10.000	-3.07020	-2.95370	-3.37760	-3.17260	1.88370	-0.15096	1.06510

La función de trayectoria está dada por:

$$F_P(R_{JB}, \mathbf{M}, region) = [c_1 + c_2(\mathbf{M} - \mathbf{M}_{ref})] \ln(R/R_{ref}) + (c_3 + \Delta c_3)(R - R_{ref}) \quad (6)$$

donde:

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2} \quad (7)$$

y c_1 , c_2 , c_3 , Δc_3 , M_{ref} , R_{ref} y h son coeficientes del modelo. El parámetro Δc_3 depende de la región geográfica, como se verá más adelante.

Tabla 4.3. Coeficientes de escala de distancia dependientes del período

Periodo	c1	c2	c3	h
PGV	-1.24300	0.14890	-0.00344	5.30000
PGA	-1.13400	0.19170	-0.00809	4.50000
0.010	-1.13400	0.19160	-0.00809	4.50000
0.020	-1.13940	0.18962	-0.00807	4.50000
0.030	-1.14210	0.18842	-0.00834	4.49000
0.050	-1.11590	0.18709	-0.00982	4.20000
0.075	-1.08310	0.18225	-0.01058	4.04000
0.100	-1.06520	0.17203	-0.01020	4.13000
0.150	-1.05320	0.15401	-0.00898	4.39000
0.200	-1.06070	0.14489	-0.00772	4.61000
0.250	-1.07730	0.13925	-0.00652	4.78000
0.300	-1.09480	0.13388	-0.00548	4.93000
0.400	-1.12430	0.12512	-0.00405	5.16000
0.500	-1.14590	0.12015	-0.00322	5.34000
0.750	-1.17770	0.11054	-0.00193	5.60000
1.000	-1.19300	0.10248	-0.00121	5.74000
1.500	-1.20630	0.09645	-0.00037	6.18000
2.000	-1.21590	0.09636	0.00000	6.54000
3.000	-1.21790	0.09764	0.00000	6.93000
4.000	-1.21620	0.10218	-0.00005	7.32000
5.000	-1.21890	0.10353	0.00000	7.78000
7.500	-1.25430	0.12507	0.00000	9.48000
10.000	-1.32530	0.15183	0.00000	9.66000

La función del sitio está dada por:

$$F_S(V_{S30}, R_{JB}, \mathbf{M}, region, Z_1) = \ln(F_{lin}) + \ln(F_{nl}) + F_{\delta Z_1}(\delta Z_1) \quad (8)$$

donde F_{lin} representa la componente lineal de la amplificación del sitio, F_{nl} representa la componente no lineal de la amplificación del sitio y $F_{\delta Z_1}$ representa los efectos de la profundidad de la cuenca. Los términos F_{nl} y $F_{\delta Z_1}$ dependen de la región. La justificación de la forma funcional de los términos F_{lin} y F_{nl} se da en SS14 [36]. La componente lineal del modelo de amplificación del sitio (F_{lin}) describe la escala del movimiento del terreno con V_{S30} para las condiciones de respuesta lineal del suelo (es decir, pequeñas deformaciones) de la siguiente manera:

$$\ln(F_{lin}) = \begin{cases} c \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{ref}}\right) & V_{S30} \leq V_c \\ c \ln\left(\frac{V_c}{V_{ref}}\right) & V_{S30} > V_c \end{cases} \quad (9)$$

donde c describe la escala de V_{S30} , V_c es la velocidad límite a partir de la cual los movimientos del terreno ya no se escalan con V_{S30} , y V_{ref} es la condición del sitio para la cual la amplificación es una unidad (tomada como 760 m/s). La función para el término F_{nl} es la siguiente:

$$\ln(F_{nl}) = f_1 + f_2 \ln\left(\frac{PGA_r + f_3}{f_3}\right) \quad (10)$$

donde f_1 , f_2 y f_3 son coeficientes del modelo y PGA_r es la aceleración horizontal máxima media para la roca de referencia (para un R_{JB} , M y región determinados, se obtiene PGA_r al evaluar la Ecuación 4 con $V_{S30} = 760$ m/s). El parámetro f_2 representa el grado de no linealidad en función de V_{S30} y se formula como:

$$f_2 = f_4[\exp\{f_5(\min(V_{S30}, 760) - 360)\} - \exp\{f_5(760 - 360)\}] \quad (11)$$

donde f_4 y f_5 son coeficientes del modelo.

El término $F_{\delta Z_1}$ es un ajuste al modelo base para considerar los efectos de la profundidad de la cuenca en la amplitud de movimiento del suelo. Este ajuste es el siguiente:

$$F_{\delta Z_1}(\delta Z_1) = \begin{cases} 0 & T < 0.65 \\ F_6 \delta Z_1 & T \geq 0.65 \text{ y } \delta Z_1 \leq f_7/f_6 \\ f_7 & T \geq 0.65 \text{ y } \delta Z_1 > f_7/f_6 \end{cases} \quad (12)$$

donde f_6 y f_7 son coeficientes del modelo, f_7/f_6 tiene unidades de km, y δZ_1 (también en km) se calcula como:

$$\delta Z_1 = Z_1 - \mu_{z1}(V_{S30}) \quad (13)$$

donde $\mu_{z1}(V_{S30})$ es la predicción de un modelo empírico que relaciona z_1 con V_{S30} . Para mayor comodidad, proporcionamos las relaciones a continuación para $\mu_{z1}(V_{S30})$ derivadas de datos en California y Japón:

$$\text{California: } \ln(\mu_{z1}) = \frac{-7.15}{4} \ln \left(\frac{V_{S30}^4 + 570.94^4}{1360^4 + 570.94^4} \right) - \ln(1000) \quad (14)$$

$$\text{Japón: } \ln(\mu_{z1}) = \frac{-5.23}{2} \ln \left(\frac{V_{S30}^2 + 412.39^2}{1360^2 + 412.39^2} \right) - \ln(1000) \quad (15)$$

donde μ_{z1} y V_{S30} tienen unidades de km y m/s, respectivamente. Estas relaciones se pueden usar para estimar una profundidad representativa z_1 para cualquier V_{S30} dado. Se puede apreciar que, en muchas aplicaciones, z_1 tal vez se desconoce; en ocasiones, se recomienda utilizar el valor predeterminado de $\delta Z_1 = 0.0$, que desactiva este factor de ajuste (es decir, $F_{\delta Z_1} = 0$). Esta es una condición predeterminada razonable porque los elementos restantes del modelo están “centrados” en una condición sin ajuste de $F_{\delta Z_1}$ como se describe más adelante.

$$\sigma(M, R_{JB}, V_{S30}) = \sqrt{\emptyset^2(M, R_{JB}, V_{S30}) + \tau^2(M)} \quad (16)$$

La desviación estándar total σ se divide en componentes que representan la variabilidad entre eventos (τ) y la variabilidad dentro del evento ($\emptyset$) de la siguiente manera:

$$\tau(M) = \begin{cases} \tau_1 & M \leq 4.5 \\ \tau_1 + (\tau_2 - \tau_1)(M - 4.5) & 4.5 < M < 5.5 \\ \tau_2 & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (17)$$

y la desviación estándar es dependiente de M , R_{JB} y V_{S30} viene dada por:

$$\emptyset(M, R_{JB}, V_{S30}) = \begin{cases} \emptyset(M, R_{JB}) & V_{S30} \geq V_2 \\ \emptyset(M, R_{JB}) - \Delta\emptyset_v \left(\frac{\ln(V_2/V_{S30})}{\ln(V_2/V_{S30})} \right) & V_1 \leq V_{S30} \leq V_2 \\ \emptyset(M, R_{JB}) - \Delta\emptyset_v & V_{S30} \leq V_1 \end{cases} \quad (18)$$

donde:

$$\emptyset(M, R_{JB}) = \begin{cases} \emptyset(M) & R_{JB} \leq R_1 \\ \emptyset(M) + \Delta\emptyset_R \left(\frac{\ln(R_{JB}/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \right) & R_1 < R_{JB} \leq R_2 \\ \emptyset(M) + \Delta\emptyset_R & R_{JB} > R_2 \end{cases} \quad (19)$$

y donde el dependiente de M está dado por:

$$\emptyset(M) = \begin{cases} \emptyset_1 & M \leq 4.5 \\ \emptyset_1 + (\emptyset_2 - \emptyset_1)(M - 4.5) & 4.5 < M < 5.5 \\ \emptyset_2 & M \geq 5.5 \end{cases} \quad (17)$$

Reconocemos que esta es una forma relativamente compleja para la incertidumbre aleatoria, que depende de M , R_{JB} y $VS30$.

2.2.2. Riesgo sísmico

El riesgo se define como la interacción de dos componentes: uno externo (Peligro) y otro interno (Vulnerabilidad) a la que se somete un sujeto, elemento o sistema y puede definirse de la siguiente manera: Peligro x Vulnerabilidad.

En el presente trabajo, el peligro está asociado a eventos sísmicos y puede ser expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto periodo de tiempo. Por otro lado, la vulnerabilidad es la predisposición intrínseca de un elemento a sufrir daño debido a las posibles acciones externas. En este estudio, relaciona los niveles de intensidad del agente perturbador con niveles de respuesta estructural en términos de distorsión relativa máxima de entrepiso del sistema.

Capítulo 3

Análisis del peligro sísmico probabilístico en el Noroeste de México

3.1. APSP Tijuana

Para el caso de Tijuana se seleccionó la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (FIT-UABC) ubicada en Ciudad Universitaria Campus Tijuana C. P. 22424, Tijuana, Baja California. Las coordenadas geográficas del sitio son: longitud 116.965728 W, latitud 32.532366 N. El lugar se encuentra a espaldas del Aeropuerto Internacional de Tijuana y contra esquina de Plaza Alameda Otay. En la figura 5.1 se muestra de manera gráfica la ubicación del sitio en estudio.

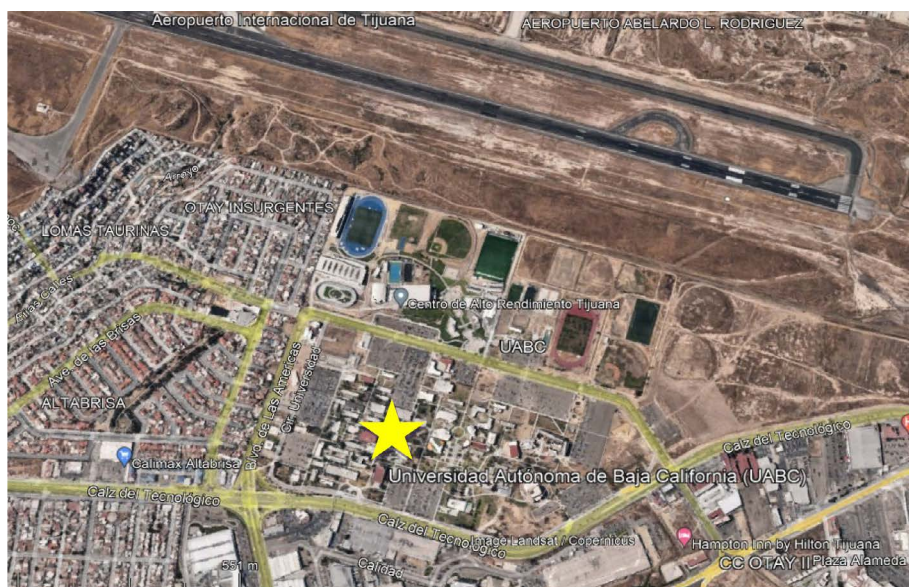


Figura 5.1. Ubicación del sitio en estudio FIT-UABC (indicado con estrella). (<https://maps.google.com.mx/>)

3.1.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Tijuana

Las fuentes sísmicas que afectan el sitio FIT-UABC son BC1, BC2 y SMO, mostradas en la Figura 5.2. Por otra parte, la Figura 5.3 ilustra la distribución de probabilidad de que se presente una cierta distancia para cada una de las fuentes sísmicas que afectan este sitio. Referente a la zona BC1, en esta se incluye una actividad sísmica asociada con sismos superficiales, la mayoría de los eventos en esta zona son sismos con profundidades menores a 20 km, en la zona BC2, algunos mapas de intensidad para terremotos de magnitud similar sugieren que los choques en el norte de Baja California generan aceleraciones más altas que sus contrapartes en el Valle Imperial, mientras que la zona SMO es una zona ubicada en la sierra madre occidental de baja intensidad sísmica.

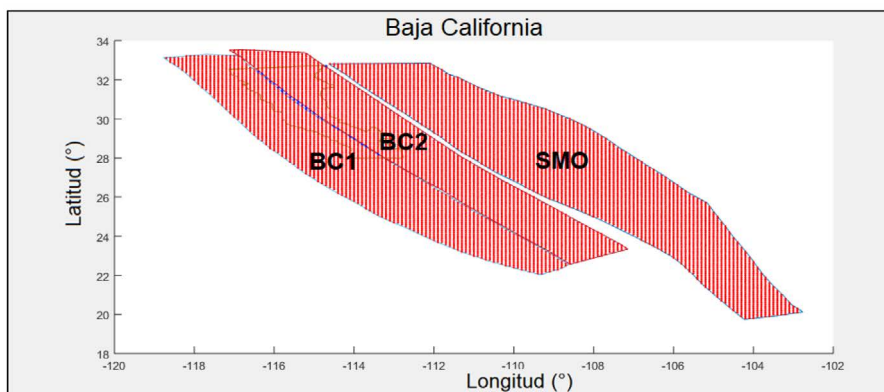


Figura 5.2. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (32.5, -116.9), ubicada en la ciudad de Tijuana.

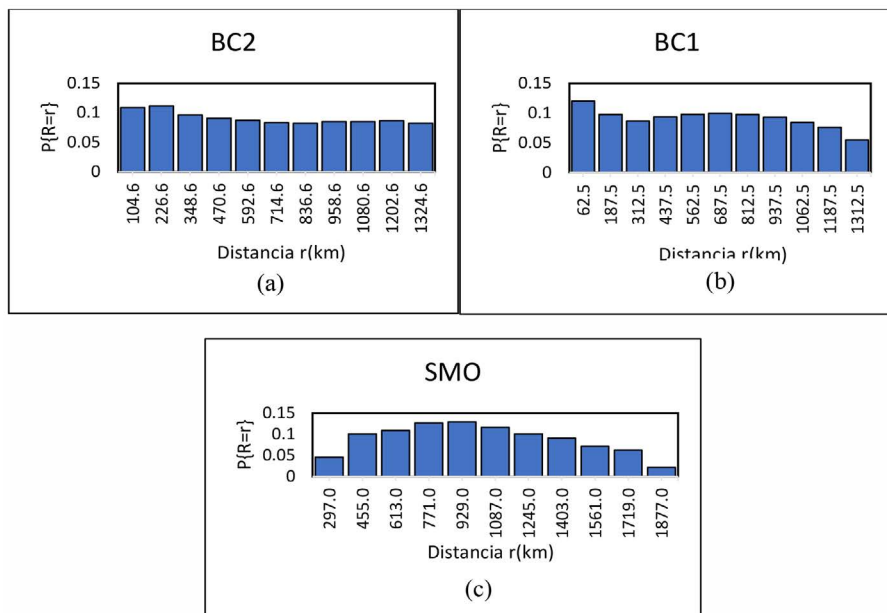


Figura 5.3a-c. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (32.5, -116.9) para Tijuana para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO.

3.1.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Tijuana

El potencial sísmico es diferente para cada fuente sísmica, de tal manera que la intensidad máxima que se podría presentar en cada zona sísmica es diferente. Para el caso de las zonas BC1, BC2 y SMO las magnitudes máximas que se podrían presentar son 6.0, 7.2 y 5.0, respectivamente. Estos eventos muestran modos mixtos de fallas resultantes de las tensiones inducidas por la interacción entre las placas del Pacífico y la de Norteamérica, para la zona BC1, recurrencias observadas y estimadas para $M_w \geq 6.0$ no muestra diferencia significativa, aunque hay solo dos hechos que corroboran este resultado. En la zona BC2, el evento más reciente en esta región es el Terremoto de Mexicali del 4 de abril de 2010 con $M_w = 7.2$, mientras que en la zona SMO desde 1964, solo cuatro eventos han sido registrados en esta región ($4.5 \leq M_b \leq 5.0$) sugirieron que esta

región podría estar relacionada con la extensión de la provincia de estrés Rio Grande Rift hacia el sur. La sismicidad es poco conocida y no se han determinado mecanismos focales debido a la baja magnitud de los eventos ($M_b < 5.0$). La Figura 5.4 muestra la distribución de probabilidad para magnitudes de las zonas sísmicas que afectan el sitio FIT-UABC.

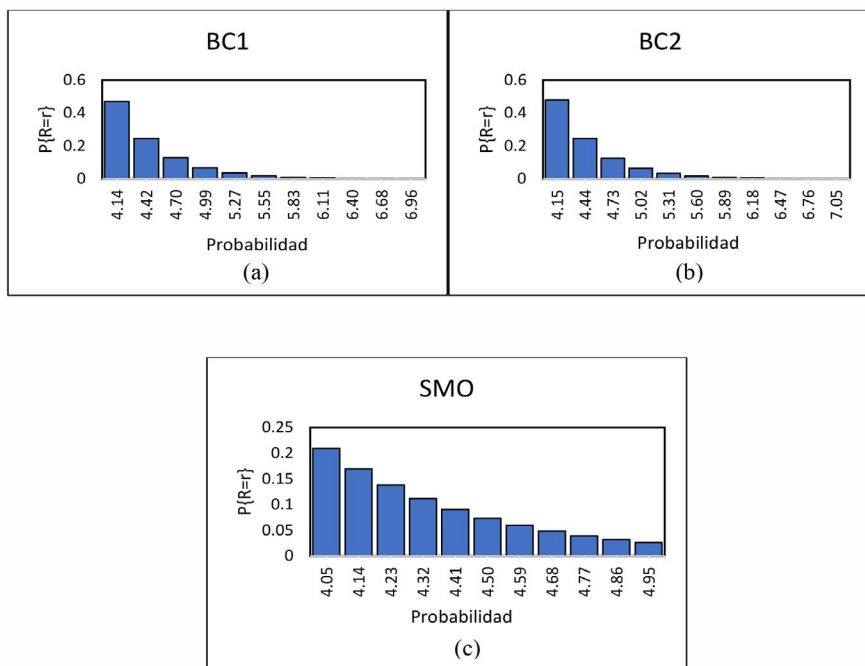


Figura 5.4a-c. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.

3.1.3. Curvas de peligro sísmico para Tijuana

Debido a la insuficiencia de datos que nos permitan conocer el tipo de suelo en un sitio en particular, en este trabajo se obtuvieron las curvas de peligro sísmico considerando distintas velocidades de ondas de corte, estas son consideradas un indicador del tipo de suelo en un sitio en específico. En otras palabras, si se quiere diseñar una estructura se debe realizar un estudio de mecánica de suelos en el sitio de interés para

con ello poder conocer la velocidad de las ondas de cortante a 30 metros de profundidad (V_{s30}), una vez conocida la velocidad de las ondas de cortante se puede trazar las curvas de peligro sísmico, así como también espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno considerado, en un sitio específico. La ventaja de los resultados aquí obtenidos es que las curvas están vinculadas a diferentes valores de la velocidad de ondas de cortante, en consecuencia, bastará con seleccionar la curva apropiada al tipo del suelo del sitio. La siguiente tabla ilustra la correspondencia entre la velocidad de ondas de cortante y el tipo de suelo.

Tabla 5.1. Clasificación de suelos NEHRP

Tipo de suelo	Velocidad de ondas de cortante (V_{s30}) (m/s)
A	> 1500
B	760 - 1500
C	360 - 760
D	180 - 360
E	< 180

Para el sitio FIT-UABC se ilustran en las Figuras 5.5 a 5.8 las curvas de peligro sísmico obtenidas primeramente para la Aceleración Máxima del Suelo A_{ms} , para un periodo de retorno de 475 años, a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la Aceleración Máxima del Suelo para una tasa de excedencia en particular. La Figura 5.9 muestra una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para las distintas V_{s30} consideradas.

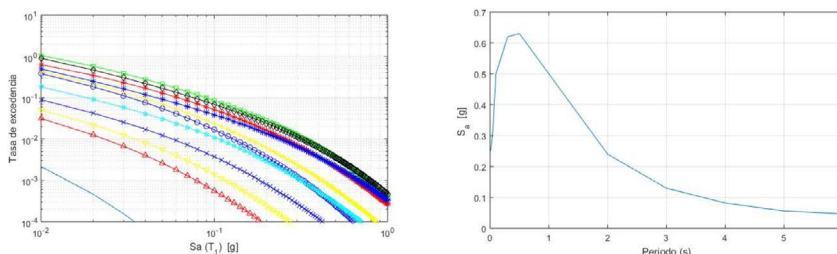


Figura 5.5. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

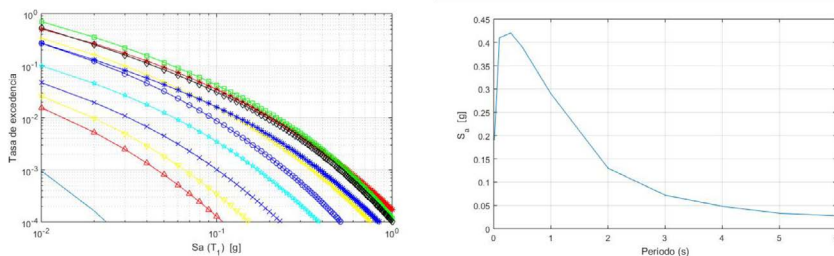


Figura 5.6. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

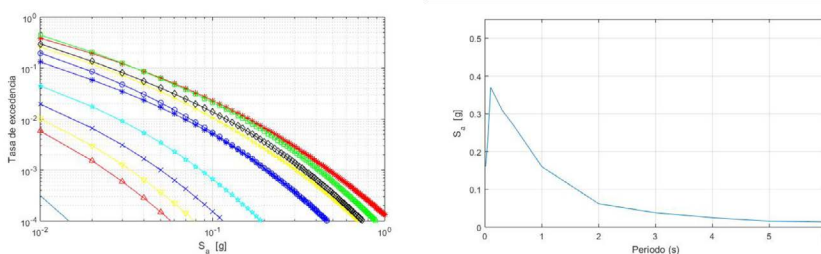


Figura 5.7. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

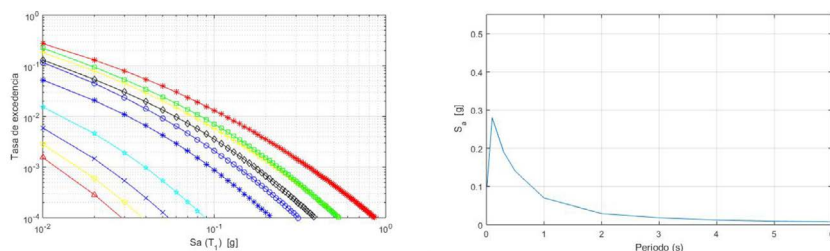


Figura 5.8. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

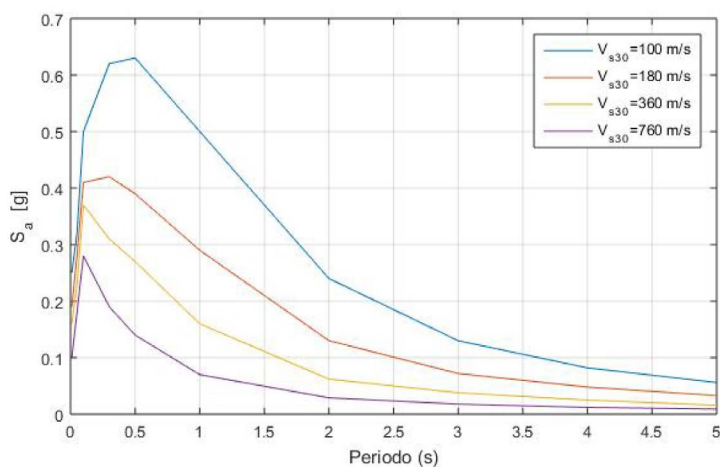


Figura 5.9. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIT-UABC para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.

3.2. APSP Mexicali

Para el caso de Mexicali se seleccionó la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (FIM-UABC) ubicada en Ciudad Universitaria Campus Mexicali, C. P. 21280, Mexicali, Baja California. Las coordenadas geográficas del sitio son: longitud 115.444096 W, latitud 32.632145 N. El lugar se encuentra sobre el Boulevard Benito

Juárez frente a la Universidad Autónoma de Durango. En la figura 5.10 se muestra de manera gráfica la ubicación del sitio en estudio.



Figura 5.10. Ubicación del sitio en estudio FIM-UABC (indicado con estrella). (<https://maps.google.com.mx/>)

3.2.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Mexicali

Las zonas sismotectónicas que afectan el sitio FIM-UABC son BC1, BC2 y SMO, indicadas en la Figura 5.11. Por otro lado, la Figura 5.12 ilustra la distribución de probabilidad de que se presente una cierta distancia para cada una de las fuentes sísmicas que afectan este sitio. Describiendo la zona BC2 algunos mapas de intensidad para terremotos de magnitud similar sugieren que los choques en el norte de Baja California generan aceleraciones más altas que sus contrapartes en el Valle Imperial, mientras que la zona BC1 en esta se incluye una actividad sísmica asociada con sismos superficiales, la mayoría de los eventos en esta zona son sismos con profundidades menores a 20 km y finalmente para la zona SMO es una zona ubicada en la sierra Madre Occidental de baja intensidad sísmica.

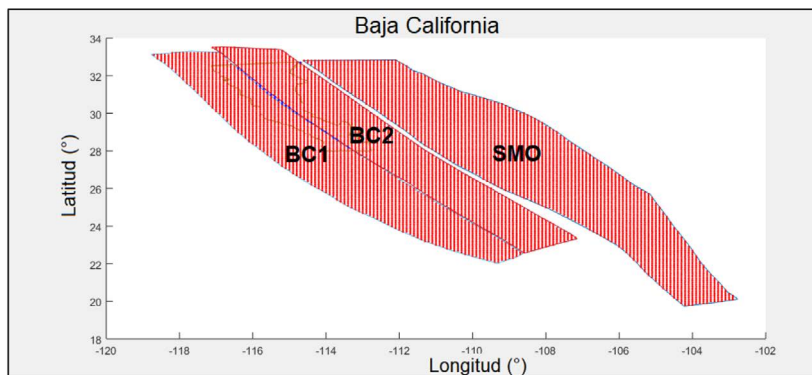


Figura 5.11. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (32.63, -115.4), ubicada en la ciudad de Mexicali.

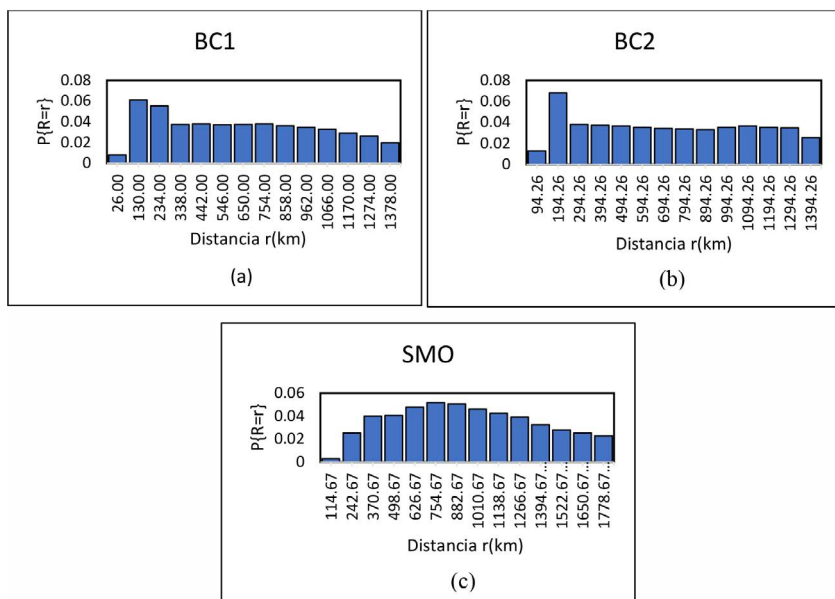


Figura 5.12a-c. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (32.63, -115.4) para Mexicali para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO.

3.2.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Mexicali

Para la ubicación de Mexicali el potencial sísmico es el mismo que el ya mencionado para la ciudad de Tijuana, ya que se afectan las mismas zonas debido a que ambas ubicaciones se encuentran dentro del estado de Baja California. Las zonas BC1, BC2 y SMO las magnitudes máximas que se podrían presentar son 6.0, 7.2 y 5.0, respectivamente. La Figura 5.13 muestra la distribución de probabilidad para magnitudes de las zonas sísmicas que afectan el sitio FIM-UABC.

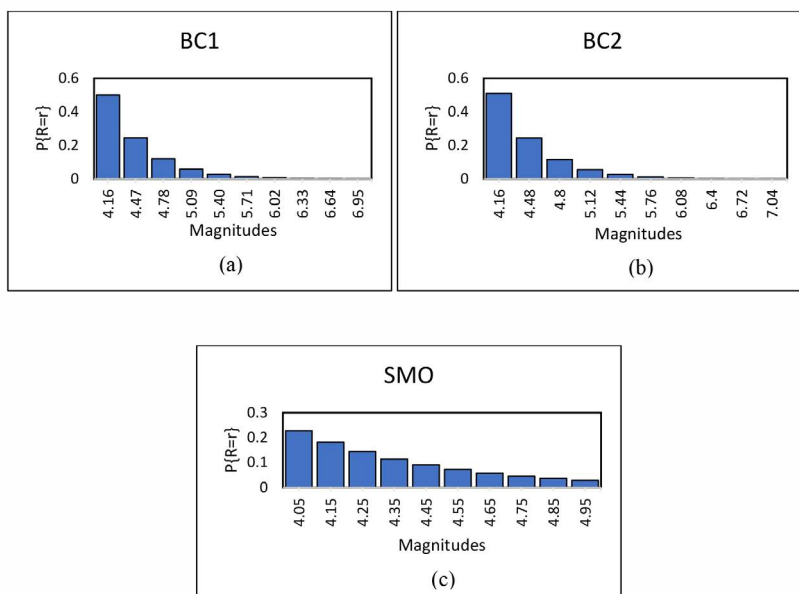


Figura 5.13a-c. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.

3.2.3. Curvas de peligro sísmico para Mexicali

Para el sitio FIM-UABC se ilustran en las Figuras 5.14 a 5.17 las curvas de peligro sísmico obtenidas primeramente para la Aceleración Máxima del Suelo A_{ms} , para un periodo de retorno de 475 años, a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la Aceleración Máxima del Suelo para una tasa de excedencia en particular. La Figura 5.18 muestra una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para las distintas V_{s30} consideradas.

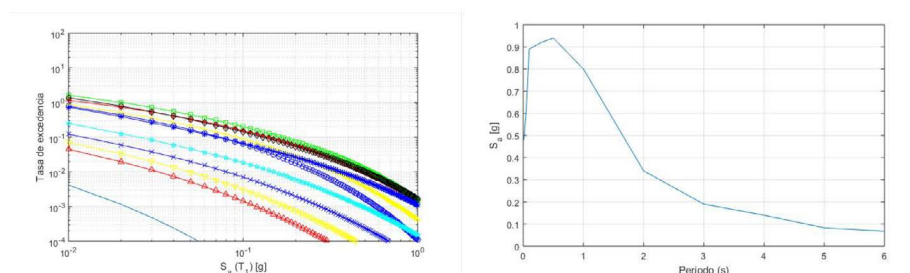


Figura 5.14. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

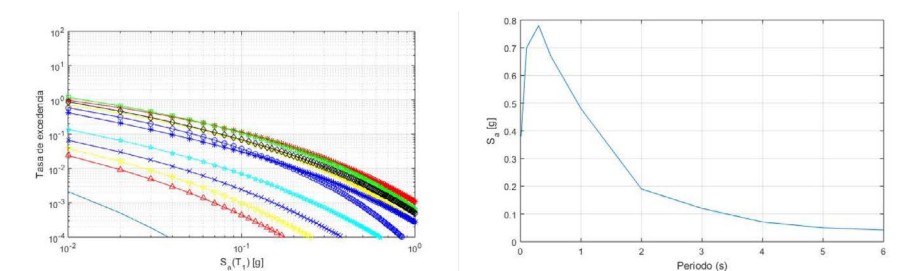


Figura 5.15. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

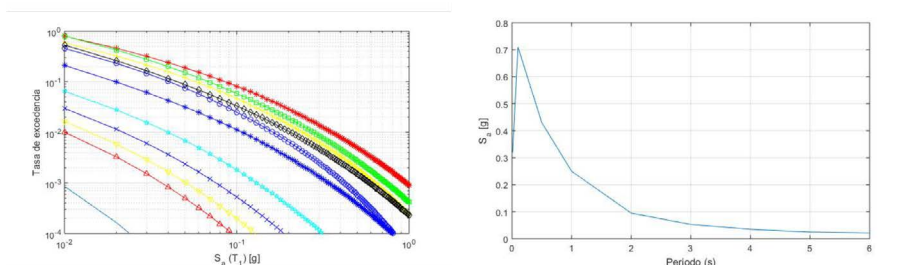


Figura 5.16. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

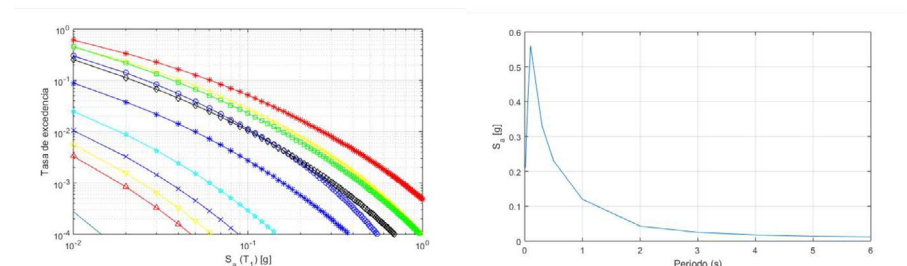


Figura 5.17. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

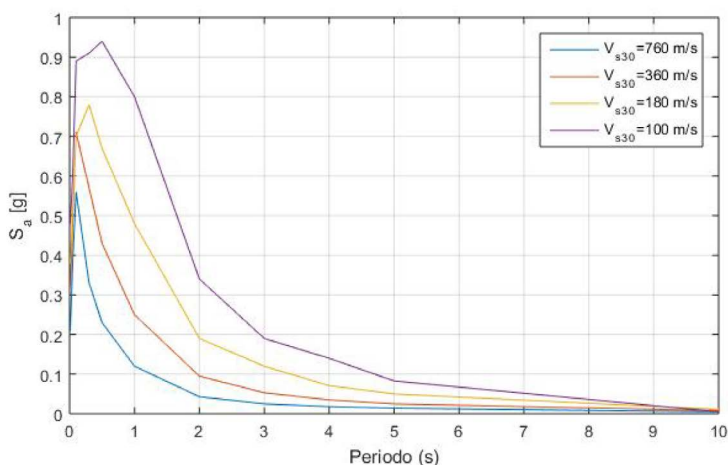


Figura 5.18. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIM-UABC para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.

3.3. APSP Hermosillo

Para el caso de Hermosillo se seleccionó la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Sonora (FIH-UNISON) ubicada en Ciudad Universitaria Campus Hermosillo C. P. 83000, Hermosillo, Sonora. Las coordenadas geográficas del sitio son: longitud 110.962712 W, latitud 29.082297 N. El lugar se encuentra frente al Hospital General y a dos cuadras del consulado de Estados Unidos. En la figura 5.19 se muestra de manera gráfica la ubicación del sitio en estudio.

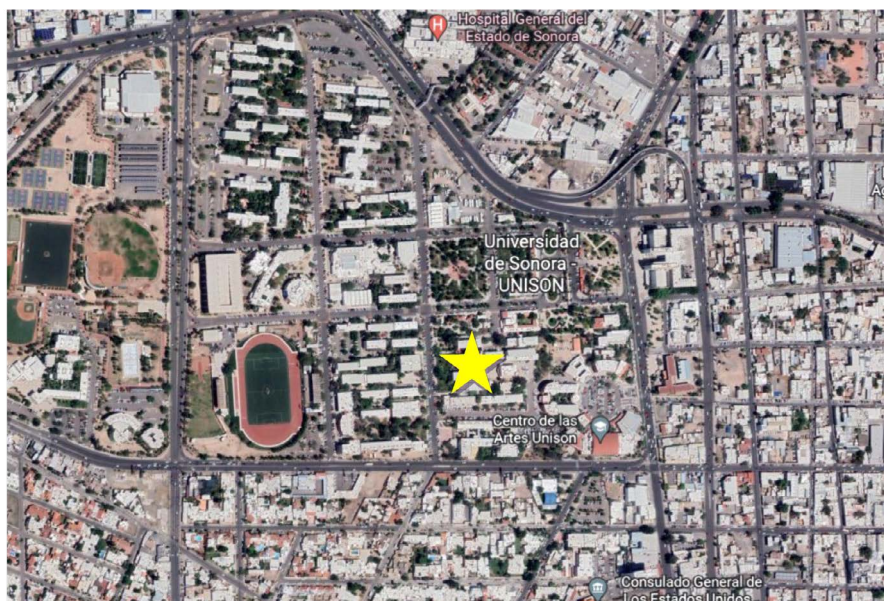


Figura 5.19. Ubicación del sitio en estudio FIH-UNISON (indicado con estrella). (<https://maps.google.com.mx/>)

3.3.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Hermosillo

Las fuentes sísmicas que afectan el sitio FIH-UNISON son BC1, BC2, SMO y BAR, mostradas en la Figura 5.20. En la Figura 5.21 se ilustra la distribución de probabilidad de que se presente una cierta distancia para cada una de las fuentes sísmicas que afectan este sitio. Describiendo un poco la zona BAR, esta región incluye sismos superficiales de la corteza terrestre ($h < 15$ km) en la continuación sur de las provincias de estrés de Cuenca y Cordillera y Rio Grande Rift. En la zona BC1 se incluye una actividad sísmica asociada con sismos superficiales, la mayoría de los eventos en esta zona son sismos con profundidades menores a 20 km, mientras que la zona SMO es una zona ubicada en la sierra Madre Occidental de baja intensidad sísmica y, finalmente, en la zona BC2, algunos mapas de intensidad para terremotos de magnitud similar sugieren que los choques en el norte de Baja California generan aceleraciones más altas que sus contrapartes en el Valle Imperial.

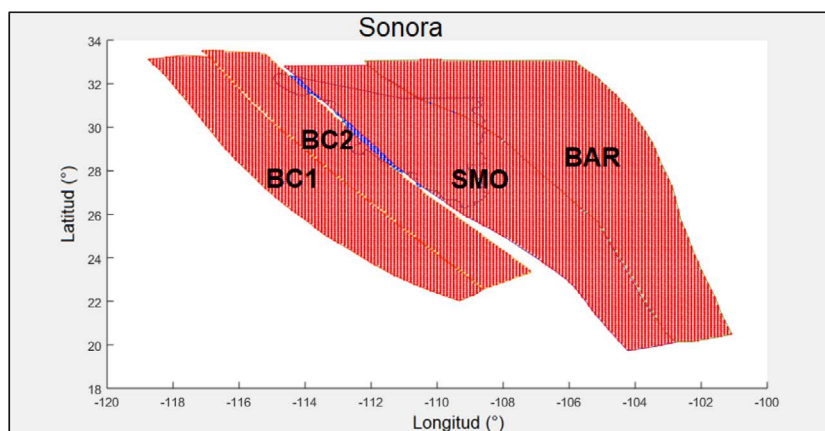


Figura 5.20. Zonas sismotectónicas para el estado de Sonora, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (29.08, -110.96), ubicada en la ciudad de Hermosillo.

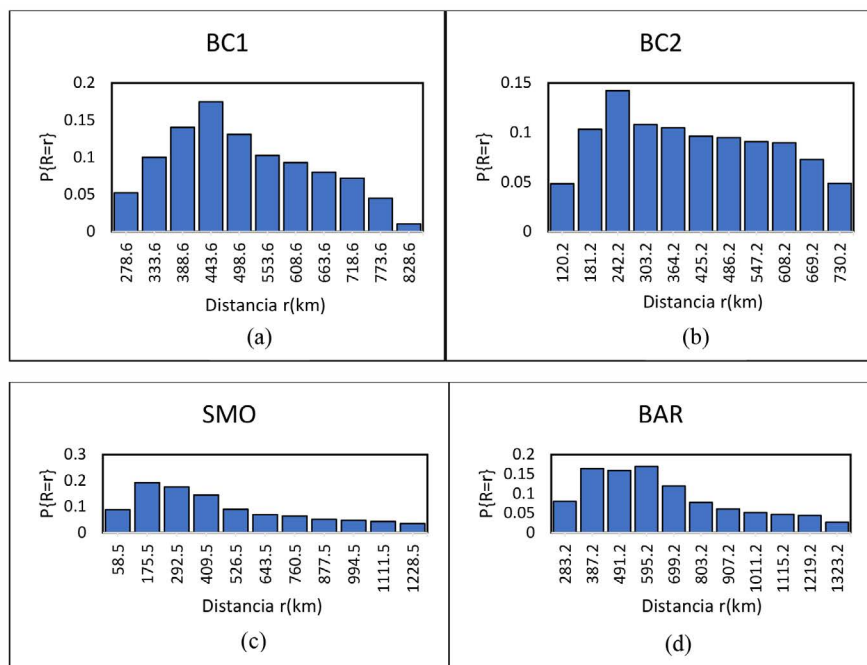


Figura 5.21a-d. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (29.08, -110.96) para Hermosillo para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO, d) BAR.

3.3.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Hermosillo

Hablando del potencial sísmico en la ciudad de Hermosillo, observamos que es afectada por las zonas BC1, BC2, SMO y BAR. Las magnitudes máximas que se podrían presentar son 6.0, 7.2, 5.0 y 5.0, respectivamente. Como ya se ha mencionado en estas zonas se cuenta con algunas recurrencias observadas, resaltando para este sitio la zona SMO cuya sismicidad es poco conocida y no se han determinado mecanismos focales debido a la baja magnitud de los eventos ($M_b < 5.0$). La Figura 5.22 muestra la distribución de probabilidad para magnitudes de las zonas sísmicas que afectan el sitio FIH-UNISON.

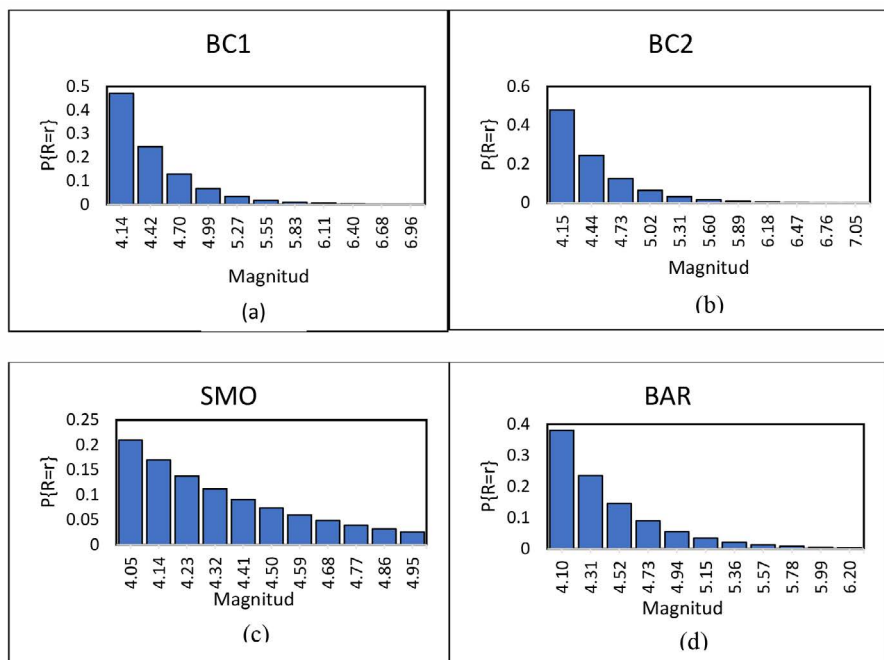


Figura 5.22 a-d. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.

3.3.3. Curvas de peligro sísmico para Hermosillo

Para el sitio FIH-UNISON se ilustran en las Figuras 5.23 a 5.26 las curvas de peligro sísmico obtenidas primeramente para la Aceleración Máxima del Suelo A_{ms} , para un periodo de retorno de 475 años, a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la Aceleración Máxima del Suelo para una tasa de excedencia en particular. La Figura 5.27 muestra una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para las distintas V_{s30} consideradas.

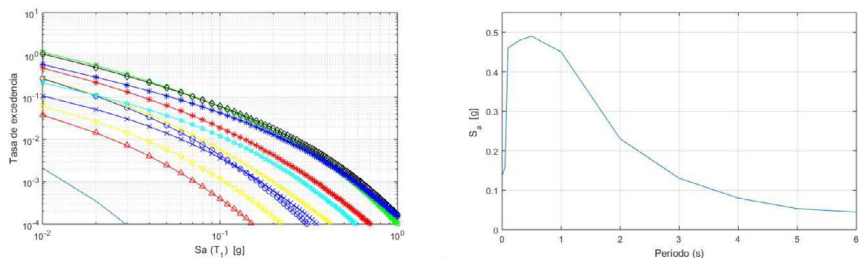


Figura 5.23. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

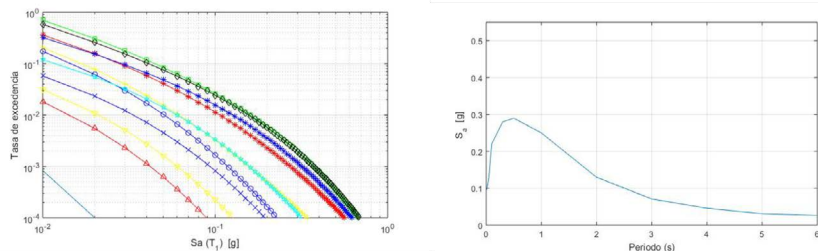


Figura 5.24. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

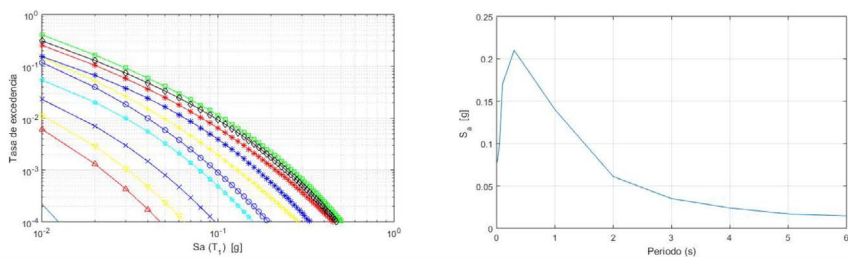


Figura 5.25. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

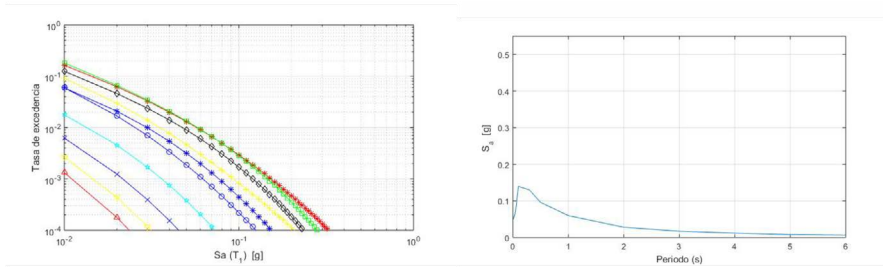


Figura 5.26. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

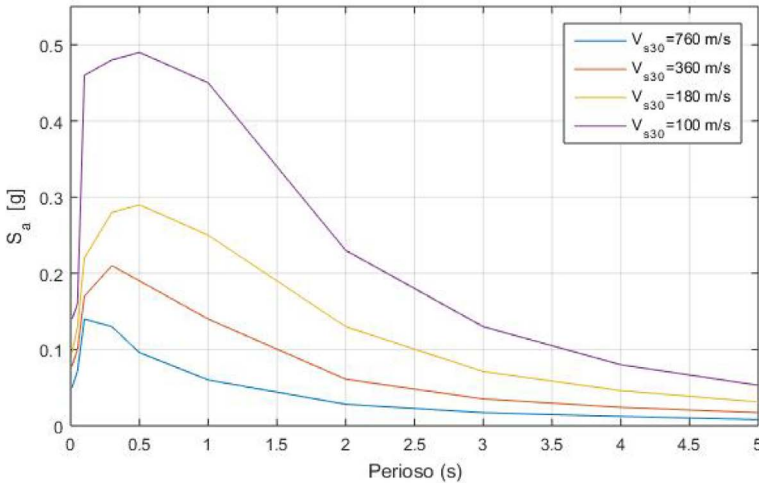


Figura 5.27. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIH-UNISON para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.

3.4. APSP La Paz

Para el caso de La Paz se seleccionó la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Autónoma de Baja California Sur (FCT-UABCS) ubicada en Ciudad Universitaria Campus La Paz C. P. 23080, La Paz, Baja California Sur. Las coordenadas geográficas del sitio son: longitud 110.314961 W, latitud 24.100769 N. El lugar se encuentra frente al panteón municipal y a un costado de la carretera La Paz-San José del Cabo. En la figura 5.28 se muestra de manera gráfica la ubicación del sitio en estudio.

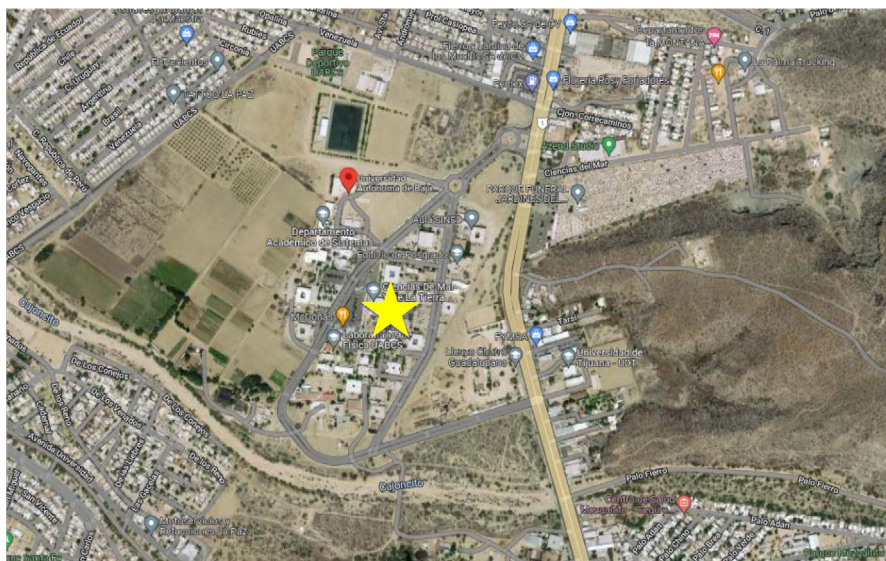


Figura 5.28. Ubicación del sitio en estudio FCT-UABCS (indicado con estrella). (<https://maps.google.com.mx/>)

3.4.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para La Paz

Las zonas sismotectónicas que afectan el sitio FCT-UABCS son BC1, BC2, SMO, RIV1, RIV2 y SUB1, mostradas en la Figura 5.29. En la Figura 5.30 ilustra la distribución de probabilidad de que se presente una cierta distancia para cada una de las fuentes sísmicas que afectan este sitio. Esta ubicación además de ser afectada por las zonas BC1, BC2 y SMO que se han descrito previamente, también está siendo afectada por la zona RIV1, la cual incluye terremotos que ocurren en el este del Pacífico Oriental, en el límite entre las placas del Pacífico y de Rivera, en esta zona los mecanismos observados son en su mayoría son fallas normales, y también la zona RIV2 que esta región corresponde a la falla transformada que forma el límite sur de la placa de Rivera, los eventos en esta región muestran en su mayoría mecanismos de deslizamiento de rumbo.

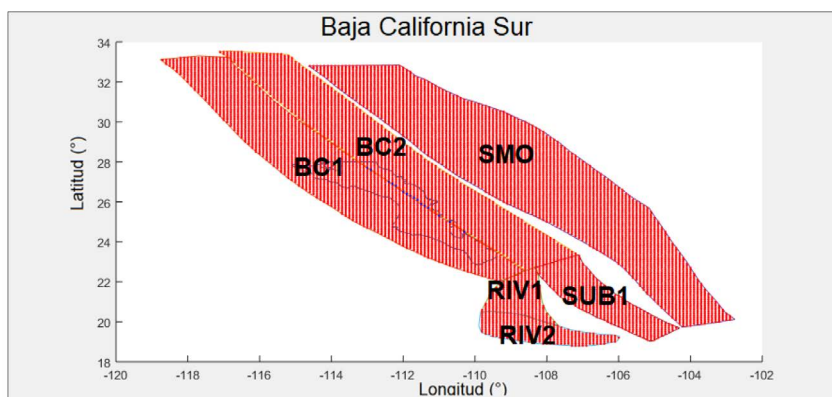


Figura 5.29. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California Sur, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (24.10, -110.31), ubicada en la ciudad de La Paz.

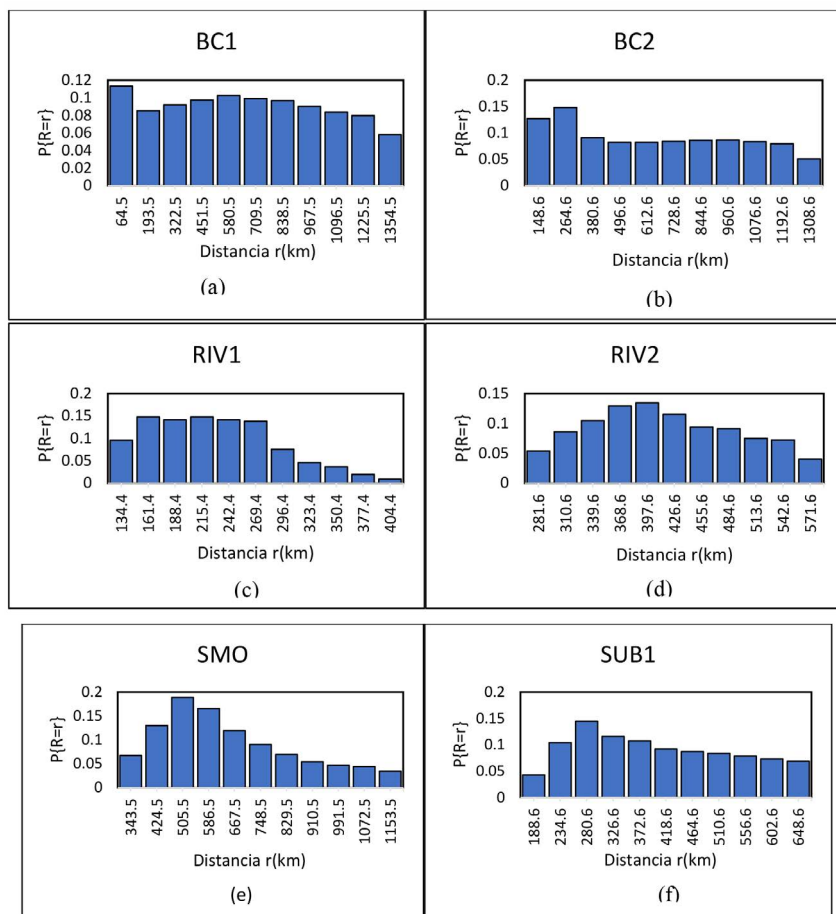


Figura 5.30a-f. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (24.1, -110.31) en La Paz para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) RIV1, d) RIV2, e) SMO, f) SUB1.

3.4.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para La Paz

Para el sitio de La Paz Baja California Sur conocemos el potencial sísmico en dependencia de cada fuente sísmica, de tal manera que la intensidad máxima que se podría presentar en cada zona sísmica es diferente, para el caso de las zonas BC1, BC2, SMO, RIV1, RIV2 y SUB1 las magni-

tudes máximas que se podrían presentar son 6.0, 7.2, 5.0, 6.0, 7.0 y 8.2, respectivamente. En estas zonas destacamos la zona RIV1 donde no hay terremotos instrumentales $M_w > 6.0$ registrado en esta región. Aunque los grandes terremotos son poco frecuentes en la zona SUB1, algunos han alcanzado magnitudes tan grandes como $M_w = 8.2$. Durante los últimos 100 años, hubo cuatro eventos con magnitud $M_s > 7.5$ en esta región. La Figura 5.31 muestra la distribución de probabilidad para magnitudes de las zonas sísmicas que afectan el sitio FCT-UABCS.

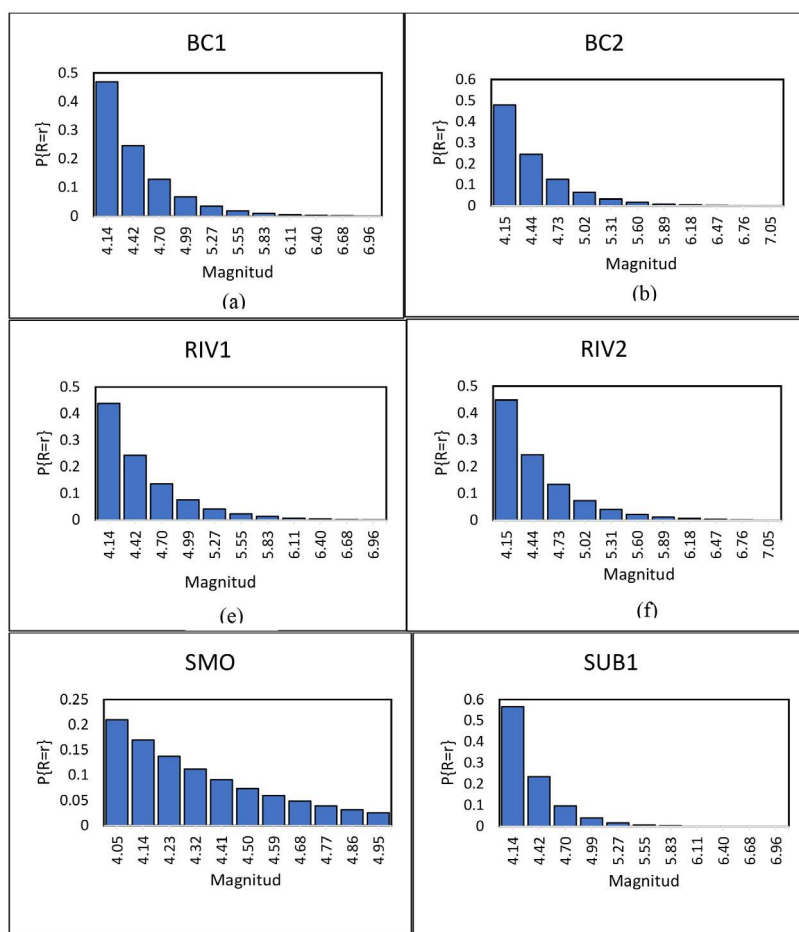


Figura 5.31a-f. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.

3.4.3. Curvas de peligro sísmico para La Paz

Para el sitio FCT-UABCS se ilustran en las Figuras 5.32 a 5.35 las curvas de peligro sísmico obtenidas primeramente para la Aceleración Máxima del Suelo A_{ms} , para un periodo de retorno de 475 años, a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la Aceleración Máxima del Suelo para una tasa de excedencia en particular. La Figura 5.36 muestra una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para las distintas V_{s30} consideradas.

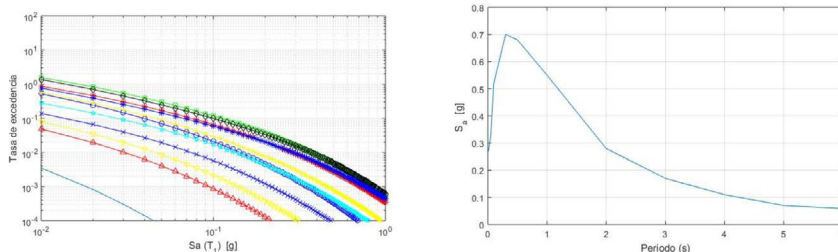


Figura 5.32. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

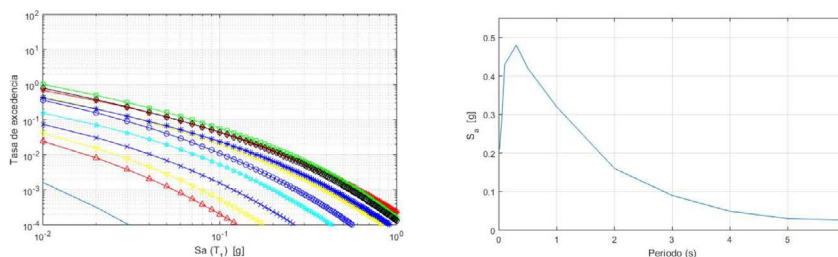


Figura 5.33. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

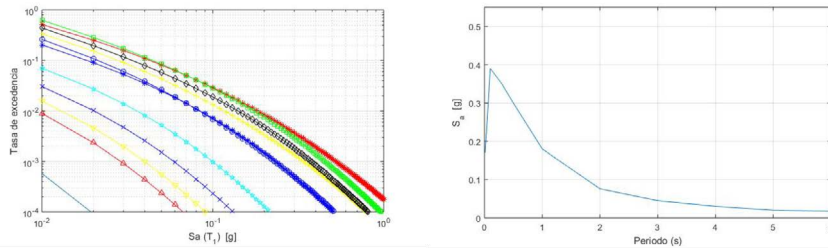


Figura 5.34. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

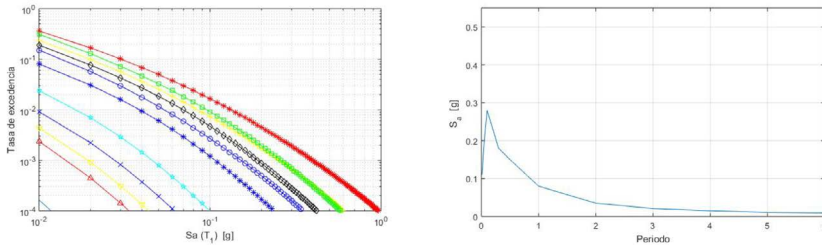


Figura 5.35. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

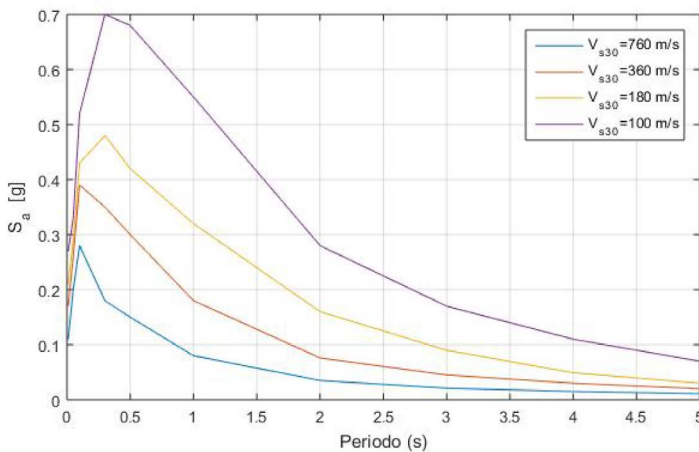


Figura 5.36. Espectros de peligro uniforme para el sitio FCT-UABCS para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.

3.5. APSP Culiacán

Para el caso de Culiacán se seleccionó la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (FIC-UAS) ubicada en Ciudad Universitaria Campus Culiacán C. P. 80040, Culiacán, Sinaloa. Las coordenadas geográficas del sitio son: Longitud 107.3820 W, Latitud 24.8265 N. El lugar se encuentra enfrente del Río Tamazula y a un costado del Jardín Botánico. En la figura 5.37 se muestra de manera gráfica la ubicación del sitio en estudio.

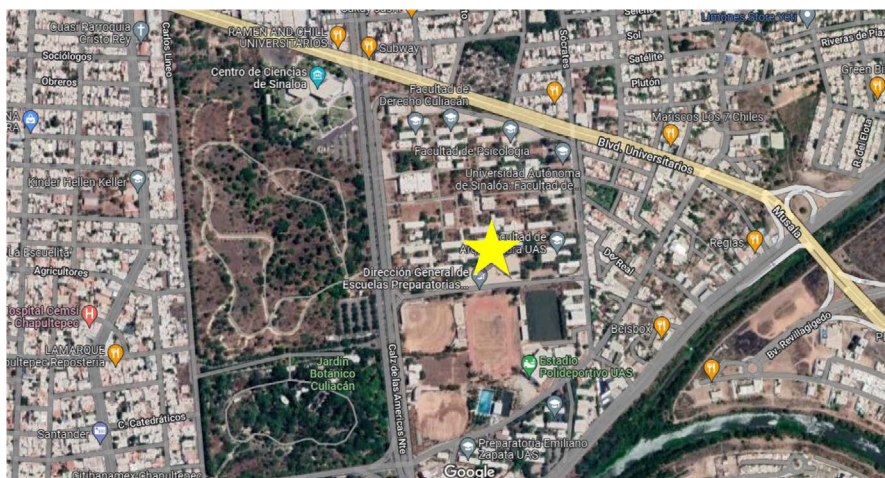


Figura 5.37. Ubicación del sitio en estudio FIC-UAS (indicado con estrella). (<https://maps.google.com.mx/>)

3.5.1. Distribuciones de probabilidad de distancia para Culiacán

Las fuentes sísmicas que afectan el sitio FIC-UAS son BC1, BC2, SMO, BAR, RIV1, RIV2, SUB1, SUB2 y MVB, mostradas en la Figura 5.38. Asimismo, la Figura 5.39 ilustra la distribución de probabilidad de que se presente una cierta distancia para cada una de las fuentes sísmicas que afectan este sitio. Esta ubicación es la más afectada por diferentes zonas sismotectónicas, de las cuales se pueden destacar las zonas SUB1

y SUB2 en las cuales la recurrencia de sismos grandes es más frecuente que en las regiones vecinas.

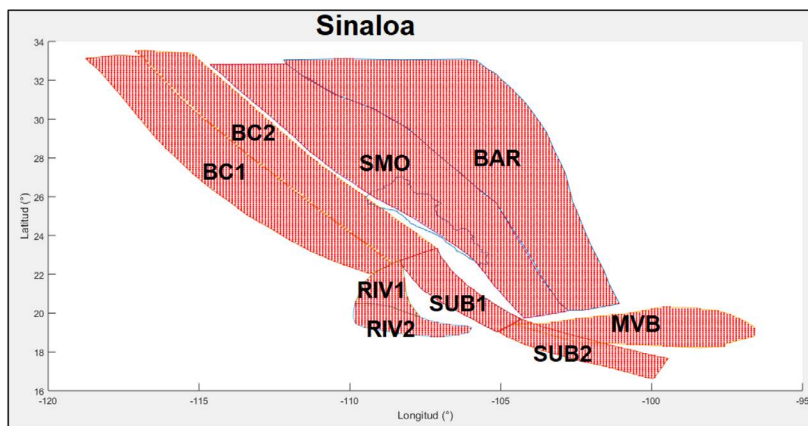
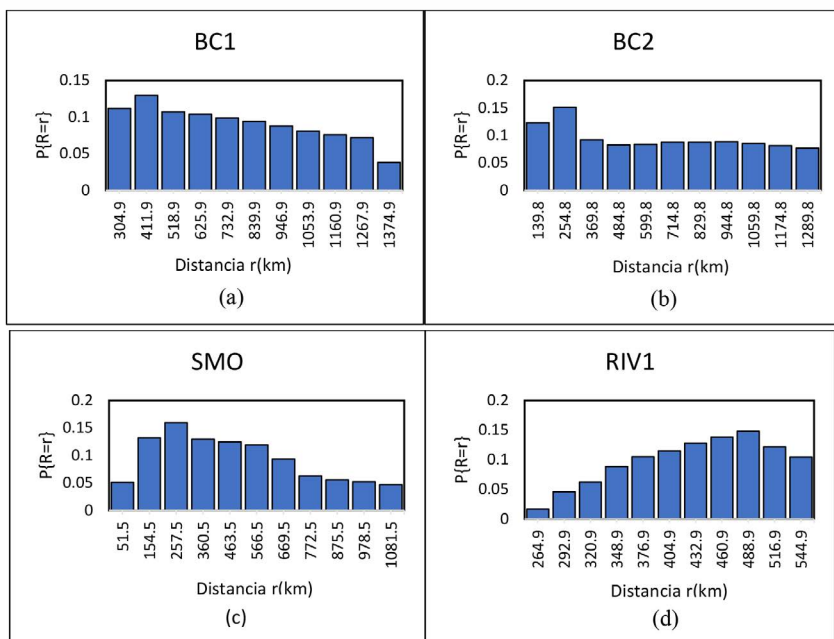


Figura 5.38. Zonas sismotectónicas para el estado de Sinaloa, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (24.8, -107.4), ubicada en la ciudad de Culiacán.



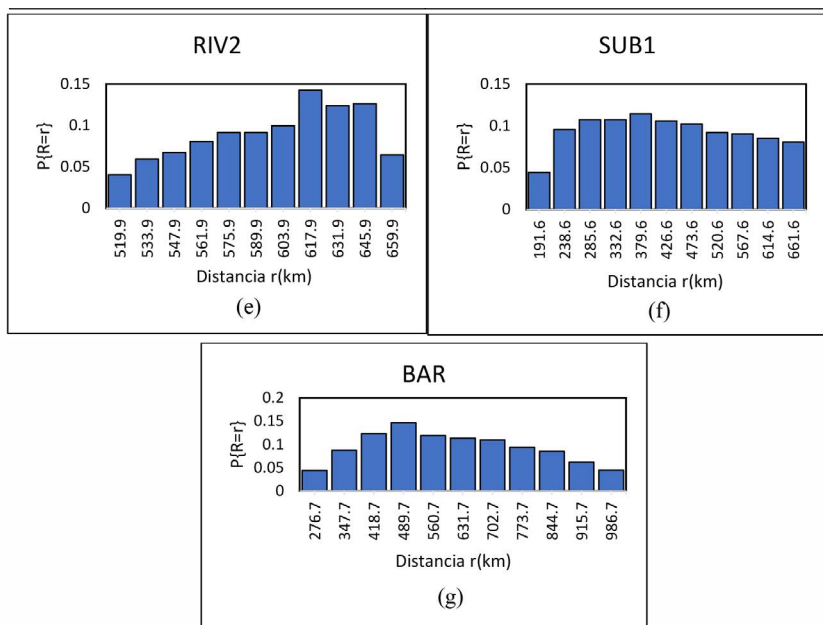


Figura 5.39a-g. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (24.8, -107.4) para Culiacán para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO, d) RIV1, e) RIV2, f) SUB1, g) BAR

3.5.2. Distribuciones de probabilidad de magnitud para Culiacán

El potencial sísmico medido para el sitio de Culiacán Sinaloa, es diferente dependiendo de cada fuente sísmica, de tal manera que la intensidad máxima que se podría presentar en cada zona sísmica es diferente, para el caso de las zonas BC1, BC2, SMO, BAR, RIV1, RIV2, SUB1, SUB2 y MVB las magnitudes máximas que se podrían presentar son 6.0, 7.2, 5.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.2, 7.5 y 7.2 respectivamente. Estos eventos muestran modos mixtos de fallas resultantes de las tensiones inducidas por la interacción entre las placas del Pacífico y la de Norteamérica. Destacando la zona SUB1 en donde los grandes terremotos son poco frecuentes, sin embargo, han alcanzado a presentarse terremotos de magnitud $M_w = 8.2$. Durante los últimos 100 años, hubo cuatro eventos con magnitud $M_s > 7.5$ en esta región. La Figura 5.40 muestra la distribución de probabilidad para magnitudes de las zonas sísmicas que afectan el sitio FIC-UAS.

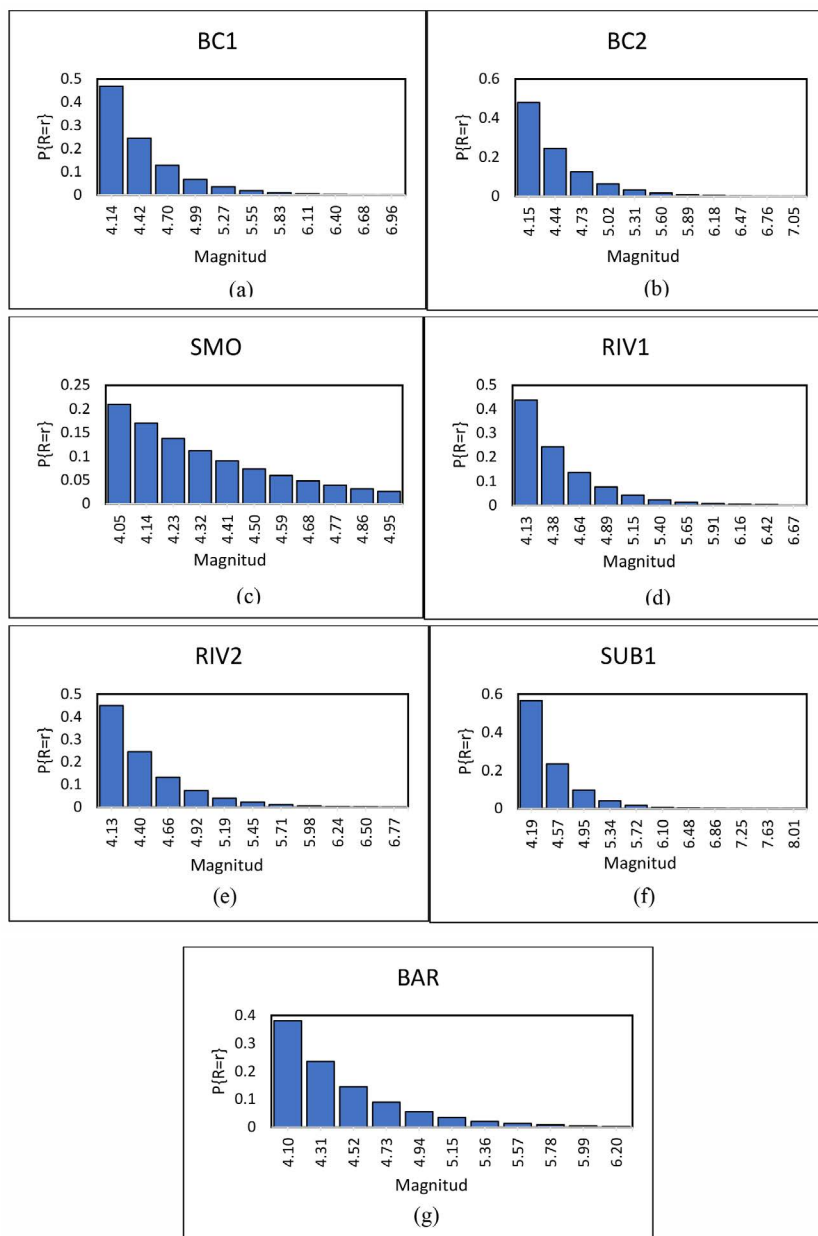


Figura 5.40a-g. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.

3.5.3. Curvas de peligro sísmico para Culiacán

Para el sitio FIC-UAS se ilustran en las Figuras 5.41 a 5.44 las curvas de peligro sísmico obtenidas primeramente para la Aceleración Máxima del Suelo A_{ms} , para un periodo de retorno de 475 años, a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la Aceleración Máxima del Suelo para una tasa de excedencia en particular. La Figura 5.45 muestra una comparación entre los espectros de peligro uniforme obtenidos para las distintas V_{s30} consideradas.

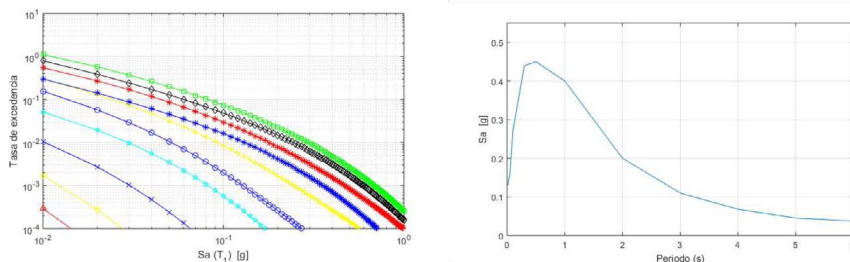


Figura 5.41. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

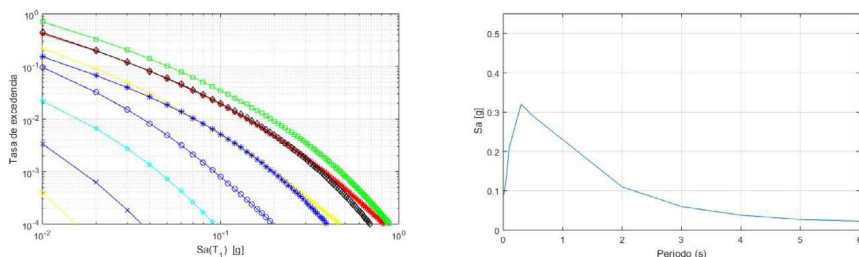


Figura 5.42. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

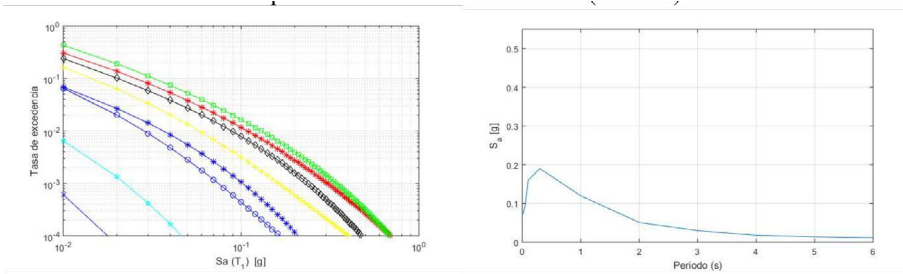


Figura 5.43. Curvas de peligro sísmico para el sitio Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

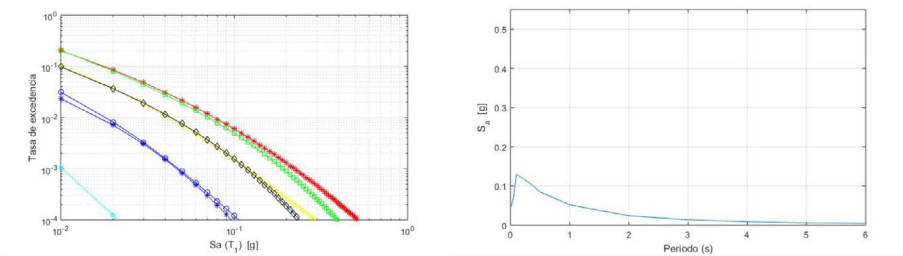


Figura 5.44. Curvas de peligro sísmico para el sitio Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).

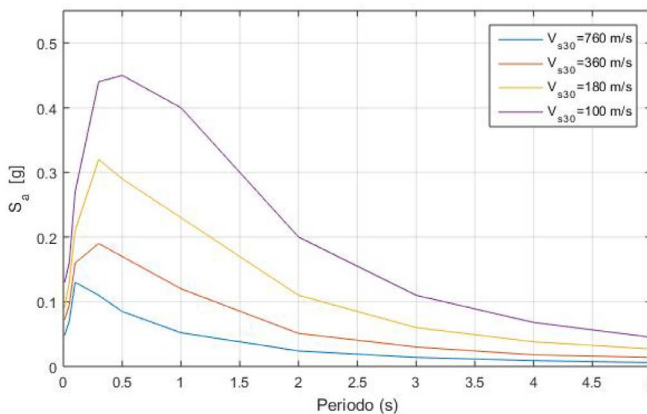


Figura 5.45. Espectros de peligro uniforme para el sitio Culiacán para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.

Conclusiones

La estimación del peligro sísmico para la región noroeste de México se efectuó tomando en cuenta la medida de intensidad sísmica de que es la medida de intensidad sísmica más utilizada para el diseño de estructuras sismoresistentes. Con base en los resultados obtenidos en este análisis podemos concluir que $Sa(T_r)$ es una medida de intensidad sísmica que puede ser considerada como buen predictor de la respuesta estructural, teniendo en consideración que la estructura en estudio se encuentre dentro de un intervalo de comportamiento lineal y que dicha estructura está dominada por su periodo fundamental de vibración.

Los resultados obtenidos mostraron que la ubicación que se encuentra expuesta a un mayor peligro sísmico es la ciudad de Mexicali, (es decir, FIM-UABC), con lo que se observa que las ordenadas espectrales de diseño (coeficiente sísmico requerido) son mayores en esta región. La ubicación con mayor peligrosidad sísmica después de Mexicali, corresponde a la ciudad de La Paz en el estado de Baja California Sur. Para el sitio FIT-UABC (Tijuana) el peligro sísmico es menor que para el sitio de la ciudad de Mexicali y La Paz. Para el estado de Sonora, específicamente en la ciudad de Hermosillo, el peligro es ligeramente mayor que el de la ciudad de Culiacán, siendo esta la ciudad con menor peligro sísmico de las ciudades analizadas.

Tomando en cuenta el análisis de peligro sísmico probabilístico y la ubicación geográfica de los sitios que se consideraron en este estudio se concluye preliminarmente que, para el estado de Baja California, en la región de Mexicali es la que sufre de un mayor peligro sísmico, y conforme se avanza hacia la costa a la ciudad de Tijuana el peligro tiende a disminuir (al menos hasta la Ciudad de Tijuana). La distribución del peligro sísmico obtenida en este estado se debe a la estrecha distancia entre la región de Baja California y la zona sismotectónica BC1, ya que

la actividad sísmica de dicha región es mayor en comparación con el resto de las otras fuentes (BC2 y SMO) que afectan al Estado.

Para el caso del estado de Sonora, el sitio en estudio se localiza en la ciudad de Hermosillo. La distribución del peligro sísmico obtenida se debe a la distancia estrecha entre el territorio comprendido por Sonora y la actividad sísmica de las zonas sismotectónicas BC2 y SMO. Dada la distribución de las zonas sismotectónicas se puede inferir que conforme se va avanzando hacia la costa del golfo de california el peligro tiende aumentar en el estado de Sonora.

En el estado de Baja California Sur, el sitio considerado fue FCT-UABCS en la ciudad de La Paz. La distribución del peligro sísmico obtenida se debe a la distancia estrecha entre sitio y las regiones sismotectónicas BC1, BC2, RIV1 y RIV2. Se espera una distribución del peligro sísmico similar en todo el Estado dada la distribución de las regiones sismotectónicas.

El último sitio bajo estudio nombrado FIC-UAS está localizado en el municipio de Culiacán en el estado de Sinaloa, en este estado se puede inferir que el peligro sísmico es mayor en el norte de estado, es decir, en el municipio de Ahome. Por otra parte, la ciudad de Mazatlán es la que se encuentra expuesta a un menor peligro sísmico al estar localizada al sur del estado. En caso de Culiacán el peligro sísmico no es tan grande como el que se presenta en el municipio de Ahome, sin embargo, es mayor que el que se presenta en la ciudad de Mazatlán, esto se debe a que la ciudad de Culiacán se encuentra ubicada aproximadamente en el centro del estado. La distribución del peligro sísmico obtenida se debe a la distancia estrecha entre el estado de Sinaloa y la zona sismotectónica BC2, ya que la actividad sísmica de esta zona es mayor si la comparamos con el resto de las otras zonas sísmicas que afectan a Sinaloa.

Es importante destacar que las edificaciones deben diseñarse considerando siempre el efecto de los sismos, ya que en todas las ciudades que se contempló el análisis, el peligro sísmico está presente.

Referencias

- [1] Romeo, R., Paciello, A. and Rinaldis, D., Seismic hazard maps of Italy including site effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, pp. 85-92, 2000. DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00040-3
- [2] McGuire, R. K. (1995). probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is conducted because there is a perceived earthquake threat: active seismic sources in the region may produce a moderate-to-large earthquake. The analysis considers a multitude of earthquake occurrences and grou. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1275-1284.
- [3] Francesco Mulargia, P. B. (2017). Why is Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) still used? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 63-75.
- [4] Buenrostro, A. M., Gómez Bernal, A., & Juárez García, H. (2021). Análisis de peligro sísmico y efectos de sitio para la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Revista Internacional De Ingeniería De Estructuras*, 26(1), 89-123. (R. Ramkrishnan, 2021).
- [5] R. Ramkrishnan, S. K. (2021). Probabilistic seismic hazard analysis of North and Central Himalayas using regional ground motion prediction equations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 8137-8157.
- [6] Servicio Sismológico Nacional. [En línea]. Disponible en: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2010/SSNMX_rep_esp_20100404_bajacalifornia_M72.pdf
- [7] Udías, A. (1998). *Introducción: sismicidad y sismotectónica de América central y del sur*. Departamento de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid, 10-17.
- [8] Esteva, L. (1968), “Criterios para la construcción de espectros de diseño sísmico”, Publicación 198, Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- [9] Esteva, L. (1970), “Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería”, Publicación 246, Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- [10] McGuire R. (2007), “Probabilistic Seismic hazard analysis: Early history”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (37), pp. 329-338.

- [11] Frez, J., & González, J. J. (1989). Sismicidad y mecanismos focales en el Valle Mexicali-Imperial (1973-1985). *Geofísica Internacional*, 28(4), 643–691. (Jing Qian, 2020) PELIGRO ZONA NOROESTE.
- [12] Jing Qian, Y. D. (2020). Multi-criteria decision making for seismic intensity measure selection considering uncertainty. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 1095-1114. MEIDIDA DE INTENSIDAD.
- [13] Shome, N., & Cornell, C. A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. Stanford, CA.: Reability of Marine Structures Program, Report No. RMS-35, Dept. of Civil Eng., Stanford University.
- [14] Bradley, B., Cubrinovski, M., & Wentz, F. (2022). Probabilistic seismic hazard analysis of peak ground acceleration for major regional New Zealand locations. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 55(1), 15–24.
- [15] Nevena Šipčić, Mohsen Kohrangi, Athanasios N. Papadopoulos, Warner Marzocchi, Paolo Bazzurro; The Effect of Seismic Sequences in Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2022; 112(3): 1694-1709.
- [16] Ali Rodríguez-Castellanos, S. E. S. (2020). Influence of spectral acceleration correlation models on conditional mean spectra and probabilistic seismic hazard analysis. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 309-328.
- [17] Reiter, L. (1990). *Earthquake hazard analysis - issues and insights*. Columbia University Press, New York, 254.
- [18] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- [19] Wallace., R. (1981). *Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United States (pp. 209-216)*. American Geophysical Union, Washington, D. C.
- [20] Adair, M. (1979). Geological evaluation of a site for a nuclear power plant. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 27-39.
- [21] Smith, S. (1976). Determination of maximum earthquake magnitude. *Geophysical Research Letters*, 351-354.

-
- [22] Consultants, W. C. (1979). Report of the evaluation of maximum earthquake and site ground motion parameters associated with the Offshore Zone of deformation, San Onofre Nuclear Generating Station. Report to Southern California Edison Company, Woodward-Clyde, San Francisco, 1-50.
- [23] Idriss, I. (1985). Evaluating seismic risk in engineering practice. *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 255-320). San Francisco.
- [24] L. Ruff y H. Kanamori. (1980). Seismicity and subduction processes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (pp. 240-252).
- [25] T.H. Heaton y H. Kanamori. (1984). Seismic potential associated with subduction in the northwestern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 933-941.
- [26] Atwater, B. (1987). Evidence for great Holocene Earthquake along the outer coast of Washington state. *Science*, 942-944.
- [27] B. Gutenberg y C.F. Richter. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985-1988.
- [28] H. A. Merz y C. A. Cornell. (1973). Aftershocks in engineering seismic risk analysis. Report R73-25, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- [29] Stepp, J. (1972). Analysis of completeness in the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. *Proceedings, International Conference on Microzonation* (pp. 897-910). Seattle, Washington.
- [30] Weichert, D. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1337-1347.
- [31] EPRI. (1986).

- Seismic hazard methodology for the central and eastern United States. Report NP-4726, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- [32] Zuñiga. (2018). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *J Seismol* (2017) CrossMark, 1295-1322.
- [33] Reyes, A., Brune, J. N., Lomnitz, C. (1979) Source mechanism and aftershock study of the Colima, Mexico, earthquake of January 10, 1973. *Bull Seismol Soc Am*, 69, 1819-1840.
- [34] David M. Boore, Jonathan P. Stewart, M.EERI, Emel Seyhan, M.EERI, and Gail M. Atkinson, M.EERI Measurement (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085. Earthquake Engineering Research Institute.
- [35] Boore, D. M., and Atkinson, G. M. (2008). Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24, 99-138.
- [36] Seyhan, E., and Stewart, J. P., 2014. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra*, 30, 1241-1256. SS14
- [37] Tapia Hernandez, E., & Reddy, E. A. (2017). Retos e incertidumbres en la predicción y prevención del riesgo sísmico. *Ingeniería sísmica*, 66-87.
- [38] V. Silva, D. Amo-Oduro, A. Calderon, C. Costa, J. Dabbeek, V. Despotaki, L. Martins, M. Pagani, A. Rao, M. Simionato, D. Viganò, C. Yepes-Estrada, A. Acevedo, H. Crowley, N. Horspool, K. Jaiswal, M. Journeay, M. Pittore. (2020). *Development of a global seismic risk model*. *Earthquake Spectra*, 36(1 suppl), 372-394.
- [39] Julian J. Bommer; Review of Seismic Hazard and Risk Analysis. *Seismological Research Letters* 2021;; 92 (5): 3248-3250.
- [40] Zhou Yun, Li YuQing, Wang WeiMin, Wang Xun, Pan ZhengYang, He JianKun. (2021). Source characteristics of the 2020 Alaska MW7.8 earthquake and seismic risk analysis of adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(2), 498-506.

Lista de figuras

Figura 2.1. Ubicación geográfica de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa.	12
Figura 3.1. Mapa de Sismicidad 2023.	17
Figura 4.1. a) Regiones de sismicidad poco profundas ($h \leq 40$ km); b) Regiones de sismicidad de profundidad intermedia ($h > 40$ km). El trazado fue hecho para que magnitudes mayores aparezcan en la parte superior.	29
Figura 4.2. Ejemplos de la variación de la distancia de la fuente al sitio para diferentes geometrías de fuentes sísmicas (Adaptado de Kramer, 1996).	35
Figura 5.1. Ubicación del sitio en estudio FIT-UABC (indicado con estrella). (https://maps.google.com.mx/).....	46
Figura 5.2. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (32.5, -116.9), ubicada en la ciudad de Tijuana.	47
Figura 5.3a-c. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (32.5, -116.9) para Tijuana para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO.	48
Figura 5.4a-c. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.	49
Figura 5.5. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	51
Figura 5.6. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	51
Figura 5.7. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	51

Figura 5.8. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Tijuana para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	52
Figura 5.9. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIT-UABC para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.	52
Figura 5.10. Ubicación del sitio en estudio FIM-UABC (indicado con estrella). (https://maps.google.com.mx/).....	53
Figura 5.11. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (32.63, -115.4), ubicada en la ciudad de Mexicali.	54
Figura 5.12a-c. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (32.63, -115.4) para Mexicali para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO.	54
Figura 5.13a-c. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.	55
Figura 5.14. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	56
Figura 5.15. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	56
Figura 5.16. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	56
Figura 5.17. Curvas de peligro sísmico considerando el sitio de Mexicali para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	57
Figura 5.18. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIM-UABC para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.	57

Figura 5.19. Ubicación del sitio en estudio FIH-UNISON (indicado con estrella). (https://maps.google.com.mx/).....	58
Figura 5.20. Zonas sismotectónicas para el estado de Sonora, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (29.08, -110.96), ubicada en la ciudad de Hermosillo.	59
Figura 5.21a-d. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (29.08, -110.96) para Hermosillo para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO, d) BAR.....	60
Figura 5.22 a-d. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.	61
Figura 5.23. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).....	62
Figura 5.24. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).....	62
Figura 5.25. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).....	62
Figura 5.26. Curvas de peligro sísmico para el sitio de Hermosillo para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).....	63
Figura 5.27. Espectros de peligro uniforme para el sitio FIH-UNISON para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.....	63
Figura 5.28. Ubicación del sitio en estudio FCT-UABCS (indicado con estrella). (https://maps.google.com.mx/).....	64
Figura 5.29. Zonas sismotectónicas para el estado de Baja California Sur, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (24.10, -110.31), ubicada en la ciudad de La Paz.	65

Figura 5.30a-f. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (24.1, -110.31) en La Paz para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) RIV1, d) RIV2, e) SMO, f) SUB1.	66
Figura 5.31a-f. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.	67
Figura 5.32. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	68
Figura 5.33. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	68
Figura 5.34. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	69
Figura 5.35. Curvas de peligro sísmico para el sitio de La Paz para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha).	69
Figura 5.36. Espectros de peligro uniforme para el sitio FCT-UABCS para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años.....	69
Figura 5.37. Ubicación del sitio en estudio FIC-UAS (indicado con estrella). (https://maps.google.com.mx/).....	70
Figura 5.38. Zonas sismotectónicas para el estado de Sinaloa, en el cual se tomó en cuenta la coordenada (24.8, -107.4), ubicada en la ciudad de Culiacán.....	71
Figura 5.39a-g. Distribuciones de probabilidad para la coordenada (24.8, -107.4) para Culiacán para zonas sismotectónicas: a) BC1, b) BC2, c) SMO, d) RIV1, e) RIV2, f) SUB1, g) BAR.....	72
Figura 5.40a-g. Aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de magnitud para las zonas de origen.	73

- Figura 5.41.** Curvas de peligro sísmico para el sitio de Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha)..... 74
- Figura 5.42.** Curvas de peligro sísmico para el sitio de Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha)..... 74
- Figura 5.43.** Curvas de peligro sísmico para el sitio Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha)..... 75
- Figura 5.44.** Curvas de peligro sísmico para el sitio Culiacán para una velocidad de ondas de cortante de 760 m/s (izquierda) y su respectivo espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años (derecha)..... 75
- Figura 5.45.** Espectros de peligro uniforme para el sitio Culiacán para diferentes velocidades de ondas de cortante considerando un periodo de retorno de 475 años..... 75

Lista de tablas

Tabla 2.1. Eventos de mayor magnitud ocurridos en cada Estado, desde el año de 1900 a la fecha en base al registro del Servicio Sismológico Nacional. [6]	13
Tabla 2.2. Eventos de mayor magnitud ocurridos en cada Estado, de los últimos 20 años en base al registro del Servicio Sismológico Nacional. [6]	14
No	14
Estado	14
Magnitud	14
Fecha	14
Descripción	14
Tabla 4.1. Resultados de parámetros esperados para cada región. [32]	30
Tabla 4.2. Coeficientes de escala de magnitud.....	38
Tabla 4.3. Coeficientes de escala de distancia dependientes del período	39
Tabla 5.1. Clasificación de suelos NEHRP	50

Peligro sísmico en zonas urbanas. Evaluación probabilística del Noroeste de México

Se terminó de imprimir en noviembre de 2024

en los talleres gráficos de Astra Ediciones

Av. Acueducto 829, Colonia Santa Margarita, C. P. 45140,

Zapopan, Jalisco

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

Impresión digital con interiores en papel bond 75g.

portada en cartulina sulfatada 12 pts.

El tiraje consta de 50 ejemplares

En este estudio de investigación, se aborda la evaluación del peligro sísmico en la zona noroeste de México mediante un análisis de peligro sísmico probabilístico (APSP).

A pesar de su categorización como una zona sísmica de moderada a alta en el contexto nacional, la investigación en esta área ha sido limitada.

ISBN: 979-13-87631-38-3



Consulta y descarga

